

REAPROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO *FLUFF* EM COQUERIA DE UMA USINA SIDERÚRGICA

Gabriela Montine Resende Pratti

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Orientador: Marcelo Borges Mansur

Rio de Janeiro – RJ

Agosto de 2020

REAPROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO *FLUFF* EM COQUERIA DE UMA USINA SIDERÚRGICA

Gabriela Montine Resende Pratti

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Orientador: Marcelo Borges Mansur

Aprovada por: Prof^a. Marysilvia Ferreira da Costa

Prof. Ismael Vemdrume Flores

Prof^a. Lisete Celina Lange

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

AGOSTO DE 2020

Pratti, Gabriela Montine Resende.

Reaproveitamento energético do *fluff* em coqueria de uma usina siderúrgica / Gabriela Montine Resende Pratti – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2020.

XXII, XX p.: il.; 29,7 cm

Orientador: Marcelo Borges Mansur

Dissertação (Mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2020.

Referências Bibliográficas: p. 96-100.

1. *Fluff*. 2. Reaproveitamento energético. 3. Coqueria. I. Mansur, Marcelo Borges. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

DEDICATÓRIA

Ao meu irmão Matheus Marcel,
pela honra da companhia por 17 anos.

*“Nem sempre podemos fazer grandes coisas,
mas sempre podemos fazer pequenas
coisas com grande amor.”*

Madre Tereza de Calcutá

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à pessoa que enxerga o potencial e investe seu tempo em desenvolver pessoas, Prof. Mansur, você é um tesouro dentro do meio acadêmico e realiza um papel único na sociedade de formar seres humanos, capazes de pensar.

À minha mãe Patrícia Montine e meu pai Abimailton Pratti pela dedicação diária a superar as provas da vida e enxergar Deus em todos os momentos, isso me motiva a seguir em frente.

Aos meus ex-companheiros de trabalho Arthur, Leandro Senna, Rodrigo Aquino, Rayana, Rone, Sandro, Vernei, e ainda ao Wilton que muito contribuíram para meu desenvolvimento pessoal e acreditaram nesse projeto.

Ao Luciano Marques Ramos visionário e líder que faz a diferença em todos os locais por onde passa, enxergando o melhor de cada pessoa e investindo no desenvolvimento pessoal e profissional de sua equipe, que seu exemplo possa ser seguido por todos.

À Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), por promover o desenvolvimento do país através de seus colaboradores e professores que tanto incentivam o conhecimento. Aos colegas de Universidade Igor Detoni e Geórgio Patrício pela dedicação e envolvimento ao tema, pelas inúmeras horas de estudo aplicadas na organização desse material.

Ao amigo e exemplo de profissional Guilherme Liziero que coordenou junto a equipe da UFMG e Gerdau Ouro Branco o trabalho realizado na planta piloto de coqueria.

À Gerdau, empresa a qual tenho grande admiração e que dediquei parte da minha vida profissional e recebi de forma meritocrática a contrapartida de me desenvolver. Uma escolha bem feita ter trabalhado com vocês.

Aos meus grandes amigos Fernanda Mitke e Gleydson Barroso pelos anos de amizade e companheirismo, dedicação sem fim e a possibilidade de escolher esses irmãos que a vida me deu.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

REAPROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO *FLUFF* EM COQUERIA DE UMA USINA SIDERÚRGICA

Gabriela Montine Resende Pratti

Agosto/2020

Orientador: Marcelo Borges Mansur

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

O *fluff* é um resíduo oriundo do processamento de sucatas de obsolescência constituído majoritariamente por materiais poliméricos, normalmente disposto em aterros sanitários. O presente trabalho aponta restrições qualitativas e quantitativas do uso desse resíduo em reaproveitamento energético em uma planta piloto de coqueria como material aditivo ao carvão mineral, sendo testado em porções de 0% a 10% da mistura. Foram avaliados os comportamentos químicos (teor de enxofre e cinza) e metalúrgicos (CRI, CSR, DI) nas diferentes porções de mistura. Adequações como: atendimento a restrição granulométrica ($x < 45$ mm), redução significativa (-65%) da presença de finos ($x < 2$ mm), concentração de materiais poliméricos de 61,4% para 77,5%, são a chave da viabilidade do teste em coqueria. Sendo premissa para o uso do *fluff* como aditivo ao carvão a adequação no layout da unidade industrial onde esse resíduo é gerado, tendo alcançado em avaliação estatística um limite inferior de processo do potencial calorífico inferior de 18,12 MJ/kg, valor que reproduz as referências de literatura para um *fluff* com qualidade para aplicações similares. Adições de até 1% de *fluff* não devem comprometer o desempenho do alto-forno, sendo este valor suficiente para promover uma redução considerável no volume do resíduo destinado a aterro.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

ENERGY REUSE OF FLUFF IN COKE OVEN IN A STEELMAKING UNIT

Gabriela Montine Resende Pratti

August/2020

Advisor: Marcelo Borges Mansur

Department: Metallurgical and Materials Engineering

The fluff is a residue generated from obsolescence scraps processing made up mostly of polymeric materials, usually disposed in landfills. The present study points out qualitative and quantitative restrictions on the use of this residue applied in energy reuse in a pilot coke oven plant as an additive material to mineral coal, being tested in portions of 0% to 10% of the charge. Chemical (sulfur and ash contents) and metallurgical (CRI, CSR, DI) behaviors in the different portions were evaluated. Adjustments such as: size restriction ($x < 45$ mm), reduction (-65%) of the presence of fines ($x < 2$ mm), concentration of polymeric materials from 61.4% to 77.5%, are the key to the trial feasibility. A *sine qua non* condition for the use of *fluff* as an additive to coal is the layout adaptation of the industrial plant where this waste is generated, having reached in statistical evaluation, a lower process limit of the calorific potential of 18.12 MJ/kg, a relevant value that reproduces the literature references for *fluff* quality applied in energetic recover. Pilot scale coke tests have shown that coke obtained from mixtures of coal with up to 1% *fluff* may not compromise the blast furnace performance, being this amount sufficient to promote a considerable reduction in the volume of residue destined for landfill.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 Indústria do aço	5
3.2 Processamento de sucata: triturador <i>shredder</i>	6
3.3 Processamento de resíduo de <i>shredder</i> : <i>eddy current</i>	9
3.4 Resíduo de <i>shredder</i> e <i>fluff</i>	11
3.4.1 Resíduos plásticos no mundo	12
3.4.2 Geração e destinação de <i>fluff</i> no mundo	15
3.4.3 Composição do <i>fluff</i>	22
3.5 Métodos de reaproveitamento do <i>fluff</i>	25
3.5.1 Reaproveitamento do <i>fluff</i> por separação física	25
3.5.2 Reaproveitamento energético do <i>fluff</i>	33
3.5.3 Reaproveitamento energético do <i>fluff</i> em siderurgia	39
4. METODOLOGIA	43
4.1 Sistema de trituração <i>shredder</i> e separação <i>eddy current</i>	43
4.2 Balanço de massa do resíduo do <i>shredder</i>	46
4.2.1 Adaptação da planta de processamento do resíduo do <i>shredder</i> para preparação de amostra para testes na planta piloto de coqueria	46
4.3 Caracterização do resíduo do <i>shredder</i>	49
4.4 Determinação do poder calorífico do <i>fluff</i>	53
4.5 Ensaios em planta piloto de coqueria	54
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
5.1 Adequação do layout da planta industrial para melhorar a qualidade do resíduo do <i>shredder</i> gerado	58
5.2 Caracterização do resíduo de <i>shredder</i>	67

5.2.1 Caracterização da “terra” de <i>shredder</i>	67
5.2.2 Caracterização do <i>fluff</i>	71
5.2.3 Caracterização do <i>zorba</i>	73
5.2.4 Caracterização da baía de metálicos ferrosos	78
5.2.5 Caracterização do material desviado do despoeiramento	79
5.3 Análise do potencial calorífico do <i>fluff</i>	82
5.4 Teste piloto em coqueria	84
5.4.1 Análise química – Teor de cinzas	87
5.4.2 Análise química – Teor de enxofre	87
5.4.3 Análise metalúrgica – Reatividade do coque ao CO ₂ (<i>coke reactivity index</i> – CRI)	88
5.4.4 Análise metalúrgica – Resistência mecânica do coque após reação com CO ₂ (<i>Coke Strength after Reaction</i> - CSR)	89
5.4.5 <i>Drum Index</i> (DI) – Resistência mecânica a frio	90
5.4.6 Viabilidade financeira da mistura de carvão – Valor em Uso (VIU)	90
6. CONCLUSÕES	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Principais rotas de produção de aço no Brasil (Instituto Aço Brasil, 2016).	1
Figura 2 – Modelo de economia linear e benefícios da economia circular (Instituto Aço Brasil, 2016).	3
Figura 3 – Esquema do triturador shredder (Metso, 2016).	8
Figura 4 – Esquema interno do moinho do triturador shredder (Hausler & Weber, 1991).	9
Figura 5 – Processo de trituração em um shredder (Fonte: Adaptado material interno – Gerdau).	10
Figura 6 – Esquema resumido dos sistemas de separação magnética que podem compor um eddy current (Steinert, 2017).	11
Figura 7 – Trajetória de diferentes metais (em formato de esfera com 0,5 cm de diâmetro) empregando-se o eddy current (Nagel, 2018).	12
Figura 8 – Exemplos de <i>fluff</i> (esquerda: após processamento; direita: contaminado com terra) (MTB-Recycling Manufacturing Engineering; Dobbs, 2017).	13
Figura 9 – Intervenções necessárias no ciclo de vida para migrar rumo ao plástico zero na natureza a nível regional e nacional (Dalberg Advisors, 2019).	15
Figura 10 – Operações da planta piloto de separação mecânica Argonne (Jody et al., 2006).	26
Figura 11 – Processo WESA-SLF (Sattler & Laage, 2000).	28
Figura 12 – Tecnologia de compactação e solidificação (Kusaka & Lida, 2000).	29
Figura 13 – Diagrama esquemático de separação por densidade aplicada à fração fina do <i>fluff</i> (Gent et al., 2015).	30
Figura 14 – Fluxograma de processamento de ASR na Espanha (Gent et al., 2015).	32
Figura 15 – Processo da planta de incineração de pneus adaptada para <i>fluff</i> (Mancini et al., 2010).	37
Figura 16 – Estoque de <i>fluff</i> utilizado nos testes (Mancini et al., 2010).	38
Figura 17 – Esquema de acomodação da mistura na uma câmara de coqueificação (Casagrande, 2010).	41
Figura 18 – Elementos chave para determinação do valor em uso. Adaptado de Goldsworthy et al. (2013).	43
Figura 19 – Foto aérea do shredder e do eddy current utilizados no presente trabalho e identificação dos principais pontos do processo (Google Maps).	44
Figura 20 – Imagem de um exemplo de sistema de peneiramento (AEI Solutions, 2019).	46
Figura 21 – Exemplo de mistura de coque e <i>fluff</i>	53
Figura 22 – Layout original da planta de processamento de resíduo de shredder utilizada no trabalho.	56
Figura 23 – Saída dos metálicos ferrosos imantáveis e finos magnéticos da planta original.	56
Figura 24 – Finos ou “terra do shredder” ou simplesmente “terra” gerados na planta original.	57

Figura 25 – <i>Zorba</i> fino (esquerda) e <i>zorba</i> grosso (direita) gerados na planta original.	57
Figura 26 – <i>Fluff</i> gerado na planta original.	58
Figura 27 – Comparativo entre a qualidade do <i>fluff</i> influenciado pela condição do peneiramento.	59
Figura 28 – Desenho esquemático no novo layout do eddy current.	60
Figura 29 – Adaptação da mesa vibratória do Extrator Magnético 1 (esquerda) e resíduo fino passante (direita).	61
Figura 30 – Comparativos do balanço de massa antes e após alteração da planta de processamento do resíduo de <i>shredder</i>	62
Figura 31 – Saída dos metálicos ferrosos imantáveis e finos magnéticos da planta, após alteração.	62
Figura 32 – “Terra do shredder” ou simplesmente “terra” após modificações na planta.	63
Figura 33 – <i>Zorba</i> fino (esquerda) e <i>zorba</i> grosso (direita) após alterações na planta.	63
Figura 34 - <i>Fluff</i> grosso (esquerda) e <i>fluff</i> fino (direita) após alterações na planta.	64
Figura 35 – Resíduo remanescente do sistema de despoeiramento após alterações na planta.	65
Figura 36 – Metálico ferroso separado da ‘terra’ por imantação.	67
Figura 37 – Metálico não ferroso separado manualmente.	68
Figura 38 – Plástico presente na ‘terra’ separado manualmente.	68
Figura 39 – Pedras e vidros segregados da ‘terra’ separados manualmente.	68
Figura 40 – Material considerado “ <i>fluff</i> ” presente na terra após modificação da planta.	69
Figura 41 – Exemplo de metálico não ferroso cinza retirado da amostra de <i>zorba</i> fino antes da modificação da planta.	73
Figura 42 – Exemplo de metálico não ferroso amarelo retirado da amostra de <i>zorba</i> fino antes da modificação da planta.	74
Figura 43 – Exemplo de <i>fluff</i> encontrado no <i>zorba</i> grosso antes da modificação da planta.	75
Figura 44 – Exemplo de amostras analisadas no espectrômetro ótico da unidade.	76
Figura 45 – Exemplo da espuma contida nos resíduos não metálicos.	80
Figura 46 – Exemplo de metálico contido no resíduo do despoeiramento.	81
Figura 47 – Exemplo de material agregado à peneira.	81
Figura 48 – Exemplo do coque calcinado com adição de <i>fluff</i>	85
 Gráfico 1 – PIB real da indústria de transformação brasileira (IEDI - Instituto de Estudos para o Desenvolvimento Industrial, 2019).	6
Gráfico 2 – Perfil típico de rotas de processamento de sucata na siderurgia brasileira (Fonte: Própria Autora).	7
Gráfico 3 – Evolução da produção de plásticos no mundo (Pessôa, 2018).	14
Gráfico 4 – Composição típica de veículos a partir da década de 1960 (incluindo previsão para 2015) (Passarini et al., 2012). *Outros = vidros, resíduos eletrônicos	16

Gráfico 5 – Uso de alguns materiais em carros domésticos de 1995 a 2007 (Jody et al., 2006).....	17
Gráfico 6 – Número de veículos na China e na Índia de 1985 a 2007 (Jody et al., 2006).	18
Gráfico 7 – Reciclagem de <i>fluff</i> versus reciclagem total do carro (Jody et al., 2006).	19
Gráfico 8 – Evolução do tratamento de resíduos plásticos na Europa entre 2006 e 2016 (Plastics Europe, 2018).....	20
Gráfico 9 – Taxa de recuperação de plástico por país em 2016 (Plastics Europe, 2018).	20
Gráfico 10 – Taxa de recuperação de plástico em alguns países (Algix, 2013).....	21
Gráfico 11 – Custo de aterro em diferentes países da União Europeia (EEA, 2013).	22
Gráfico 12 – Distribuição de densidade dos componentes poliméricos presentes no <i>fluff</i> (Jody et al., 2006).	25
Gráfico 13 – Perfil de tratamento de resíduos plásticos na Europa em 2016 (Plastics Europe, 2018).	34
Gráfico 14 – Evolução da produção de carvão por região (BP Statistical Review of World Energy, 2018).	40
Gráfico 15 – Correlação entre ‘terra’ e <i>fluff</i> gerados no <i>eddy current</i>	59
Gráfico 16 – Relação de dimensional e peso das amostras de <i>zorba</i> grosso.....	75
Gráfico 17 – Carta de controle do percentual de hidrogênio em massa nas amostras de <i>fluff</i>	83
Gráfico 18 – Carta de controle do percentual de enxofre em massa nas amostras de <i>fluff</i>	83
Gráfico 19 – Carta de controle do poder calorífico superior nas amostras de <i>fluff</i>	84
Gráfico 20 – Regressão do teor de cinzas (%) versus percentual de <i>fluff</i> na mistura de carvão.	86
Gráfico 21 – Regressão do teor de enxofre (%) versus percentual de <i>fluff</i> na mistura de carvão.	87
Gráfico 22 – Regressão quadrática da reatividade do coque (CRI) versus percentual de <i>fluff</i> na mistura de carvão	89
Gráfico 23 - Regressão quadrática da resistência mecânica (CSR) versus percentual de <i>fluff</i> na mistura de carvão	90
Gráfico 24 – Regressão Drum Index versus percentual de <i>fluff</i> na mistura de carvão. ..	91

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Resíduos plásticos em alguns países do mundo (World Bank Group, 2019).	15
Tabela 2 – Caracterização de diferentes amostras de <i>fluff</i> (Jody et al., 2006).	23
Tabela 3 – Composição elementar de diferentes amostras de <i>fluff</i> (Jody et al., 2006).	24
Tabela 4 – Dados utilizados na elaboração do sistema de separação por densidade (Gent et al., 2015).	31
Tabela 5 – Poder calorífico aproximado de diferentes materiais.	33
Tabela 6 – Valores legais estabelecidos de emissão para a atmosfera – valores médios diários (Parlamento europeu e o conselho da união europeia, 2008)	37
Tabela 7 – Propriedades aceitáveis do coque. Adaptado de Goldsworthy et al. (2013).	43
Tabela 8 – Lista de equipamentos utilizados no balanço de massa.	48
Tabela 9 – Caracterização do carvão MGC. Fonte: (Silva e Amorim et al., 2019).....	52
Tabela 10 – Composição usada nos ensaios piloto com o <i>fluff</i>	52
Tabela 11 – Etapas de preparação de amostras de coque na planta piloto.....	53
Tabela 12 – Ensaio realizados no laboratório da coqueria.	54
Tabela 13 - Parâmetros de comparação (base) do coque usado.	54
Tabela 14 – Caracterização da “terra” do eddy current no layout original.	66
Tabela 15 – Caracterização da “terra” do eddy current após modificação no layout.	69
Tabela 16 – Composição física do <i>fluff</i> no layout original.	70
Tabela 17 – Composição física do <i>fluff</i> fino após modificação no layout.	71
Tabela 18 – Composição física do <i>fluff</i> grosso após modificação no layout.	72
Tabela 19 – Caracterização do zorba fino antes da modificação da planta.....	73
Tabela 20 – Caracterização do zorba grosso antes da modificação da planta.....	75
Tabela 21 – Caracterização do zorba fino após adaptação da planta de processamento.	77
Tabela 22 – Caracterização do zorba grosso após da modificação da planta.....	77
Tabela 23 – Caracterização do material da baia de metálico ferroso antes da modificação do processo.	78
Tabela 24 – Caracterização do material da baia de metálico ferroso após modificação do processo.	79
Tabela 25 – Perfil do resíduo desviado do sistema de despoeiramento.....	80
Tabela 26 – Dados utilizados para cálculo do Valor em Uso do <i>fluff</i>	92

1. INTRODUÇÃO

Há basicamente duas rotas principais de fabricação de aço no Brasil e no mundo (Worldsteel Association, 2018): (i) usinas integradas que correspondem a aproximadamente 4/5 da produção nacional e que produzem aço a partir de alto-forno/convertedor BOF (*Basic Oxygen Furnace*) utilizando majoritariamente matérias-primas não renováveis, e (ii) usinas semi-integradas (ou *mini-mills*) que correspondem a aproximadamente 1/5 da produção nacional e que tem como principal fonte de matéria-prima a reciclagem de sucata de obsolescência. Um esquema destas rotas é apresentado na Figura 1.

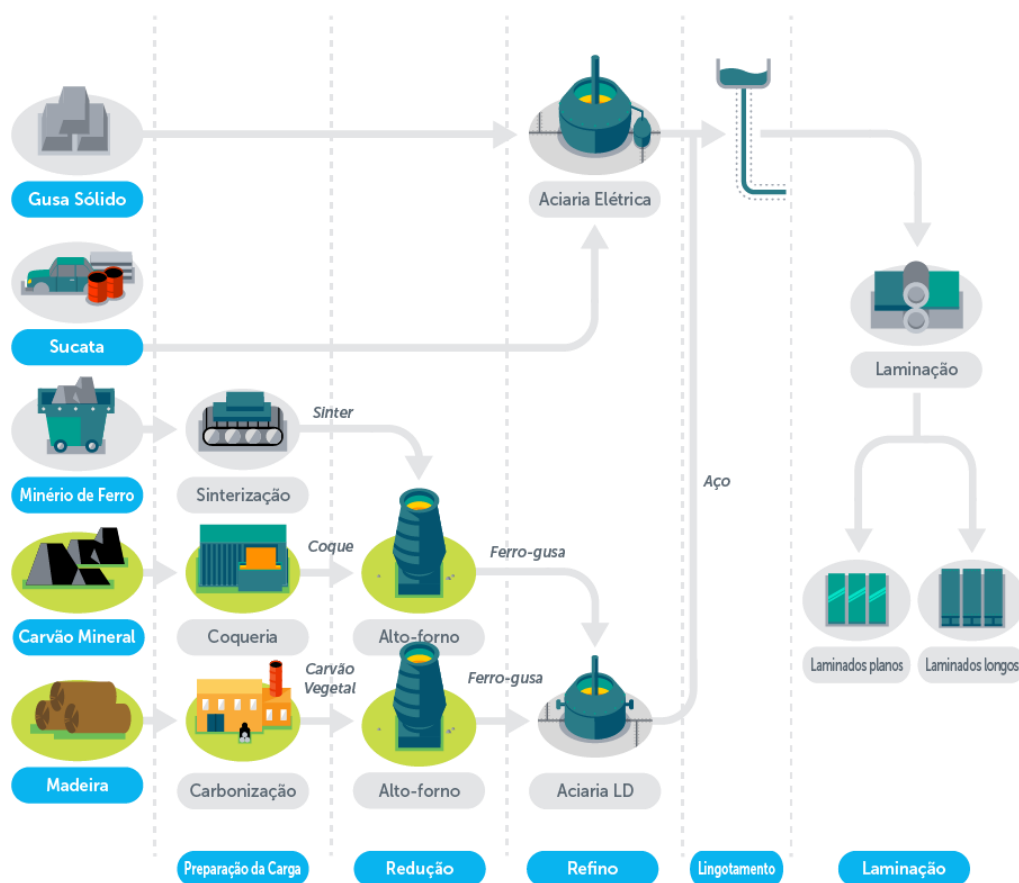


Figura 1 – Principais rotas de produção de aço no Brasil (Instituto Aço Brasil, 2016).

A crescente participação de materiais diversos, normalmente mais leves e mais baratos, na fabricação dos bens de consumo impacta diretamente na qualidade da sucata

de obsolescência, matéria-prima que alimenta as usinas semi-integradas, destacando-se o uso de materiais compósitos, plásticos, vidros e diferentes ligas metálicas. Para fins de ilustração, a evolução no consumo de plásticos para a fabricação de veículos leves em 1960 situava-se abaixo de 9,1 kg por veículo e em 2015 este valor alcançou em torno de 151 kg por veículo, sendo que cada 100 kg de plástico substituiu entre 200-300 kg de outros materiais (Plastics and Polymer Composites in Light Vehicles, 2018) (APME, 1999). Considerando-se que as sucatas de obsolescência recebidas nos Pátios de Metálicos de unidades siderúrgicas *mini-mills* são constituídas por elementos os mais variados possíveis, como lataria de automóveis, geladeiras, fogões, máquinas de lavar, dentre outros, tem-se que a proporção de ferro frente aos diversos materiais presentes (plásticos, espumas, metais não ferrosos, terra, etc.) é variável.

O principal equipamento responsável pelo processamento da sucata de obsolescência na maioria das usinas siderúrgicas *mini-mills* é o triturador *shredder*, cujo objetivo é densificar a sucata para (i) reduzir o número de carregamentos no forno elétrico a arco (FEA) e (ii) remover residuais que poderão contaminar o aço. O resíduo sólido gerado neste processamento é denominado de *fluff* ou resíduo de *shredder*, sendo sua geração relevante tanto em volume quanto em custo de destinação (Batista, 2014), perdendo apenas para escória de forno elétrico, coproduto tradicional e bem conhecido (Lobato et al., 2015). O *fluff* gerado em usinas semi-integradas apresenta características físicas e químicas variáveis em decorrência de sua composição complexa consequente da origem diversa da sucata, sendo normalmente disposto em aterros sanitários. Isto resulta em custos de disposição e perdas de material que poderia ser reutilizado. Neste contexto o desenvolvimento de métodos de tratamento para o reaproveitamento eficiente visando à readequação do *fluff* como coproduto pode resultar em benefícios econômicos e ambientais, inserindo-o no conceito de economia circular.

Ao contrário do modelo linear de produção ainda corrente, baseado nas etapas de extração-fabricação-uso-descarte, o modelo de economia circular (vide [Figura 2](#)) constitui uma alternativa atraente, pois foi projetado para recuperar o produto de suas atividades que seria descartado, sendo intencionalmente “restaurador”. Na economia circular, propõe-se que os materiais sejam utilizados de modo a maximizar seu valor, reduzindo a geração de resíduos e gerando benefícios econômicos, concomitante aos benefícios ambientais (Ribeiro & Kruglians, 2014). Tem-se, contudo, que a dificuldade

de se desvincular do modelo linear é considerável e encontra-se destacada no relatório de Perspectiva Global de Recursos Materiais para 2060 da OECD (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico) (OECD, 2018). Na China, por exemplo, o conceito de economia circular foi sugerido por estudiosos em 1998 e aceito pelo governo central como estratégia de desenvolvimento para equilibrar os recursos e o rápido crescimento econômico (Yuan et al., 2006). O reaproveitamento do *fluff* gerado no tratamento de sucatas de obsolescência para a fabricação de aço encontra-se perfeitamente alinhado ao conceito de produção circular.

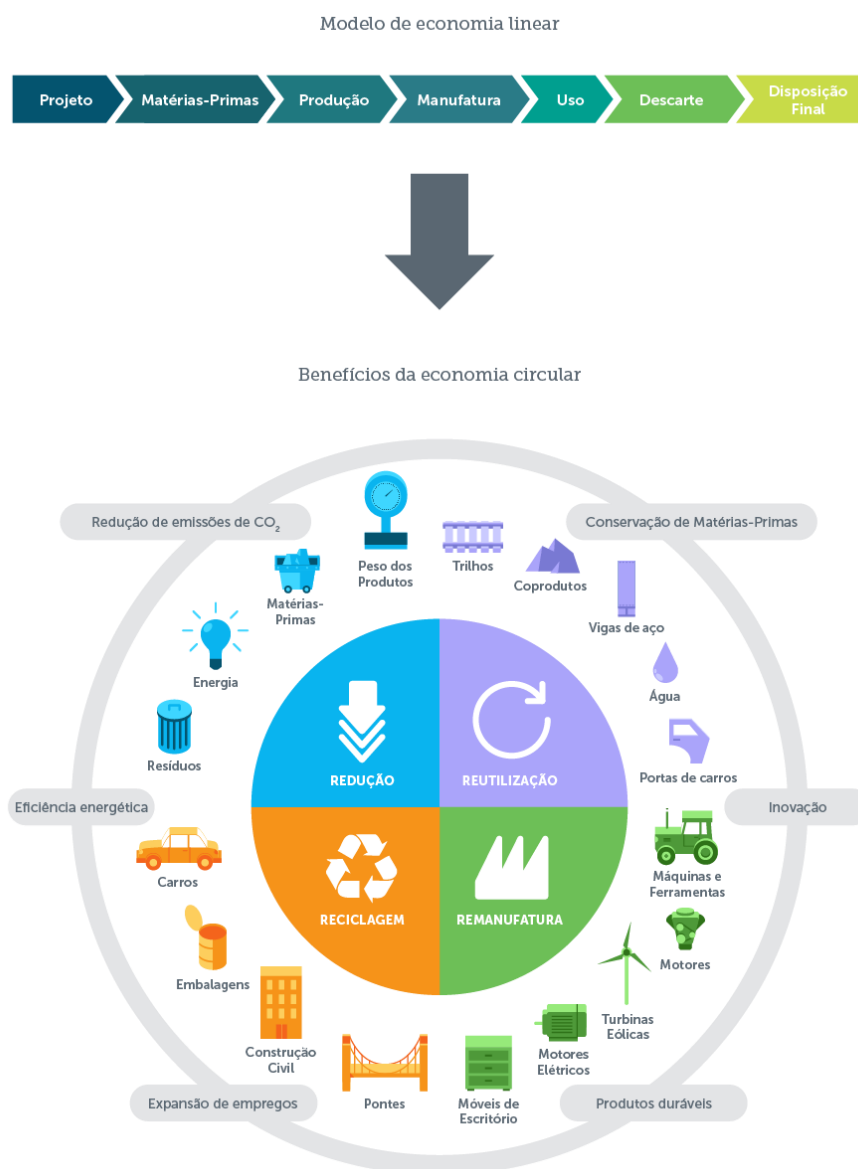


Figura 2 – Modelo de economia linear e benefícios da economia circular (Instituto Aço Brasil, 2016).

Há basicamente duas possibilidades para o tratamento de *fluff* em escala industrial: separação física de seus componentes e reaproveitamento energético. Embora a primeira alternativa seja mais interessante do ponto de vista de sustentabilidade, pois consiste na segregação das frações de diferentes materiais plásticos presentes no *fluff* para reuso preservando suas características físicas, esta somente se mostra viável caso haja homogeneidade na fonte geradora da sucata, por exemplo, no tratamento de *fluff* de sucata de automóveis. Quando a sucata advém de diversas fontes, como é o caso da sucata usada nas siderúrgicas semi-integradas brasileiras, a composição do *fluff* gerado é heterogênea, o que inviabiliza economicamente sua separação física uma vez que o valor agregado de seu conteúdo é baixo. Neste caso, o reaproveitamento do conteúdo energético pode ser mais vantajoso, embora requeira adequação metodológica para contornar problemas relacionados à liberação de substâncias nocivas quando incinerado, sendo este o caminho adotado no presente estudo e cujos objetivos estão listados no Capítulo 2. Ambas as formas de tratamento de *fluff* possuem vantagens e desvantagens, sendo detalhadamente descritas no Capítulo 3, que inclui também o processamento de sucatas para a produção de *fluff* e a inserção da geração deste resíduo no contexto ambiental. Em seguida, no Capítulo 4, apresenta-se a metodologia adotada na realização deste trabalho, cujos resultados são apresentados e discutidos no Capítulo 5. Por fim, no Capítulo 6, listam-se as principais conclusões obtidas no estudo.

2. OBJETIVOS

Objetivo geral

Avaliar o potencial de utilização do *fluff* em uma coqueria, a partir de um estudo em escala piloto (~600 kg de *fluff*) como material aditivo ao carvão mineral, com o intuito de conferir uma destinação mais nobre que o aterro sanitário, avaliando as restrições técnicas e financeiras do uso desse resíduo.

Objetivos específicos

- Avaliar criticamente as principais alternativas para o reaproveitamento do *fluff* em escala industrial (300-600 t/mês) a partir de levantamento bibliográfico;
- Adequar o layout de uma unidade siderúrgica semi-integrada nacional para melhorar a qualidade do *fluff* gerado;
- Caracterizar as principais correntes do processamento de sucatas via triturador *shredder* + *eddy current* para conhecer sua composição e granulometria;
- Determinar o poder calorífico do *fluff* gerado após adequação de *layout* e melhoramentos da planta de processamento;
- Realizar ensaios em planta piloto de coqueria de uma siderúrgica vislumbrando identificar o melhor cenário para aplicação do *fluff* adicionado ao coque.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Processamento de sucata: triturador *shredder*

A produção de aço no Brasil em 2017 retornou aos indicadores de 2013 e o consumo aparente regrediu aos patamares de 2005 (Instituto Aço Brasil, 2018), resultado fortemente influenciado pela redução na taxa de crescimento de produção de aço no mundo no período 2015-2017 (Worldsteel Association, 2018). Este cenário também foi influenciado pela forte desindustrialização no país, como pode ser visto no [Gráfico 1](#), alavancada pela redução no preço do barril de petróleo que se estagnou e/ou regrediu desde 2012 até 2016 (BP Statistical Review of World Energy, 2018), um cenário difícil para as produtoras de aço que exigem trabalhos inovadores para manter sua sustentabilidade. Nesse cenário efervesceu a necessidade de estudar novas fontes de receita para a indústria não praticada no Brasil até o momento, incluindo-se o reuso do *fluff* gerado nas siderúrgicas *mini-mills*.

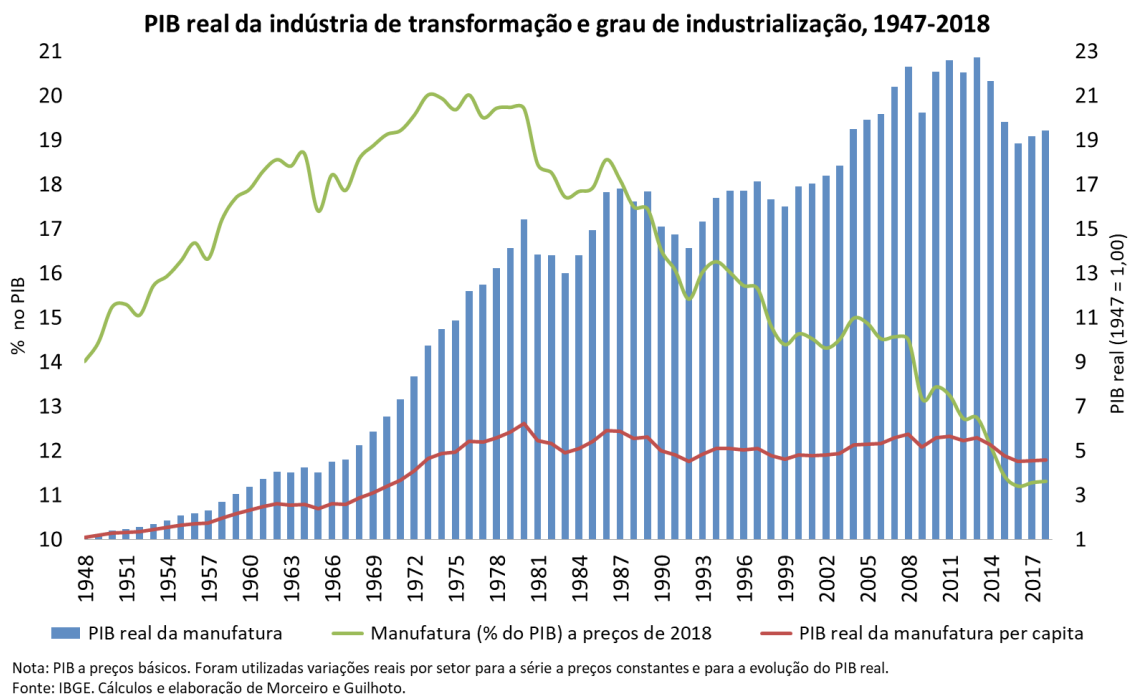


Gráfico 1 – PIB real da indústria de transformação brasileira (IEDI - Instituto de Estudos para o Desenvolvimento Industrial, 2019).

A fabricação de aço empregando-se a rota semi-integrada exige versatilidade para processar os diferentes tipos de sucata, de acordo com as características de cada região, de modo a abastecer o Forno Elétrico a Arco (FEA) com o intuito de garantir sua produtividade (toneladas de aço produzidas por unidade de tempo) e custo competitivo do aço (John, 2009). Assim, conhecer os tipos de sucata, suas características e desenhar rotas de processamento para atender a aciaria são exigências básicas para um Pátio de Metálicos, pois cada metálico possui um rendimento específico no processamento e em uso no FEA que deve ser contabilizado para o custo final do aço. Separação, trituração, corte mecânico e oxicorte são exemplos de tipos de beneficiamento da sucata, em que a escolha do tipo de beneficiamento a ser usado depende exclusivamente das características físicas das sucatas ferrosas. Um exemplo de rotas típicas de processamento de sucata utilizadas no Brasil com sua respectiva produtividade média e densidade alcançada no processamento é apresentado no [Gráfico 2](#).

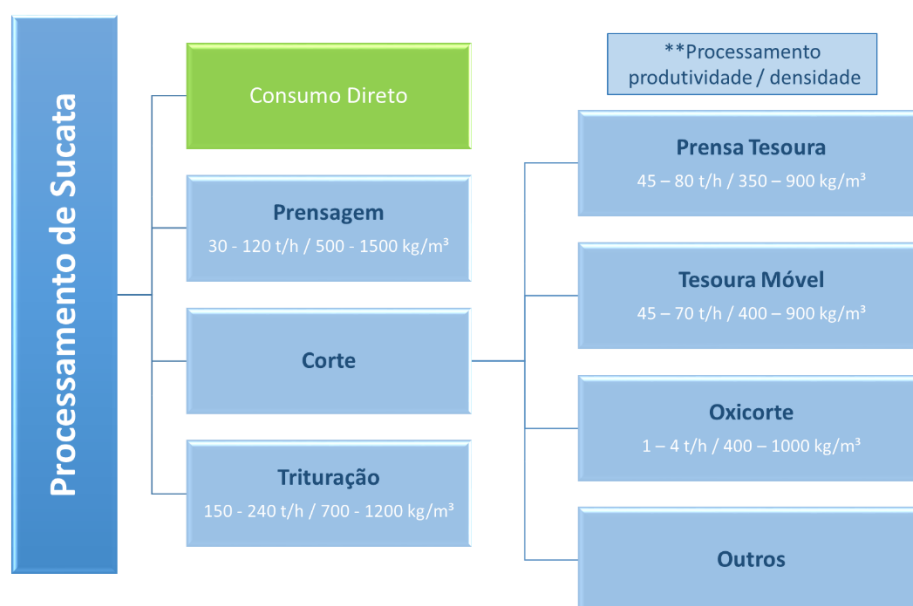


Gráfico 2 – Perfil típico de rotas de processamento de sucata na siderurgia brasileira (Fonte: Própria Autora).

Atualmente o processamento de sucata que garante maior produtividade aos fornos é a trituração, cuja finalidade é aumentar a densidade e remover impurezas da sucata. O aumento de densidade é importante para permitir o preenchimento do forno com menor número de carregamentos, diminuindo assim o *tap-to-tap* (duração de uma corrida do forno), entre outras exigências operacionais.

Após vários anos trabalhando com ferro velho em desmontes de carros, o Sr. Alton Scott Newell acreditava que deveria haver uma maneira mais simples para dismantelar um veículo do que as 10 horas por dia gastas por uma pessoa para essa atividade. Inspirado em máquinas de moer grãos de sua infância e tecnologias já desenvolvidas para latinhas de conserva, apresentou, em 1969, a patente 3.482.788 do primeiro triturador de sucata de alta capacidade que utilizava 10 minutos por carro e muito menos energia se comparado às soluções similares; com motor de 500 HP, surgiu o triturador *shredder* que revolucionou os Pátios de Metálicos no mundo (ASME, 1994). Atualmente no Brasil existem 14 trituradores *shredder* destinados a processar sucatas metálicas ferrosas, sendo 5 da Gerdau, 1 da Sinobras, 2 da Arcelormittal, 1 da Harsco, 1 da Trufer, 1 da RFR, 1 da Guarulhos Sucatas, 1 da Federal Sucatas (Goiás) e 1 Suvifer (São Paulo).

O triturador *shredder* é mostrado na Figura 3. É composto de uma correia alimentadora, rolo compactador, moinho, mesas vibratórias, tambores magnéticos e correias transportadoras, podendo ser acrescido ainda um *preshredder* e um sistema de despoeiramento (Metso, 2016). A sucata é abastecida através da correia alimentadora e sofre uma pré-compactação através do rolo compactador para adentrar o moinho.

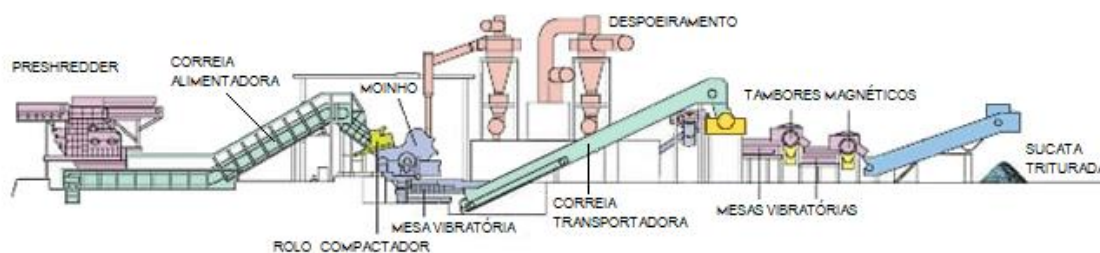


Figura 3 – Esquema do triturador *shredder* (Metso, 2016).

O moinho do triturador *shredder* é mostrado na Figura 4. É composto de rotor, grelhas, martelos e outras peças de desgaste que devem ser trocadas periodicamente para manter as características desejáveis do produto final.

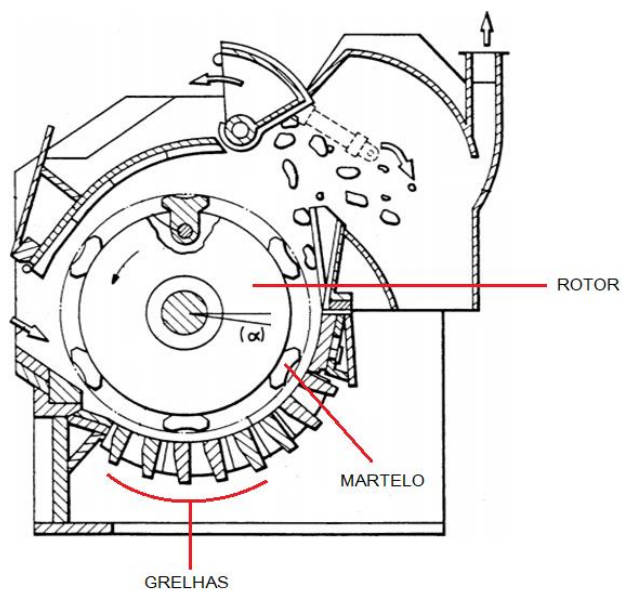


Figura 4 – Esquema interno do moinho do triturador *shredder* (Hausler & Weber, 1991).

O processamento da sucata em um *shredder* pode ser dividido em 3 etapas, ilustradas na **Figura 5** (Metso, 2016):

- Trituração primária: ocorre entre a bigorna e o martelo, e faz com que a sucata se quebre;
- Fricção: ocorre dentro da câmara de trituração com o próprio atrito de uma sucata em outra. Esse atrito proporciona uma trituração secundária, além da separação de materiais diferentes e uma limpeza do produto.
- Densificação: ocorre com os vários impactos fornecidos pelo martelo na sucata. É nessa fase que se tem uma compactação do material, tornando-o rentável para a fundição.

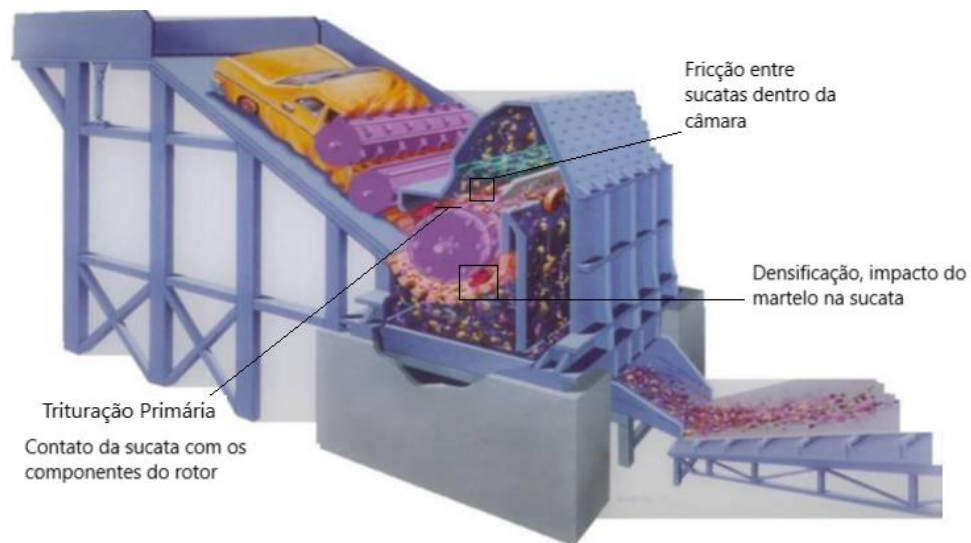


Figura 5 – Processo de trituração em um *shredder* (Fonte: Adaptado material interno – Gerdau).

Um dos itens de maior importância para a qualidade do produto final é o separador magnético, que separa o produto final (sucata ferrosa) do resíduo de *shredder*. Este resíduo pode ou não passar por novo processamento para a separação da fração de metais não ferrosos, através de um sistema com um ou mais extratores magnéticos chamados coloquialmente de *eddy current*. O resíduo obtido após tratamento no *eddy current* encontra-se, pois, livre de materiais não ferrosos, sendo denominado de *fluff*.

3.2 Processamento de resíduo de *shredder*: *eddy current*

Uma planta de processamento de resíduo de *shredder* recebe o nome vulgar de *eddy current* devido ao princípio de funcionamento de seu componente mais importante, o separador magnético suspenso (Correia, 2009), utilizado na recuperação de metálicos não ferrosos ou *zorba*. O objetivo da operação da planta é a recuperação da maior parte dos materiais recicláveis com valor agregado como: metálicos não ferrosos, inox, metálicos ferrosos, placas eletrônicas, alguns plásticos, entre outros (Baker et al., 1995). O principal item almejado nessa recuperação é o *zorba*, definição para a sucata não ferrosa oriunda do *shredder* onde se predomina o alumínio e suas ligas (Institute of Scrap

Recycling Industries - ISRI, 2016), além de inox, cobre e suas ligas, ligas de níquel, resíduos eletrônicos como placas e fios, entre outros.

Usualmente os processos são estruturados em trituração, classificação e separação (Steinert, 2018). Dependendo das características e valor contido no resíduo essa estrutura pode se tornar mais complexa, necessitando de conjunto de separadores magnéticos e de outras tecnologias.

Após a trituração que ocorre no moinho do *shredder*, o material que não é imantado por separação magnética e destinado como sucata triturada, é transportado para um sistema de peneiramento e classificado de acordo com sua granulometria, sendo então cada porção direcionada para um sistema de separação por *eddy current* para captação do *zorba* (e.g., Cu, Al, Zn) e de resíduos sólidos, como mostrado esquematicamente na Figura 6.

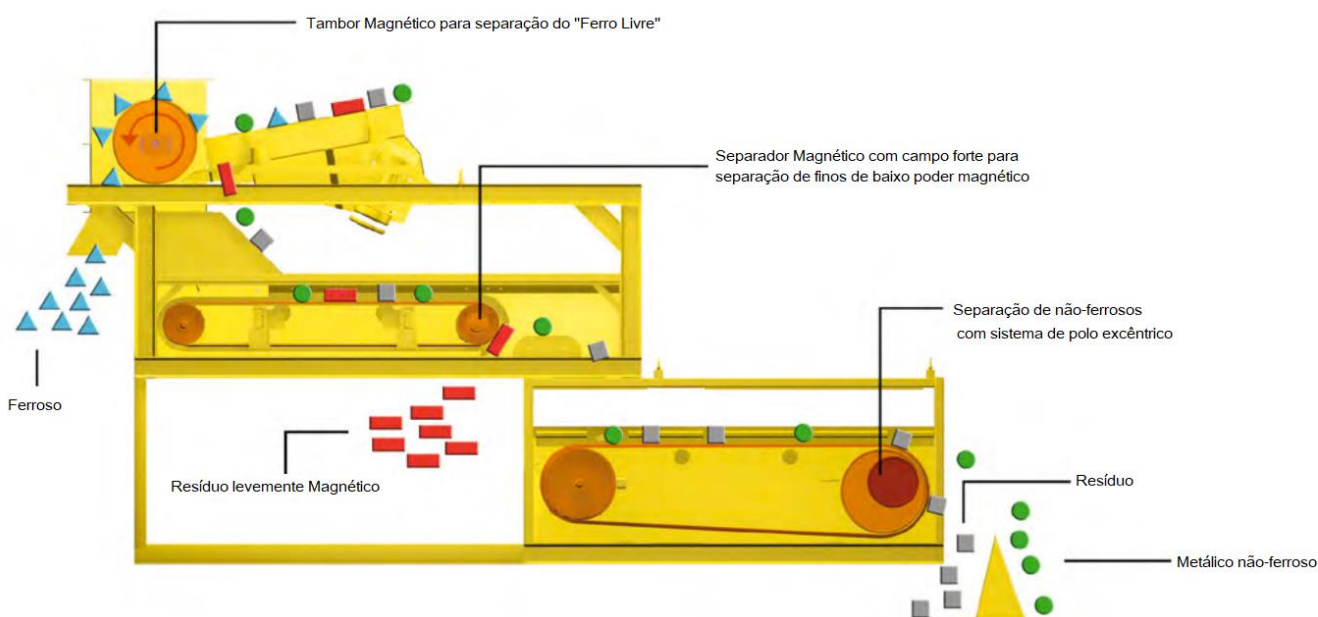


Figura 6 – Esquema resumido dos sistemas de separação magnética que podem compor um *eddy current* (Steinert, 2017).

O princípio da tecnologia de *eddy current* mostrado na Figura 7 é de que um campo magnético variável no tempo induz corrente elétrica em todo o volume de uma partícula condutora. A chamada corrente parasita (ou corrente de Foucault) reage ao

campo magnético aplicado, cuja força gerada altera a trajetória da partícula permitindo, assim, a separação de diferentes metais (Nagel, 2018).

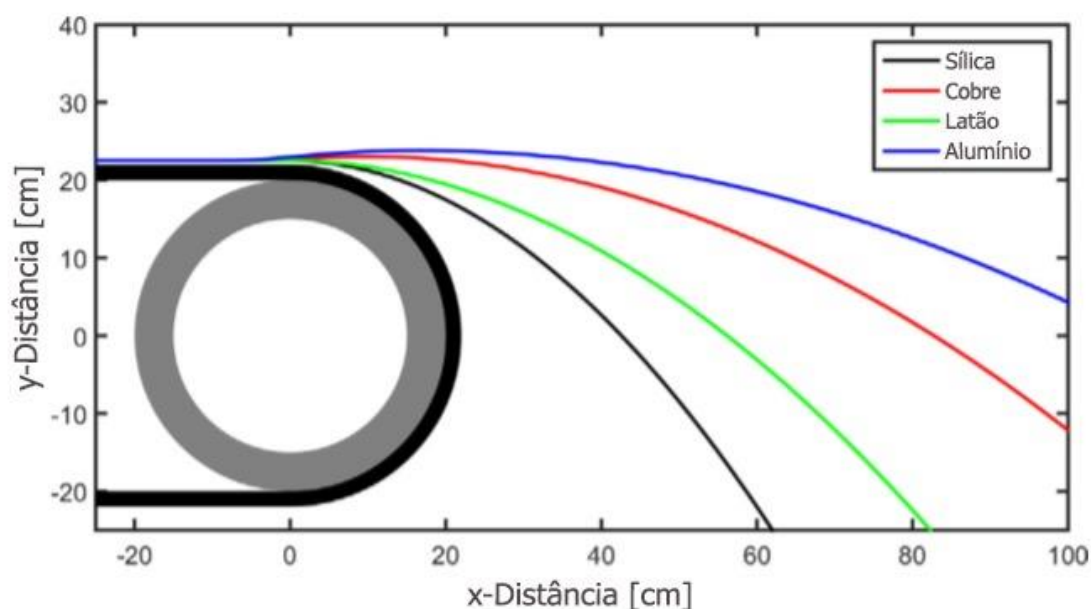


Figura 7 – Trajetória de diferentes metais (em formato de esfera com 0,5 cm de diâmetro) empregando-se o *eddy current* (Nagel, 2018).

3.3 Resíduo de *shredder* e *fluff*

O resíduo de *shredder* é um material sólido de características físicas e químicas variáveis, gerado no triturador *shredder* (após passagem no separador magnético) mediante processamento de sucata visando à sua reciclagem/reuso. O termo *fluff* é usado para denominar a parte do resíduo de *shredder* que não possui material metálico não ferroso (que é separado no *eddy current*) e isento de terra (presente via contaminação da sucata ou intencionalmente adicionada para aumentar o peso na operação de compra/venda de sucata); caso gerado em separação deficiente, o *fluff* se encontrará contaminado. O *fluff* possui características diversas, como pode ser visto na Figura 8, a depender de inúmeros fatores. O principal componente do *fluff* consiste dos diversos polímeros, daí o uso da palavra *fluff* que decorre de sua alta compressibilidade e baixa densidade, conferidas pela presença de espumas e fibras (Nagel, 2018).



Figura 8 – Exemplos de *fluff* (esquerda: após processamento; direita: contaminado com terra) (MTB-Recycling Manufacturing Engineering; Dobbs, 2017).

Nas siderúrgicas semi-integradas brasileiras que possuem o *shredder* para o processamento de sucata, o resíduo de *shredder* é um dos principais ‘despojos’, perdendo em alguns casos para a escória de forno elétrico. Mas, dependendo da capacidade do equipamento, o resíduo de *shredder* pode destacar-se como o maior resíduo gerado de uma siderúrgica, representando até 57% do total (Câmara, 2017). Nesse contexto, aumenta-se o custo de processamento devido aos gastos com a destinação e a pressão de órgãos reguladores, o que incentiva o desenvolvimento de soluções para uma melhor destinação do *fluff*.

3.3.1 Resíduos plásticos no mundo

O plástico sintético produzido através do petróleo teve seu uso em larga escala iniciado ao final da segunda guerra mundial, durante a guerra fria já na década de 50, e desde então se tem visto sua aplicação e produção crescer como mostrado no [Gráfico 3](#). A presença de plástico nos resíduos sólidos urbanos cresceu de 1% em 1960 para 10% em 45 anos nos países de média e alta renda (Geyer et al., 2019). Como se observa na [Tabela 1](#), o maior consumo de plástico per capita se concentra nos países de maior renda, e consequentemente o resíduo gerado por habitante é maior nessas localidades (World

Bank Group, 2019). Os países com maior produto interno bruto (PIB) geram mais resíduos que os países mais pobres, quase em uma proporção linear (Jambeck et al., 2015).

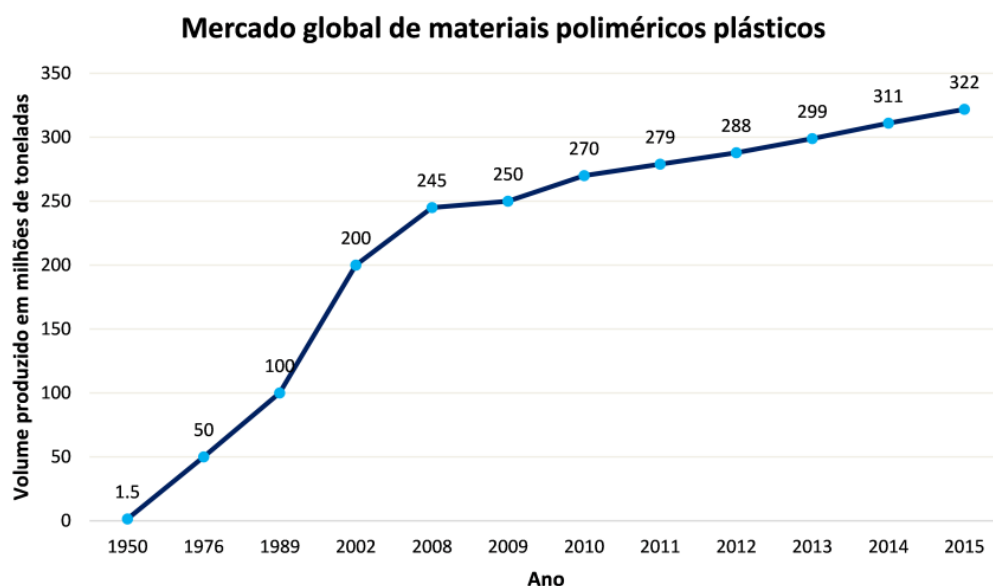


Gráfico 3 – Evolução da produção de plásticos no mundo (Pessoa, 2018).

Na [Tabela 1](#) observa-se também que os índices de reaproveitamento de plásticos também são maiores nos países desenvolvidos. Isso não significa, porém, que haja menor impacto ambiental; por exemplo, o resíduo plástico não reaproveitado ou incinerado nos Estados Unidos responde por 2,6 vezes mais do que a geração total por habitante do Brasil. Outro ponto é que apesar do Brasil ser o 4º maior produtor de plástico do mundo, este está na sétima posição em uma relação de dez países na geração de resíduo plástico por habitante, abaixo de países como Estados Unidos, Canadá, Reino Unido, Alemanha, Rússia e Japão.

Os esforços despendidos pela maioria dos países desenvolvidos para mitigar os efeitos negativos da destinação descontrolada de plásticos no mundo necessitam ir além, já que apesar do número crescente de estudos destinados ao tema e maior informação, continuam, de maneira geral, tendo substancial impacto na deterioração ambiental do planeta. Pensar em educação ambiental e nas políticas de coleta seletiva porta-a-porta são fundamentais para estruturar políticas públicas rígidas e globais, conforme proposta da

WWF - Fundo Mundial para a Vida Selvagem e Natureza, como mostrada na [Figura 9](#) (Dalberg Advisors, 2019).

Tabela 1 – Resíduos plásticos em alguns países do mundo (World Bank Group, 2019).

País	População (milhões)	Total de Lixo Plástico gerado por ano *(milhões de toneladas)	Toneladas de lixo Plástico por ano por habitante	Relação de geração de resíduo Plástico vs. Reciclagem ou Incineração
Estados Unidos	32.720.000	70.782.577	2,16	34,60%
Canadá	3.759.000	6.696.763	1,78	21,25%
Reino Unido	6.644.000	7.994.284	1,20	31,45%
Alemanha	8.279.000	8.286.827	1,00	37,94%
Rússia	14.450.000	8.948.132	0,62	3,58%
Japão	12.680.000	7.146.514	0,56	5,68%
Brasil	20.930.000	11.355.220	0,54	1,28%
China	138.600.000	54.740.659	0,39	21,92%
Indonésia	26.400.000	9.885.081	0,37	3,66%
Índia	133.600.000	19.311.663	0,14	5,73%

* Valor total de resíduo plástico descartado em resíduos sólidos urbanos, resíduos industriais, resíduos de construção, resíduo eletrônico e resíduos agrícolas, na fabricação de produtos durante um ano.

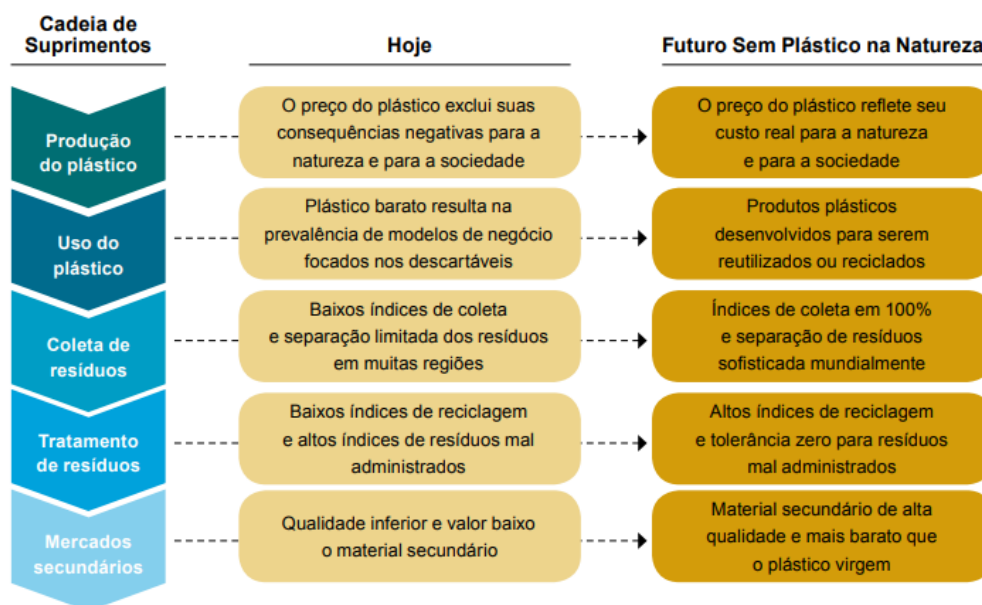
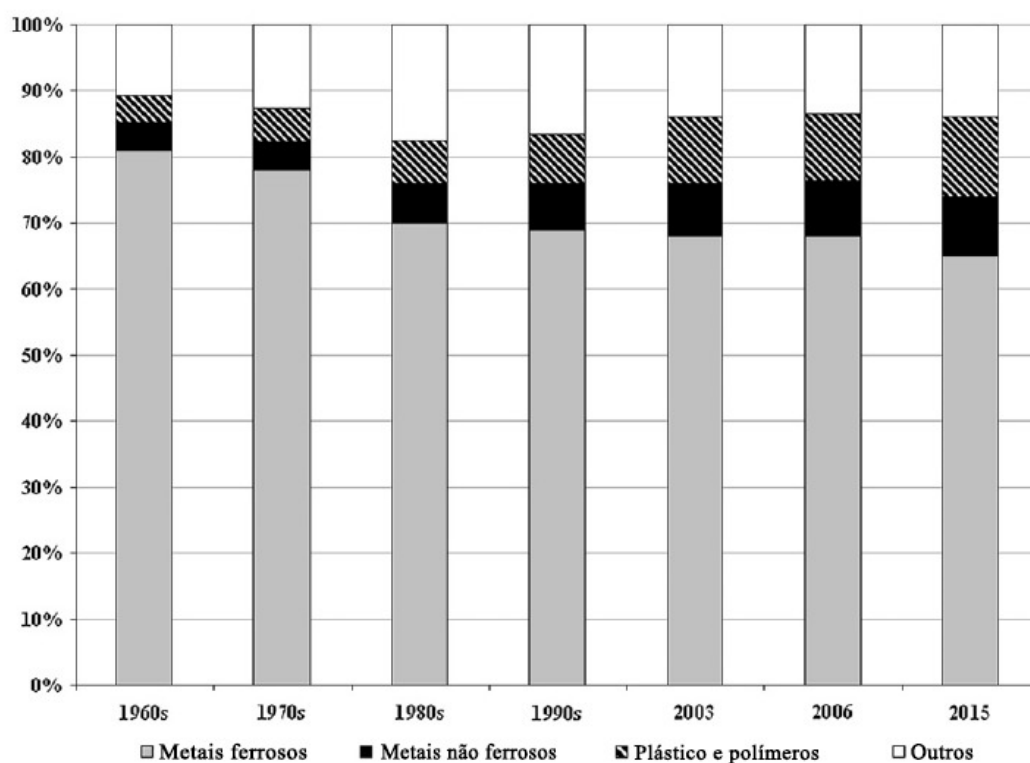


Figura 9 – Intervenções necessárias no ciclo de vida para migrar rumo ao plástico zero na natureza a nível regional e nacional (Dalberg Advisors, 2019).

3.3.2 Geração e destinação de *fluff* no mundo

Nos EUA, Europa e Japão, o *fluff* é majoritariamente produzido via reciclagem de carros fora de circulação ou ELV (*end-of-life vehicles*). Em 2010, a geração mundial de ELVs atingiu 40 milhões por ano (Sakai et al., 2014). Com o desenvolvimento da indústria automobilística e o avanço no uso de materiais poliméricos e compósitos, há uma tendência de substituir o aço em automóveis, deixando-os mais leves, mais seguros e diminuindo o custo. O [Gráfico 4](#) ilustra tal tendência de mudança na composição de veículos, onde se observa uma diminuição na participação de aço de 80% em meados da década de 1960 para 65% em 2015 (Passarini et al., 2012).



[Gráfico 4](#) – Composição típica de veículos a partir da década de 1960 (incluindo previsão para 2015) (Passarini et al., 2012). *Outros = vidros, resíduos eletrônicos

O [Gráfico 5](#) mostra o crescente uso de alguns materiais alternativos (plásticos, borracha, alumínio) na constituição de carros domésticos. E como o número de veículos tem aumentado drasticamente, principalmente na China e Índia (vide [Gráfico 6](#)), trata-se

de um resíduo de composição variável, cuja quantidade é significativa e crescente em nível mundial. Estima-se que haja atualmente 1 veículo para cada 7 pessoas no mundo, o que totaliza mais de 1,2 bilhão de automóveis, comerciais leves e veículos pesados em circulação (sendo 263 milhões nos Estados Unidos, 212 milhões na China, 77 milhões no Japão e 51 milhões no Brasil), excluindo-se tratores, máquinas de obras, motocicletas e outros veículos de uso industrial (Oliveira, 2017). Quando oriundo exclusivamente de carros, o *fluff* é denominado de ASR (*automotive shredder residue*).

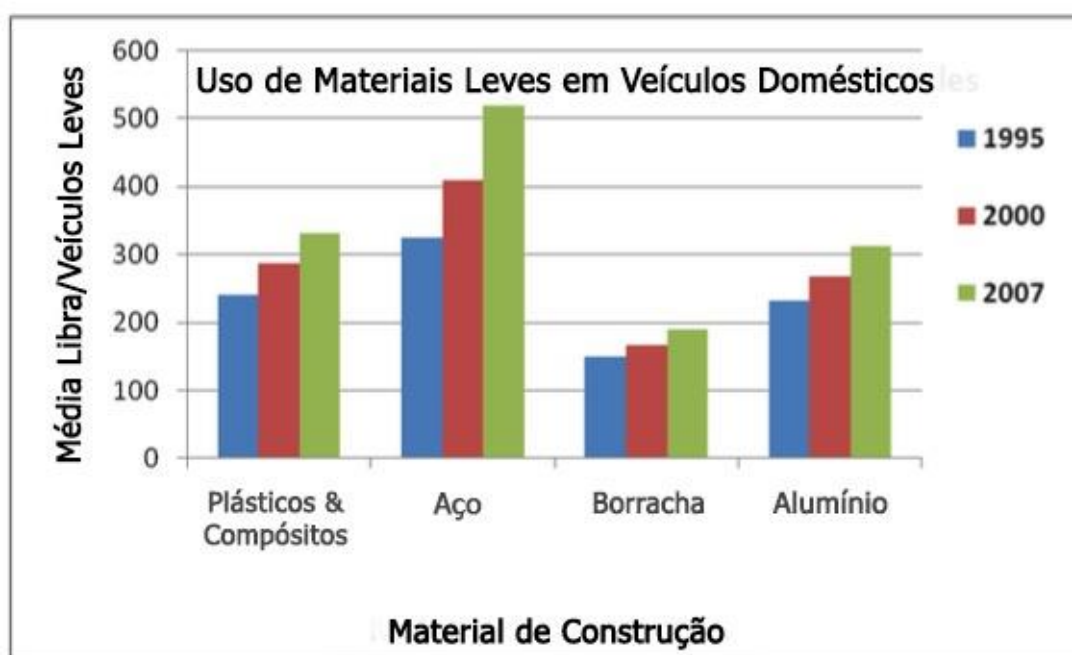


Gráfico 5 – Uso de alguns materiais em carros domésticos de 1995 a 2007 (Jody et al., 2006).

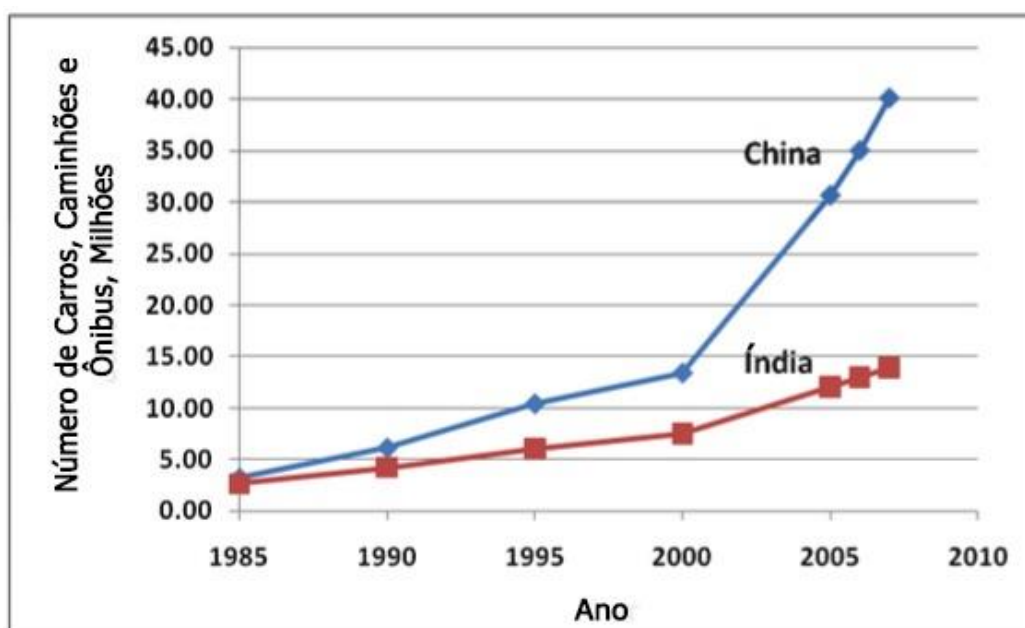
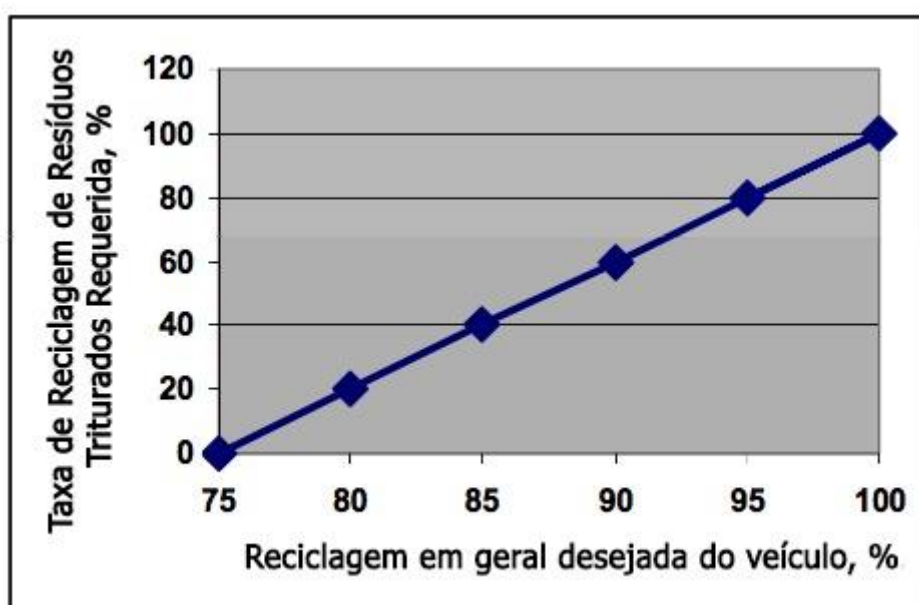


Gráfico 6 – Número de veículos na China e na Índia de 1985 a 2007 (Jody et al., 2006).

Passarini et al. (2012) estudaram o efeito da mudança na composição dos carros utilizando análise do ciclo de vida do ASR e concluíram da necessidade de produção de carros com uma dada porcentagem de materiais obtidos através do reciclo de tal resíduo. A criação de leis que estabeleçam o mínimo de, por exemplo, 10% de materiais reciclados da fração não metálica do ASR em carros novos estimularia a adoção de iniciativas como a criação de mercado real para materiais reciclados, aperfeiçoamento das práticas de desmantelamento, entre outros.

Seguindo a mesma tendência observada nos automóveis, a composição de diversos outros bens de consumo (produtos de linha branca, eletrodomésticos, etc.) também vem sendo alterada com o passar dos anos, mediante substituição de aço por outros materiais como polímeros. Diante desta situação, o *fluff* tem ganhado atenção mundial por se tratar de um resíduo gerado em grandes volumes, além de ser de difícil manuseio e processamento. Apesar de conter materiais recicláveis e, alguns deles, possuírem razoável valor agregado, diversos fatores dificultam o seu aproveitamento, como a falta de tecnologia de separação, possuir composição extremamente variável, o baixo valor de mercado dos materiais recuperados, a percepção de qualidade e a baixa produção individual dos materiais por localidade.

Em geral, o aterro ainda constitui a destinação mais praticada mundialmente. Entretanto, aspectos como custo do aterro e legislações ambientais têm mudado essa prática em muitos países. Na União Europeia, por exemplo, a Diretiva 2000/53/EC (18/09/2000) introduziu metas de reuso e recuperação de carros: em janeiro de 2006, o mínimo de reuso e recuperação deveria ser de 85% e, em janeiro de 2015, 95%. Segundo Jody et al. (2006), a reciclagem de 85% de um veículo corresponde à reciclagem de 40% do *fluff* gerado, enquanto que a reciclagem de 95% de um veículo corresponde à reciclagem de 80% de seu *fluff* (vide [Gráfico 7](#)).



[Gráfico 7](#) – Reciclagem de *fluff* versus reciclagem total do carro (Jody et al., 2006).

Como alternativa à reciclagem do *fluff*, uma vez que esta é limitada por questões tecnológicas, de custo e de mercado, o reaproveitamento energético pode ser apresentado como uma importante alternativa para a sua destinação, como tem sido verificado para resíduos plásticos nos países da União Europeia, tendo em vista a diretiva 2000/53/EC. De fato, avaliando o [Gráfico 8](#), pode-se notar a mudança na prática de destinação de resíduos plásticos na Europa entre 2006 e 2016, indicando aumento considerável de reciclagem e reaproveitamento energético dos resíduos plásticos no período. Importante observar também que os países com melhores índices de reciclagem e reaproveitamento

são justamente aqueles que possuem maior restrição de destinação, conforme indicado no [Gráfico 9](#) para o ano de 2016, o que ilustra a dependência de forças como a lei para impulsionar as práticas em direção a um cenário cada vez mais sustentável.

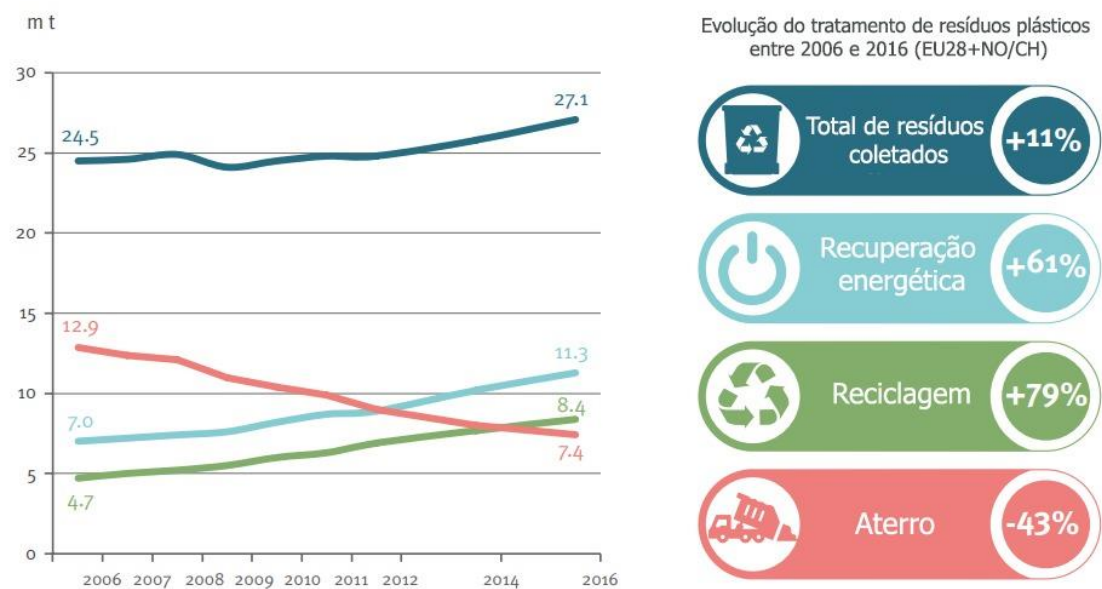


Gráfico 8 – Evolução do tratamento de resíduos plásticos na Europa entre 2006 e 2016 (Plastics Europe, 2018).

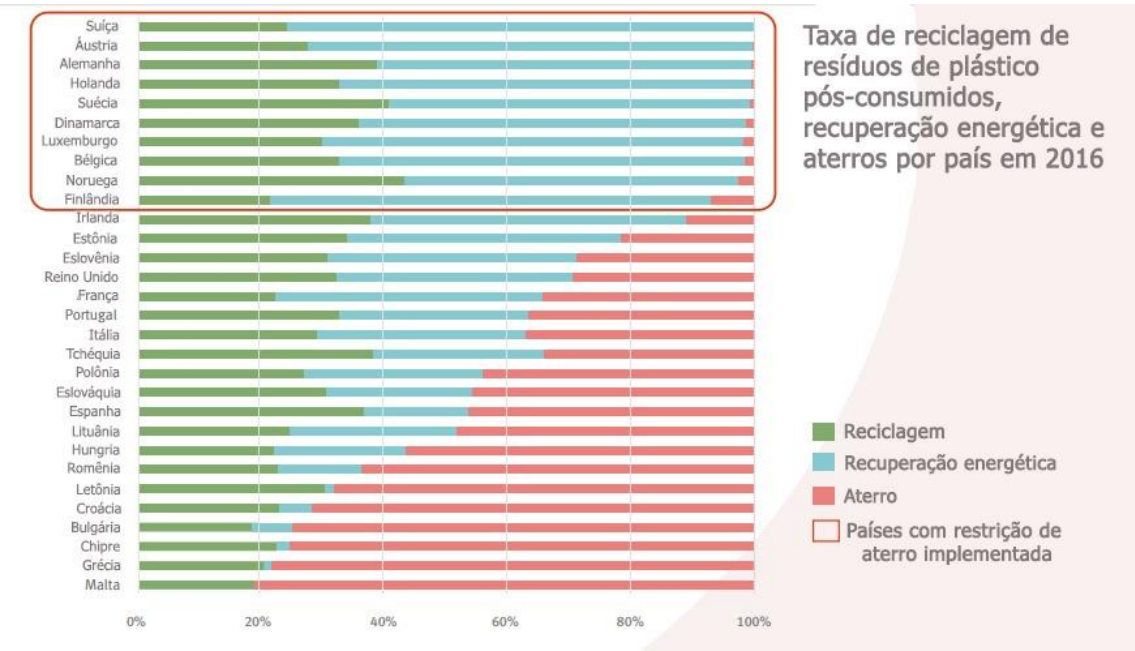


Gráfico 9 – Taxa de recuperação de plástico por país em 2016 (Plastics Europe, 2018).

Já nos EUA, onde não há lei federal para a destinação do *fluff*, a taxa de aterro ainda é expressiva quando comparada com países da União Europeia, como mostrado no Gráfico 10 (Algix, 2013).

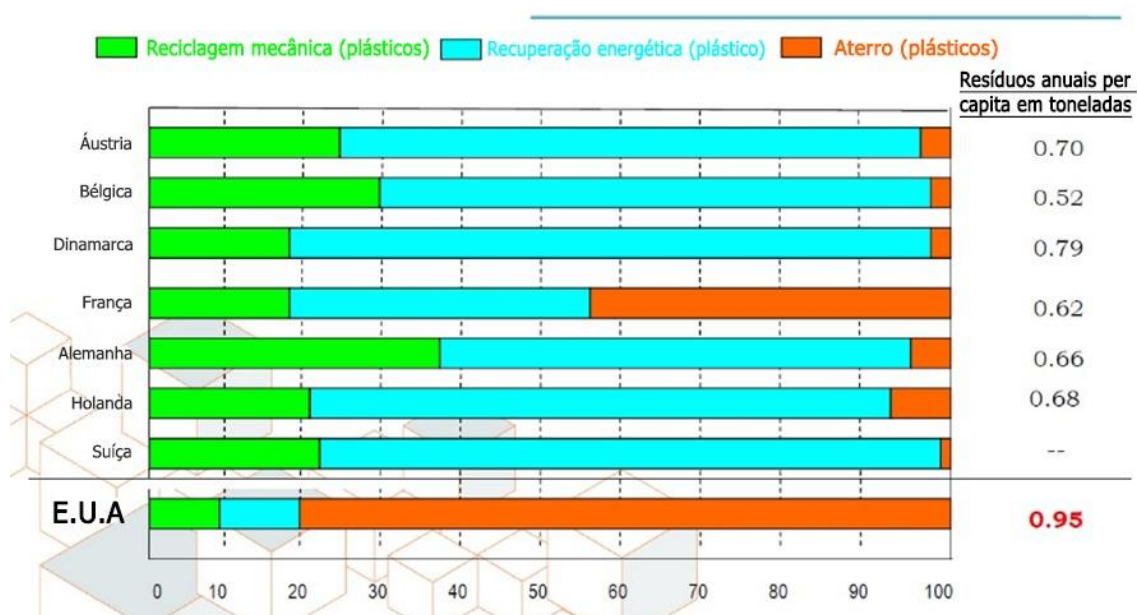


Gráfico 10 – Taxa de recuperação de plástico em alguns países (Algix, 2013).

Outro fator de impacto se refere ao custo de aterros nos países da União Europeia. O Gráfico 11 mostra a precificação da destinação para aterro (destinação + imposto) dos países europeus. No geral, maiores custos de aterro desestimulam esta opção para a destinação dos resíduos.

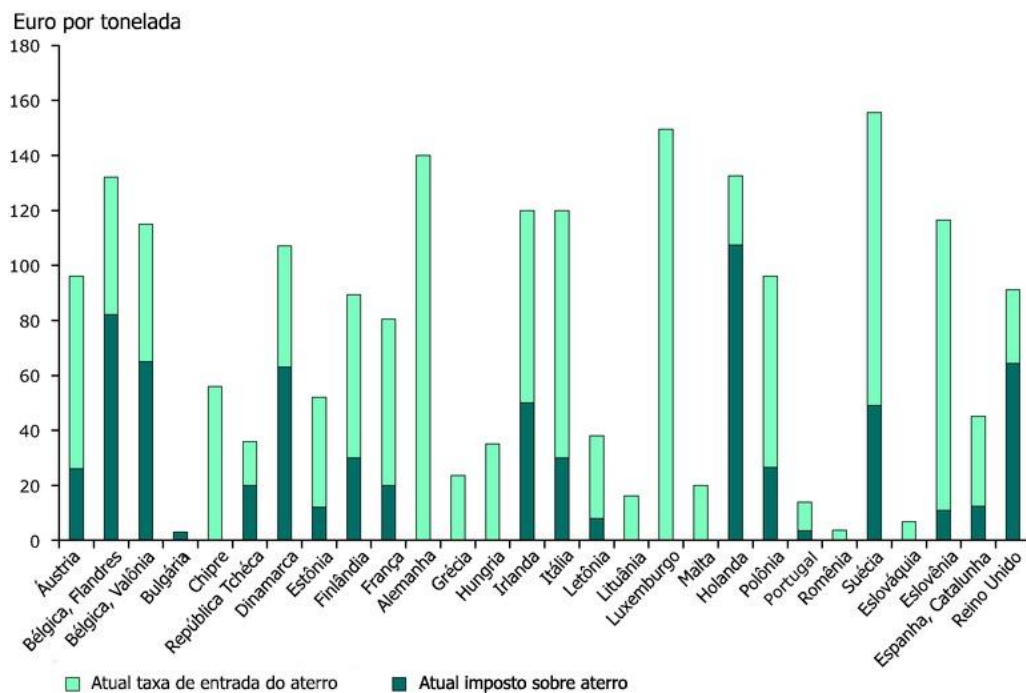


Gráfico 11 – Custo de aterro em diferentes países da União Europeia (EEA, 2013).

3.3.3 Composição do *fluff*

O *fluff* é uma complexa mistura heterogênea de difícil separação e manuseio. Em sua composição, encontram-se materiais incompatíveis como plásticos, espuma, madeira, borracha, tecidos, fibras, metais, vidro, terra, umidade, fluidos automotivos, entre outros. Ele é classificado segundo a NBR 10.004 como classe II A – Resíduo não Inerte. Sabe-se que estão presentes ainda metais pesados, PCBs (*polychlorinated biphenyls*) e retardantes de chama (Jody et al., 2006). De fato, segundo estudo do Departamento de Energia dos Estados Unidos, a quantidade de cada material no *fluff* não é constante e varia em uma faixa ampla, com pode ser visto na Tabela 2 dois exemplos de amostras de *fluff* de fontes distintas indicando características diferentes.

Tabela 2 – Caracterização de diferentes amostras de *fluff* (Jody et al., 2006).

Materiais	Percentual em peso do resíduo de <i>shredder</i> 1	Percentual em peso do resíduo de <i>shredder</i> 2
Finos (< 6,35 mm)	24	60
Polímeros	36	14
Polímeros leves (espuma de poliuretano)	5	1
Grandes pesados (metais, pedras)	8	2
Leves rejeitados	6	2
Fração rica em Metais ferrosos	1	1
Fração rica em Metais não ferrosos	4	5
Perdas (mistura, terra, partículas)	16	15

O *fluff* pode ter diferenças significativas em sua composição, dependendo dos seguintes fatores:

- Tipo de sucata processada: define quais materiais estarão presentes no *fluff*, assim como suas quantidades e tamanhos.
- Especificações do equipamento: o tamanho do *output* do *shredder* determinará a distribuição de tamanho do *fluff*.
- Processos pós-*shredder*: definem quais correntes serão geradas e suas composições.

Dentre os três fatores citados, os mais importantes são o tipo de sucata e os processos pós-*shredder*, estando a composição do *fluff* nas seguintes categorias:

- Orgânicos: plástico, borracha, espuma, madeira, tecido.
- Inorgânicos: pedra, vidro, terra.
- Metais não ferrosos: cobre, alumínio, latão e suas ligas, entre outros.

Exemplos de composição elementar de diferentes amostras de *fluff* estão dispostos na [Tabela 3](#), que demonstra a presença predominante de elementos comuns aos polímeros (C, H e O), além de teores consideráveis de ferro, silício e cloro em algumas amostras.

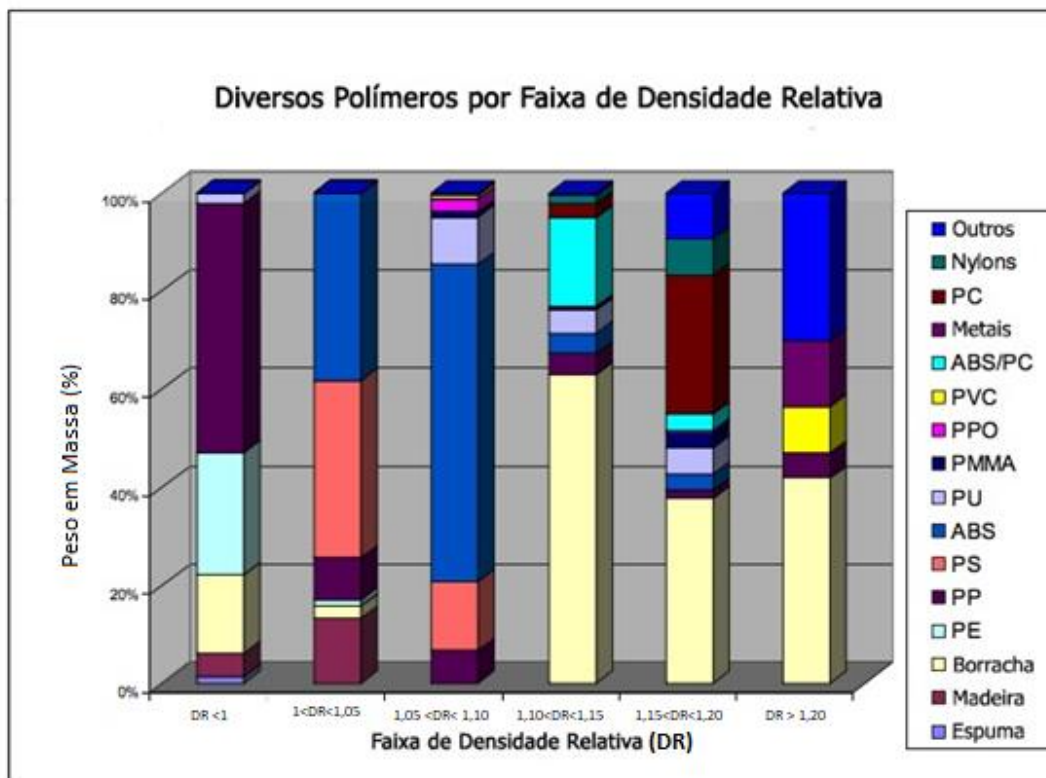
Tabela 3 – Composição elementar de diferentes amostras de *fluff* (Jody et al., 2006).

% em massa	Keller (2003)	Trouve et al. (1998)	Rausa e Pollesel (1997)	Patierno et al. (1998)	Kondoh et al. (2001)	Roy e Chaala (2001)	Mirabile et al. (2002)	Das et al. (1995)	Mark e Fisher (1999)	Saxena et al. (1995)
C	43,67	50,8	56,6	17,5	60,2	32,8-45,1	44,5	30	-	39,7
H	5	6,5	7,9	2,1	6,6	4,1-6,1	5,3	3,7	-	4,6
N	0,9	3	2,7	0,5	1,7	0,6-3,1	4,5	1,7	-	0,92
O	-	-	21,4	17,4	7,8	-	6,9	7	-	11,8
S	0,6	0,3	0,2	0,25	-	0,2-1,0	0,2	0,3	-	0,25
Cl	1,8	3,7	-	0,05	2,5	0,1-3,4	0,5	1,4	1,25	-
Al	2	-	-	-	-	0,74-10	-	-	1,85	-
Ba	0,58	0,5	-	-	-	-	-	-	-	0,0012
Ca	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cu	1,1	1,6	-	-	-	0,5-7,1	1,2	-	1,48	-
Fe	14,1	-	-	-	-	0,9-15	25,7	13	13,65	-
K	0,27	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mg	0,87	-	-	-	-	-	-	-	0,5	-
Mn	0,1	-	-	-	-	-	-	-	0,11	-
Na	0,71	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P	-	-	-	-	-	-	0,7	-	-	-
Pb	0,51	0,14	-	-	-	0,2-0,6	0,2	-	0,5	0,01
Si	7,7	-	-	-	-	2,1	9,5	-	-	-
Ti	-	-	-	-	-	-	0,9	-	-	-
Zn	0,9	1,2	-	-	-	0,8-6,1	1,9	-	-	-

3.4 Métodos de reaproveitamento do *fluff*

3.4.1 Reaproveitamento do *fluff* por separação física

A separação dos componentes do *fluff* é especialmente dificultada pela sobreposição de suas propriedades. O [Gráfico 12](#), por exemplo, mostra a relação entre a densidade e a composição dos diferentes polímeros presentes no *fluff* (Jody et al., 2006). Esta característica dificulta a separação entre materiais, que não pode ser feita em uma única etapa; em vez disso, faz-se necessária a obtenção de uma fração pré-concentrada, seguida de outras etapas de separação, o que reflete no custo da operação.



[Gráfico 12](#) – Distribuição de densidade dos componentes poliméricos presentes no *fluff* (Jody et al., 2006).

Processos de separação mecânica de *fluff* foram desenvolvidos no Laboratório Nacional Argonne (Estados Unidos), em escala piloto. Uma de suas plantas piloto mostrada na [Figura 10](#) visa à obtenção de correntes concentradas de materiais, como polímeros e metais (Jody et al., 2006). Os principais processos envolvidos são trituração, peneiramento, separação por imantação e *eddy current*, e finalmente granulação para remoção de espuma,

terra e outros materiais leves. A planta tem capacidade de processar 2 t/h de *fluff* e atinge recuperação acima de 90% de polímeros e metais ferrosos, além de não ferrosos residuais maiores que 6 mm.



Figura 10 – Operações da planta piloto de separação mecânica Argonne (Jody et al., 2006).

A empresa Belga Salyp NV, utilizando alguns equipamentos desenvolvidos pela Argonne e outros como um separador por cor, construiu uma planta de processamento de resíduo de *shredder* baseada em uma separação mecânica prévia, produzindo um concentrado de polímeros, seguido de separação termoplástica e separação de espuma de poliuretano (PU). De maneira resumida, possui 8 etapas de separação básicas para concentração dos polímeros: (1) O resíduo de *shredder* é direcionado a um tambor de 2 estágios que remove os finos ($< 1/4''$), no segundo os materiais finos e planares são removidos através de frestas, basicamente borracha, alguns metais, pequenas espumas e pedaços de fibra; (2) Os materiais maiores saem do tambor sendo espumas flexíveis de poliuretano, panos fibras, alguns plásticos e metais; (3) O material de maior dimensão é passado em um polia magnética que remove metálicos ferrosos e, em seguida, em um *eddy current* ou extrator magnético que remove os metais não ferrosos; (4) A espuma é removida

através de um equipamento desenvolvido no Central Manufacturing in Peoria, Illinois (McLemore, 2006); (5) A fração que passou no segundo estágio do tambor é novamente passada em uma polia magnética e em um *eddy current*; (6) A matéria rica em polímero “desmetalizada” é granulada em partículas 5/8” e processada em uma peneira vibratória para remoção de finos e em um classificador a ar para remoção da espuma remanescente, sujeiras e outros materiais leves; (7) A madeira é removida do material granulado utilizando-se um separador ótico; e (8) O material é então lavado e no processo, alguns dos metais pesados, residual metálico e vidros são removidos.

A complexidade da planta, que operou por cerca de 1 ano, ocasionou problemas operacionais e baixo rendimento de concentrado de plásticos. A separação termoplástica é baseada no aquecimento do concentrado de polímeros por radiação infravermelha, a qual é alimentada em tambores. À medida que alguns plásticos amolecem, estes se aderem ao tambor e ficam retidos, enquanto os demais seguem para o próximo estágio de aquecimento. Dessa forma, os plásticos são, teoricamente, separados da mistura. Porém, a aplicação em misturas recuperadas de resíduo de *shredder* apresentou baixa pureza devido ao número excessivo de polímeros diferentes e à sobreposição de suas propriedades (Jody et al., 2006).

O processo WESA-SLF, ilustrado na [Figura 11](#), inicia pela trituração do resíduo de *shredder* gerando frações de finos ($< 1,2$ mm), intermediário ($1,2 \text{ mm} < X < 7$ mm) e grandes (> 7 mm), sendo realizada em 2 estágios para redução de custo com energia. O material grande é cominuído para < 20 mm e um imã usado para recuperação dos metálicos ferrosos, o material remanescente é então reduzido à fração < 7 mm, misturado a fração intermediária, feita a secagem do material para menos de 2% de umidade, garantindo que esteja desagregado para a classificação a ar (remoção de espuma e outros materiais leves) e subsequente peneiramento em 3 frações, que são alimentadas em classificadores zig-zag a ar, resultando nas correntes de cobre, minerais + metais e orgânicos (Sattler & Laage, 2000).

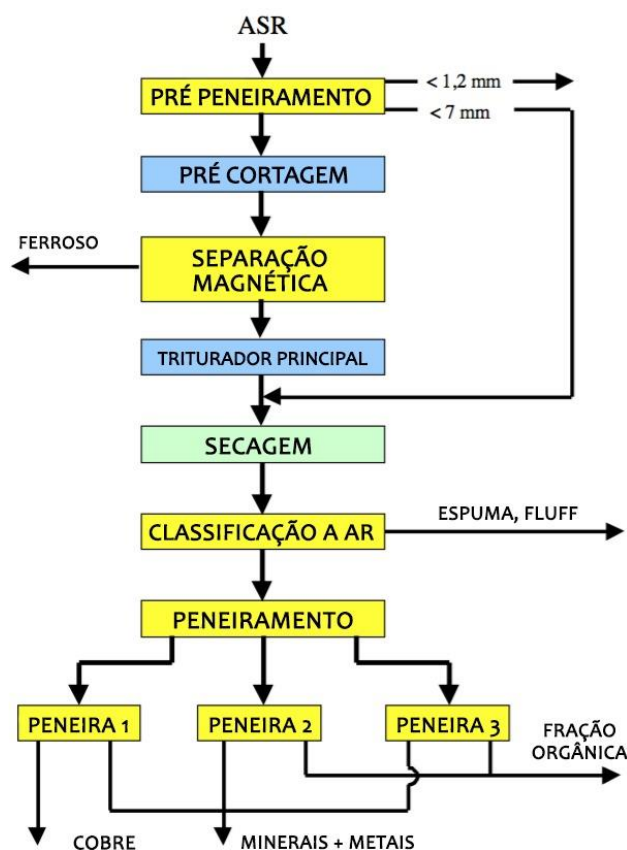


Figura 11 – Processo WESA-SLF (Sattler & Laage, 2000).

A tecnologia de compactação e solidificação desenvolvida no Japão é ilustrada na Figura 12. A primeira parte do processo (do item 1 ao 8 na figura), responsável pela separação dos materiais, utiliza diversos métodos de seleção: trituração para materiais grosseiros, imantação e separação dos metais ferrosos e não ferrosos via *eddy current* e, por fim, classificação por peneiramento e a ar. A segunda parte (do item 9 ao 13) utiliza cal para compactar o material leve, o qual é solidificado por extrusão em pastilhas para posterior gaseificação (Kusaka & Lida, 2000).

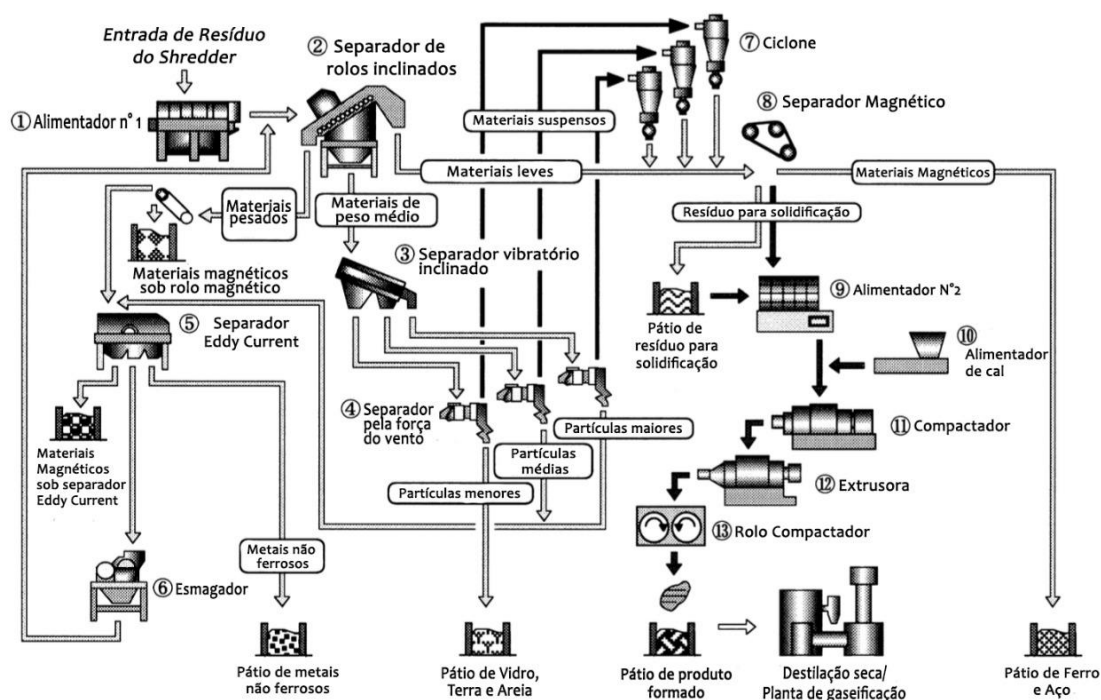


Figura 12 – Tecnologia de compactação e solidificação (Kusaka & Lida, 2000).

O processo Witten, desenvolvido na Universidade de Witten, Alemanha, para a separação da fração orgânica, compartilha de operações similares ao processo Argonne e Salyp NV. Nele, metais ferrosos são primeiramente removidos por imantação, seguido de trituração e peneiramento para remoção de finos, classificação a ar para separação de materiais fibrosos, os quais são triturados em moinho de facas. Como no processo Sortec, projetado para processar 40.000 t/ano, foi desenvolvido para a recuperação de metais e da fração orgânica, envolvendo em sequência os processos de peneiramento, redução de tamanho, separação magnética, cominuição em moinho de facas, secagem e um peneiramento final (Jody et al., 2006).

O processo Nimco envolve inicialmente uma separação por tamanhos, seguida da recuperação de ferrosos e não ferrosos da fração fina e separação por peso das frações mediana e grossa. Por último, recuperam-se ferrosos e não ferrosos das frações pesadas (Baker et al., 1995).

De uma maneira geral, observa-se que métodos de separação por gravidade são comuns em plantas de processamento de *fluff*. Porém, devido à sobreposição das propriedades de seus componentes, consequência de sua heterogeneidade física e química,

tem-se comumente a separação em diferentes frações, como metálicos, polímeros, não metálicos, terra, vidro, etc. O subsequente refinamento de cada fração pode ser necessário a depender da aplicação. Por exemplo, frações concentradas em polímeros podem ser separadas em frações mais ricas em um determinado componente baseado em diferença de densidade.

Com objetivo de investigar um método de baixo custo para separação do *fluff* em três principais componentes: orgânicos, inorgânicos e metálicos, recentemente Gent et al. (2015) propuseram um processo de separação aplicado a uma fração fina (0,63 a 2 mm) de *fluff* utilizando métodos baseados em diferenças de densidade dos materiais e fragmentação diferencial (série de mesas vibratórias *Wilfley*), conforme ilustrado na Figura 13. O sistema de mesa vibratória *Wilfley* tem uma característica peculiar podendo gerar simultaneamente sete produtos de diferentes densidades. Enquanto os materiais retidos de maior densidade são direcionados a separação posterior, os passantes menos densos retornam a mesa anterior em um circuito fechado.

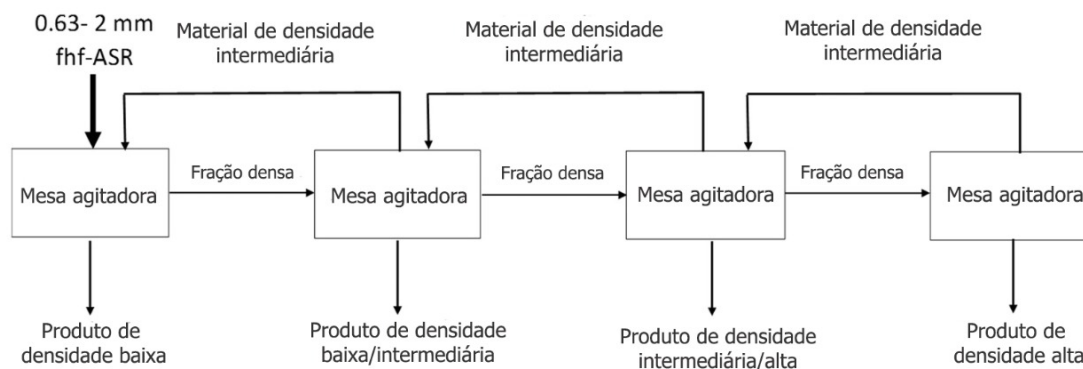


Figura 13 – Diagrama esquemático de separação por densidade aplicada à fração fina do *fluff* (Gent et al., 2015).

Foi realizada também uma compilação das propriedades físicas dos materiais presentes no *fluff*, conforme Tabela 4 analisando a viabilidade de separação baseada em sua densidade e resistência à fratura.

Tabela 4 – Dados utilizados na elaboração do sistema de separação por densidade (Gent et al., 2015).

Material	Densidade (g/cc)	Modulo de Elasticidade (GPa)	Módulo de Cisalhamento (GPa)	Resistência a Fratura (Mpa m½)	Izod Dureza por Impacto (J/m)	Temperatura de Vitrificação (°C)	Temperatura de Fusão (°C)
Acrlonitrila-Butadieno-Estireno (ABS)	1.01–1.21	1.1–2.9	0.7–1.05	1.19–4.30	411	104–110	233
Acrlonitrila Estireno Acrilato (ASA)	1.04–1.08	1.8–2.6	0.7–0.9	n.a.	160–270	n.a.	n.a.
Poliéter clorado (CPE)	1.4	1.1	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Monômero de etileno-propileno-dieno (EPDM)	0.9–2	0.003–0.007	0.001	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Etileno Propileno (EPR)	0.855–0.88	0.02	0.001	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Polietileno de alta densidade (HDPE)	0.94–0.97	0.6–1.4	0.7–0.85	1.44–1.72	4.01	110	108
Polietileno de baixa densidade (PEBD)	0.91–0.93	0.11–0.45	0.1–0.35	1.44–1.72	1.068	110 to 125	125
Polietileno linear de baixa densidade (PEBDL)	0.91–0.94	0.25–0.70	0	1.44–1.72	n.a.	125	122
Poliamidas (PA)	1.12–1.15	1.7–3.2	1.1–1.2	2.22–5.62	37–64	47–78	223–260
Poliarilato (PAR)	1.21	2.0	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Polibutileno (PB)	0.90–0.92	0.21–0.30	n.a.	n.a.	n.a.	190	
Tereftalato de polibutileno (PBT)	1.34	2.6–2.7	0.9	n.a.	80	60	225
Policarbonato (PC)	1.14–1.21	2.0–2.44	0.7–0.97	2.1–4.6	600–850	145–150	150
Cetona de éter de poliéter (PEEK)	1.27–1.32	3.5–4.2	n.a.	2.73–4.30	85	143	334
Polieterimida (PEI)	1.27	3.0	n.a.	n.a.	53	217	360–399
Tereftalato de polietileno (PET)	1.29–1.40	2–4.2	0.75–2.0	4.5–5.5	37	n.a.	210
Poliimida (PI)	1.42	2.5–3.1	n.a.	n.a.	7.9–43	250–260	388
Metacrilato de polimetil (PMMA)	1.16–1.22	1.8–3.8	1.7	1.71–4.2	16–32	85–105	223–271
Polioximetileno (POM)	1.39–1.43	2.5–5	0.9–0.93	n.a.	53–122	75	166
Polipropileno (PP)	0.90–0.91	0.08–2.0	0.3–0.5	3–4.5	21–66.8	10 to 20	160–165
Poli (óxido de p-fenileno) ou Poli (éter de pfenileno) (PPE / PPO)	1.34	12–16	n.a.	n.a.	27	n.a.	300–310
Sulfeto de polifenileno (PPS)	1.34	12–16	n.a.	n.a.	27	n.a.	300–310
Poliestireno (PS)	1.04–1.05	2.28–3.34	0.73–1.05	0.7–1.1	18–24	80–95	n.a.
Polissulfonas (PSO)	1.24	2.5	0.04–0.62	n.a.	107	185	190
Politetrafluoretileno (PTFE)	2.14–2.20	0.40–0.75	0.11–0.35	1.32–1.8	159–187	115	n.a.
Poliuretano (PU)	1.02–1.07	4	0.1–0.2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Cloreto de polivinil (PVC)	1.19–1.58	2.14–4.14	1	1.46–5.12	5.3	50–80	165–183
Acrlonitrila Estireno (SAN)	1.04–1.08	3.5–3.8	1.38	n.a.	16–27	97	260
Anidrido maleico de estireno (SMA)	1.05–1.17	2.35–2.69	n.a.	n.a.	n.a.	127	327
Poliuretano Termoplástico (TPU)	1.12–1.25	1.31–2.07	0.006–0.23	1.84–4.97	n.a.	n.a.	n.a.
Fibras naturais (madeira, algodão e papel)	0.6–0.8	9–13	0.8	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Cerâmica	3.9	390	125	0.9–4.5	n.a.	n.a.	
Concreto	2.0–2.4	23–48	10–20	0.2–1.4	n.a.	n.a.	
Vidro (soda-cal)	2.4–2.7	61–74	26.2–31.2	0.7–0.8	n.a.	520–600	1425–1600
Pedra	2.5–2.7	10–70	26	1.5–2.4	n.a.	n.a.	950–1400
Ligas de alumínio	2.64–2.84	62.05–77.91	25.5–27	22–35	n.a.	n.a.	660
Bismuto	9.75	31.72	12	n.a.	n.a.	271	
Ligas de cobre	8.3–8.96	97.5–135	36–50	30–90	n.a.	n.a.	1083
Ferro	7.87	130–210	76	22–54	n.a.	n.a.	1539
Ligas de chumbo	11.1–11.35	13.79–16	5.5–8	5–15	n.a.	n.a.	327
Magnésio	1.74	41.37–45	17	12–18	n.a.	n.a.	650
Ligas de níquel / em aço inoxidável	8.44–8.80	43–180	65	62–280	41–136	n.a.	n.a.
Estanho (Sn)	7.287–7.31	41.37–50	17–18	n.a.	n.a.	n.a.	232
Tungstênio (W)	19.3	344.7–410	140	5.4–7.4	n.a.	n.a.	3422
Aço austenítico	7.8–8.44	130–234	70–81	62–280	n.a.	n.a.	800–1125
Fios (PVC / cobre)	5.53–7.32	97.5–135(Cu)	n.a.	n.a.	n.a.	50–80	70(PVC)
Ligas de zinco	6.77.14	11–13	70–77	10–100	107–218	n.a.	715–720

* Temperatura de vitrificação é aquela cujo material passa do estado sólido para borrachoso.

O material analisado foi o “fhf-ASR” (*fine, heavy fluff automobile shredder residue*) gerado em uma planta de processamento de resíduo de *shredder* localizada na Espanha (vide Figura 14). Os testes de separação por densidade foram realizados em diferentes faixas granulométricas. Concluiu-se que, para a faixa de baixa granulometria, é

possível separar 80% dos metais e 90% dos minerais, enquanto para a fração de maior tamanho foi possível separar correntes concentradas de metais, areia e compostos orgânicos, sendo esta última composta principalmente por plásticos (Gent et al., 2015).

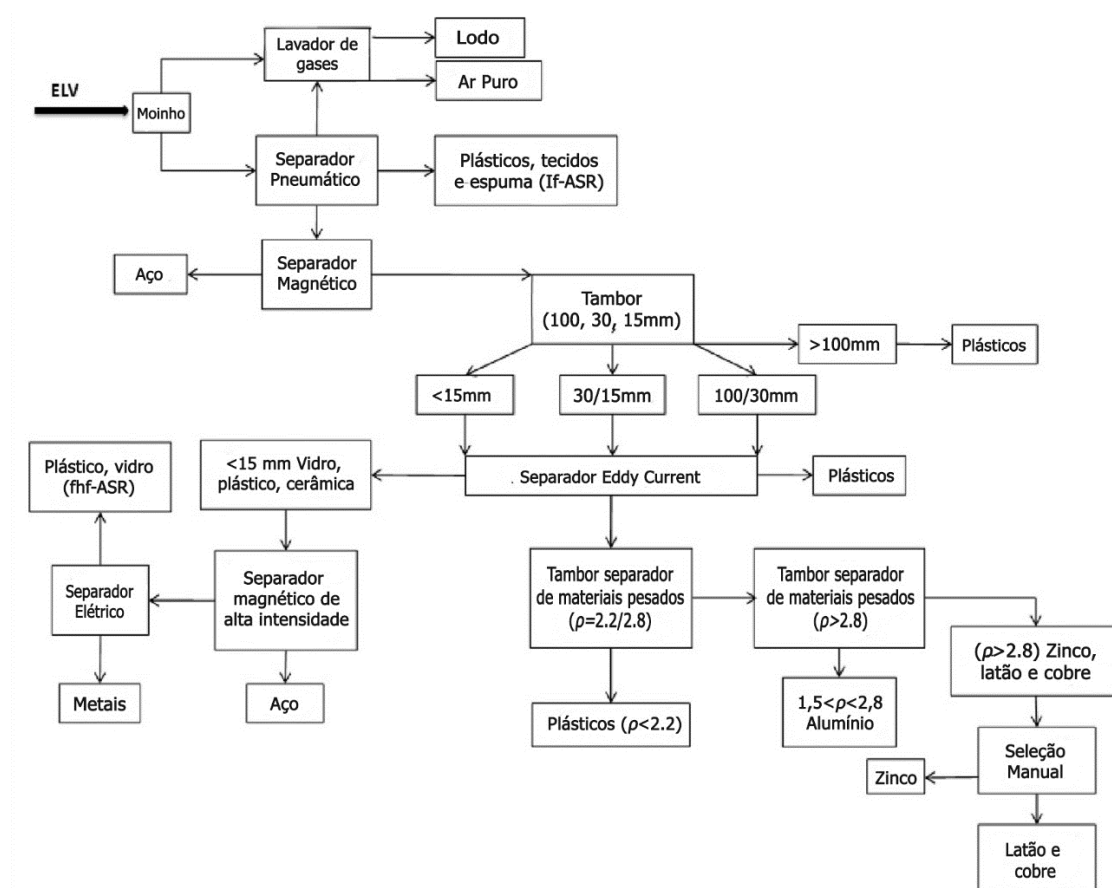


Figura 14 – Fluxograma de processamento de ASR na Espanha (Gent et al., 2015).

Outro método aplicado na separação de plásticos é a separação eletrostática, pois a carga eletrostática de cada material depende de suas propriedades elétricas e superficiais, assim como da umidade relativa do ar. Plásticos possuem baixa constante dielétrica, logo são capazes de armazenar cargas superficiais. Como diferentes materiais possuem constantes dielétricas distintas, eles concentram diferentes cargas superficiais quando submetidos a um campo elétrico, permitindo, assim, a separação. Testes conduzidos por empresas como a MBA *Polymers* e Hitachi Zosen mostraram que a separação eletrostática de misturas simples (poucos componentes) de alguns tipos de plásticos apresenta bom

rendimento, porém misturas complexas como o resíduo de *shredder* não são separadas de modo eficiente (Jody et al., 2006).

3.4.2 Reaproveitamento energético do *fluff*

Devido à presença de materiais orgânicos como plásticos, borrachas, espumas, tecidos e madeira, o resíduo de *shredder* apresenta elevado poder calorífico. Embora outros componentes como terra e umidade atuem diminuindo tal propriedade, o resíduo de *shredder* pode ainda, em geral, ser queimado sem a necessidade de adição de combustíveis suplementares. Quando isento de terra, seu poder calorífico é comparável ao do carvão mineral, sendo superior ao de resíduos sólidos urbanos e do bagaço de cana. A [Tabela 5](#) mostra o poder calorífico inferior (PCI) aproximado de alguns exemplos de materiais combustíveis.

Tabela 5 – Poder calorífico aproximado de diferentes materiais.

Material	PCI (kJ/kg)	Referência
<i>Fluff</i>	12560-23700	(Jody et al., 2006), (Edo, et al., 2013)
Resíduos sólidos urbanos	7750	(EPE, 2008)
Bagaço de cana	16000	(Oliveira, 2014)
Carvão mineral	12500-26000	(Alfa Laval Aalborg, 2017)

Pode ser visto no [Gráfico 13](#) que, em 2016, a recuperação energética de resíduos plásticos na Europa alcançou 41,6%, além de 31,1% de reciclagem, totalizando 72,7% de recuperação, enquanto a destinação em aterros sanitários representou 27,3%. Há uma mudança no perfil de destinação de resíduos plásticos na Europa na última década, em milhões de toneladas. Entre 2006 e 2016, enquanto a recuperação energética e a reciclagem aumentaram 61% e 64%, respectivamente, a destinação em aterros sanitários, ao contrário, apresentou um decréscimo de 43% (*Plastics Europe*, 2016).

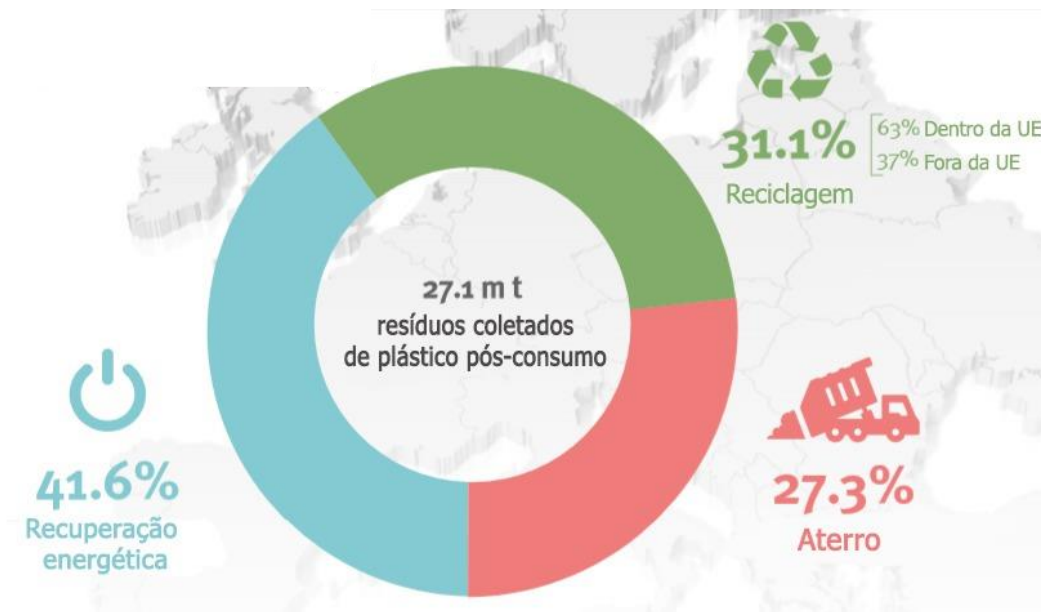


Gráfico 13 – Perfil de tratamento de resíduos plásticos na Europa em 2016 (*Plastics Europe*, 2018).

Ao longo do tempo, alguns incineradores foram construídos por processadores de sucata para o consumo de *fluff*, porém ainda há pontos negativos que impedem a continuidade, como:

- Como no Brasil e em muitos lugares (principalmente nos Estados Unidos) o custo de aterro ainda é inferior ao de incineração (Jody et al., 2006).
- O *fluff* contém quantidades relativamente elevadas de componentes clorados, como PCBs (bifenil policlorado) e PVC (policloreto de vinila), os quais se acreditam serem responsáveis pela liberação de substâncias nocivas quando incinerados, como HCl e outros gases clorados, dioxinas e furanos (Zhang et al., 2015). Tais emissões são associadas à combustão em baixa temperatura, normalmente com o objetivo de recuperação energética. Por isso, combustão à alta temperatura (cerca de 1100°C) são normalmente exigidas por leis governamentais, porém representam maiores custos com construções e operação devido à necessidade de adição de outros combustíveis.
- As cinzas geradas na incineração possuem elevada concentração de contaminantes, principalmente metais, o que pode aumentar seu custo de destinação ou tornar necessária a aplicação de processos para sua recuperação.

Dentre as vantagens da incineração tem-se a considerável redução de massa e volume (podendo chegar a 50% e 75%, respectivamente).

Para a mitigação dos problemas de emissões gasosas, uma possibilidade é realizar a co-incineração do *fluff* com resíduos sólidos urbanos (Keller, 2003). Testes realizados na Suíça desde os anos 1990 mostraram que é possível realizar co-incineração mantendo as emissões abaixo dos limites legais (Jody et al., 2006).

O calor resultante do processo de incineração pode ser utilizado para produção de vapor, o que normalmente ocorre em quantidade superior à necessidade da instalação industrial. Em muitos casos, o vapor produzido é utilizado na geração de energia elétrica para consumo interno e, havendo excedente, esta pode ser vendida para a rede de distribuição caso haja infraestrutura adequada. O estudo realizado pela WSP *Environmental* para a *Waste Management Branch*, Departamento de Meio Ambiente da Austrália (Wood et al., 2013), contém informações de 14 plantas industriais do tipo *waste-to-energy* (resíduo para energia), sendo 12 na Europa, 1 nos Estados Unidos e 1 no Japão. As plantas compreendem, em sua maioria, a produção de energia elétrica a partir da incineração de resíduos sólidos urbanos.

Alguns estudos foram realizados sobre a combustão de *fluff* utilizando leito fluidizado, incluindo o desenvolvimento de uma planta piloto, indicando ser uma alternativa econômica para a destinação de resíduo de *shredder* (Schmitt, 1990). Saxena et al. (1995) realizaram experimentos de combustão em leito fluidizado com alumina e adição de propano como combustível. Mesmo enfrentando alguns problemas relacionados à heterogeneidade do material, relataram que pode ser queimado em um leito fluidizado convencional a 677-866°C com eficiência de 75,2-89,2%, sendo o excesso de ar, a velocidade do ar de fluidização, a temperatura do leito e a taxa de alimentação parâmetros importantes na combustão.

Um vasto estudo técnico e econômico sobre a utilização de *fluff* como combustível encontra-se disponível, abrangendo caracterizações químicas, poder calorífico e sua correlação com quantidade de terra, classificação granulométrica e por tipo de material e análise dos gases de emissão (Wolman et al., 1986). A análise econômica foi realizada para 3 cenários diferentes: geração apenas de eletricidade, geração apenas de vapor e cogeração

de eletricidade e vapor, resultando em um *payback* simples de 4,2 anos para geração de eletricidade e 1,8 anos para geração apenas de vapor e cogeração.

Hwang et al. (2008) realizaram um pré-tratamento capaz de eliminar 78% de cinzas e 91% de cloro do *fluff* utilizado nos testes. O processo consistiu de peneiramento com tamanho de 5,6 mm para remoção de finos e posterior ensaio de separação por densidade a úmido (*sink and float*, em português comumente chamado de “afunda e flutua”), empregando fluidos com densidade conhecida como fluido de densidade 1,1 g/cm³ para remoção de quase toda a borracha contendo cloro e grande parte do PVC.

Mancini et al. (2010) realizaram testes de gaseificação/incineração utilizando uma planta de incineração de pneus adaptada para otimizar a combustão de resíduos de *shredder*. A planta consiste de um forno rotativo inclinado ($T = 850-1120^{\circ}\text{C}$), seguido de uma câmara de pós-combustão com injeção de metano e seguida de um trocador de calor para produção de vapor, como mostrado na [Figura 15](#), sendo alimentada por *fluff* conforme mostrado na [Figura 16](#). A relação estequiométrica de oxigênio utilizada no início do forno rotativo foi mantida baixa (< 1) para priorizar a gaseificação do sólido, enquanto a segunda câmara foi responsável por completar a reação de combustão. Análises químicas dos resíduos antes e após a combustão, incluindo análise dos gases emitidos, resultaram em parâmetros de emissão abaixo dos limites legais estabelecidos pela Diretiva 2000/76/EC do Parlamento e do Conselho de 4/12/2000 alterado dia 21/11/2008 relativo a incineração de resíduos, conforme limites da [Tabela 6](#), essa diretiva teve participação de diferentes comitês e teve como premissa outras diretivas importantes como, por exemplo, a diretiva 89/369/CEE relativa a prevenção e redução de poluição atmosférica provenientes de instalações de incineração de resíduos urbanos.

Tabela 6 – Valores legais estabelecidos de emissão para a atmosfera – valores médios diários (Parlamento europeu e o conselho da união europeia, 2008)

Poeiras totais	10 mg/m ³
Substâncias orgânicas em forma gasosa e de vapor, expressas como carbono orgânico total	10 mg/m ³
Cloreto de hidrogénio (HCl)	10 mg/m ³
Fluoreto de hidrogénio (HF)	1 mg/m ³
Dióxido de enxofre (SO ₂)	50 mg/m ³
Monóxido de azoto (NO) e dióxido de azoto (NO ₂), expressos como dióxido de azoto relativamente a instalações de incineração existentes de capacidade nominal superior a 6 toneladas por hora ou a instalações de incineração novas	200 mg/m ³ (*)
Monóxido de azoto (NO) e dióxido de azoto (NO ₂), expressos como dióxido de azoto relativamente a instalações de incineração existentes de capacidade nominal igual ou inferior a 6 toneladas por hora	400 mg/m ³ (*)

(*) Até 1 de Janeiro de 2007 e sem prejuízo da legislação comunitária pertinente, o valor-limite de emissão para o NO_x não se aplica a instalações que apenas incinerem resíduos perigosos.

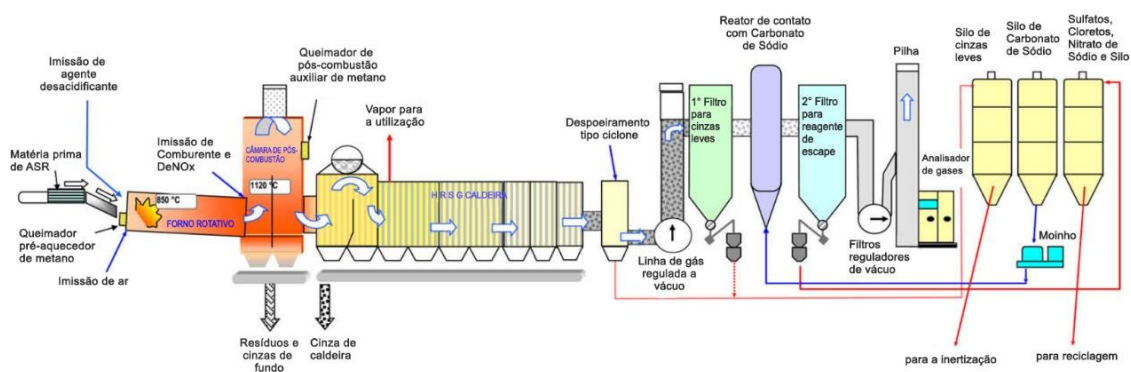


Figura 15 – Processo da planta de incineração de pneus adaptada para *fluff* (Mancini et al., 2010).



Figura 16 – Estoque de *fluff* utilizado nos testes (Mancini et al., 2010).

Edo et al. (2013) realizaram testes em uma amostra de *fluff* coletada em uma planta de processamento de carros na Itália, comparando as propriedades químicas de três frações geradas por classificação por tamanho: inferior à 20 mm, entre 20 e 100 mm, e superior a 100 mm. As análises tiveram como objetivo avaliar a viabilidade de recuperação energética das frações, comparando com o material original, no que tange aos contaminantes liberados no processo de combustão. As análises revelaram que a fração fina apresentou baixo poder calorífico (15.000 kJ/kg) e elevada emissão de dioxinas e furanos (800 pg i-TEQ/g), sendo assim inadequada para recuperação energética. A fração grosseira (maior que 100 mm), por sua vez, apresentou alto poder calorífico (23.700 kJ/kg) e baixa emissão de dioxinas e furanos (300 pg i-TEQ/g), sendo a mais adequada para tal fim.

3.4.3 Reaproveitamento energético do *fluff* em siderurgia

No Brasil, entre 30-40% dos custos da produção de aço reside no uso do carvão mineral em usinas integradas, cujo desafio é definir uma mistura que produza o coque a baixo custo e elevada qualidade. Um complicador para produção de aço na América do Sul é a necessidade de importar praticamente todo carvão metalúrgico, estando distante dos maiores exportadores: Austrália, Indonésia e Rússia que respondem por quase 70% da exportação mundial (Magazine Pro on Genesis Framework, 2020). O [Gráfico 14](#) mostra a evolução da produção de carvão ao longo dos anos por região do mundo. Como os fornos (alto-forno, forno elétrico, forno de coque e convertedores) das usinas siderúrgicas são grandes reatores que produzem em alta escala, estes constituem equipamentos potenciais para reaproveitamento e destinação de resíduos, cada um com sua característica específica. Além do que, as altas temperaturas envolvidas ($T > 1100^{\circ}\text{C}$) podem contribuir para a decomposição térmica dos componentes clorados, dioxinas e furanos ora presentes (Zhang et al., 2015).

Carvão: Produção por região
Milhão de toneladas de óleo equivalente

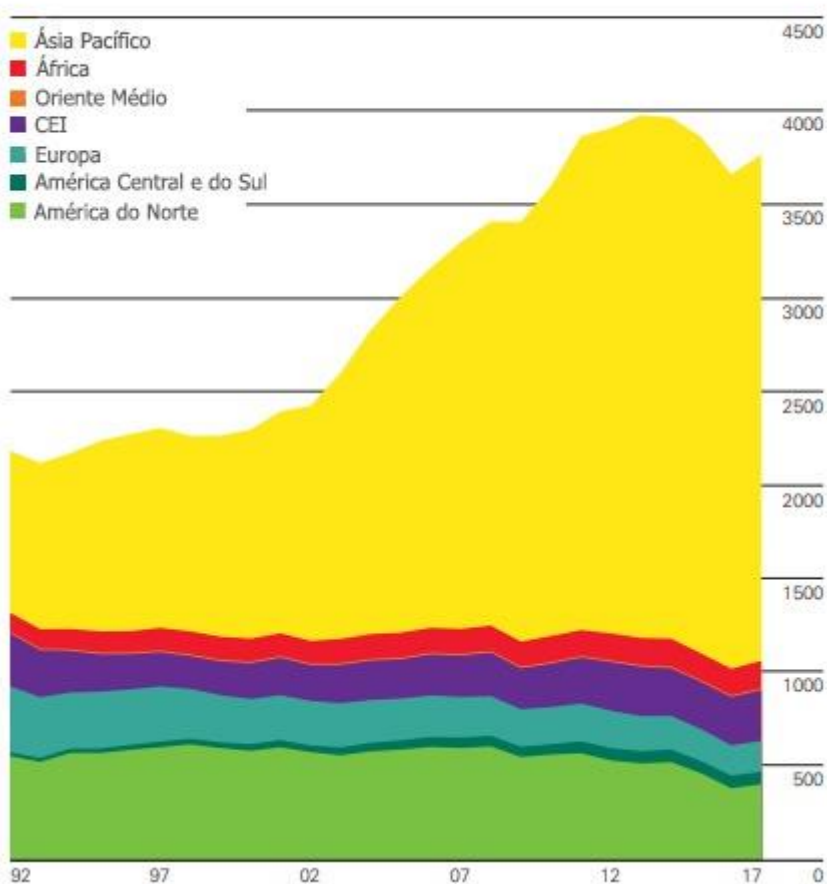


Gráfico 14 – Evolução da produção de carvão por região (BP *Statistical Review of World Energy*, 2018).

Desde 2000, a Nippon Steel reutiliza resíduos plásticos como fonte de matéria-prima para coqueria, direcionando a atenção aos fornos de coque, que são fornos de carbonização que possuem a função de decomposição térmica (Goto et al., 2002). O plástico é composto de carbono e hidrogênio, e o carvão é composto basicamente dos mesmos elementos, que são usados em grandes quantidades nas siderúrgicas. O reaproveitamento energético dos resíduos plásticos no Japão possui uma forte política pública para coleta e preparação para consumo nas siderurgias. Após um pré-tratamento, os polímeros são briquetados alcançando tamanho e forma definida. Eles abastecem a câmara de coqueificação junto ao carvão, são aquecidos indiretamente através das paredes laterais e protegidos da entrada de ar, conforme [Figura 17](#).

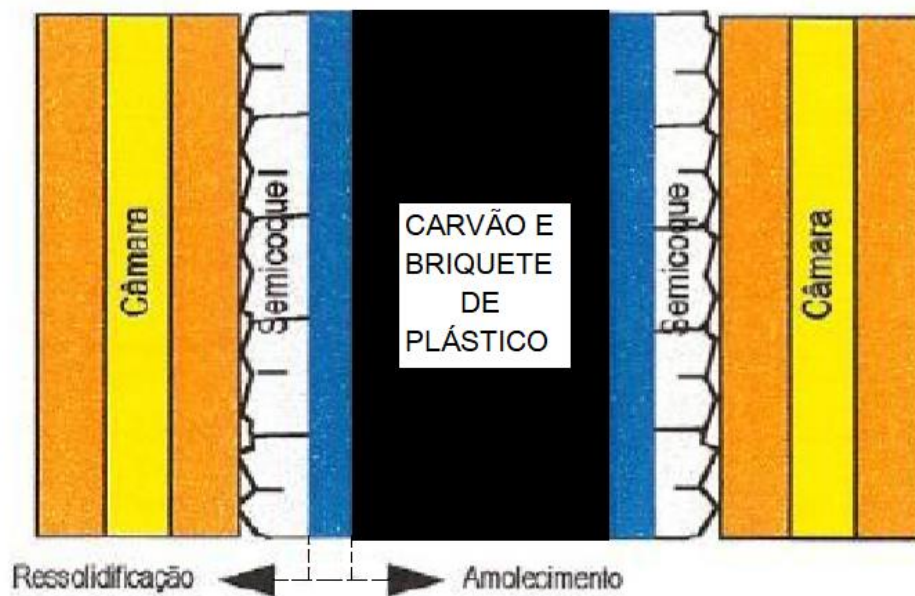


Figura 17 – Esquema de acomodação da mistura na uma câmara de coqueificação (Casagrande, 2010).

O plástico é termicamente decomposto entre 1100-1200°C em atmosfera inerte rica em CH_4 sem queima para produzir hidrogênio e hidrocarbonetos, por isso a avaliação do poder calorífico não é relevante para se avaliar o potencial de coqueificação (Nomura, 2015). Os produtos da decomposição formam gases a alta temperatura ($T \approx 900^\circ\text{C}$) que são recuperados pelo topo da câmara de coqueificação, resfriados rapidamente a 80°C ou abaixo, os gases condensados também são recuperados na forma de alcatrão. O plástico gera 40% de óleo, 40% de gás e 20% de coque, enquanto o carvão gera 5% de óleo, 10% de gás e 75% de coque. Essa diferença é devido à menor proporção de cadeias aromáticas dos hidrocarbonetos presentes no plástico (Goto et al., 2002).

O maior ponto de preocupação no reaproveitamento energético de resíduos plásticos no viés da saúde e meio ambiente é a emissão de gases clorados, tóxicos a saúde humana, vegetal e animal. Entretanto, a presença do licor de amônia na lavagem dos gases quentes no processo de coqueria chega a absorver 92% da massa de cloro, advinda desse material, indicando que não seriam necessários investimentos adicionais para prevenção desses gases (Nomura, 2015).

Face à carência por insumos carbonáceos na siderurgia brasileira e o trabalho promissor difundido há quase 20 anos no Japão, resíduos contendo plástico, como é o caso do *fluff*, se apresentam como uma alternativa interessante a ser estudada. A empresa patrocinadora da presente pesquisa é geradora de *fluff* e possui 2 plantas de produção de coque em escala industrial e uma planta piloto, um fator preponderante para seguir essa linha de estudo. Além da disponibilidade de equipamentos para teste, os componentes do *fluff* são fortemente descaracterizados devido à trituração, além do contato com terra e umidade, o que inviabiliza a estratégia de tratamento baseada em separações físicas a custo competitivo, já que a fonte polimérica se encontra pré-processada. Foram convidadas empresas especializadas em reciclagem de polímeros para avaliar o *fluff* que, por *compliance* não podem ser citadas, e por unanimidade a recuperação e destinação exclusiva por separação física foi inviabilizada pelos custos envolvidos.

Portanto, face ao exposto, o reaproveitamento energético do *fluff* se mostra a estratégia mais adequada em aplicações siderúrgicas, sendo esta opção adotada na presente pesquisa.

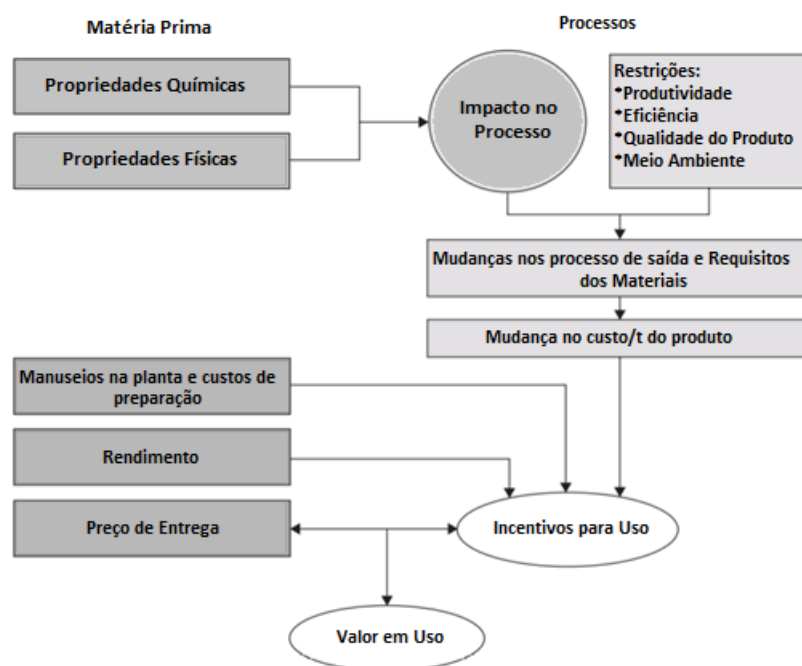
3.4.4 Valor em uso do coque

Para aplicação de um carvão à uma mistura, são realizadas inúmeras análises e caracterizações para avaliar seu poder de coqueificação e suas principais características (Leite, 2015). Poucos carvões metalúrgicos atingem todas as propriedades requeridas de um coque para alto forno, logo empregar misturas de carvões na fabricação do coque metalúrgico é uma prática seguida pelos seguintes motivos:

1. A combinação de diferentes carvões pode alcançar as propriedades desejadas;
2. Pode remover irregularidades na qualidade do coque;
3. Reduz a dependência de um fornecedor de coque específico;
4. Possibilita utilizar carvões não coqueificáveis de baixo custo.

Uma vez que a qualidade do coque é influenciada pelas propriedades dos carvões-mãe, essas propriedades tornam-se fatores de seleção ao escolher carvões para incluir em uma mistura de coque (Goldsworthy et al., 2013).

O valor em uso pode ser considerado o preço máximo que uma empresa está disposta a pagar por um material de substituição sem prejudicar os resultados econômicos (Moura, 2017). Na [Figura 18](#) há um fluxograma para definição do valor em uso e na [Tabela 7](#) as propriedades típicas aceitáveis para o coque segundo o *Coal Handbook*.



[Figura 18](#) – Elementos chave para determinação do valor em uso. Adaptado de Goldsworthy et al. (2013).

[Tabela 7](#) – Propriedades aceitáveis do coque. Adaptado de Goldsworthy et al. (2013).

	INTERVALO EUROPEU	AUSTRALIA BHP PORT KEMBLA
FÍSICA		
<i>DI</i> ₁₅ ¹⁵⁰ (%)		84,3
CSR (%)	> 60	73,3
CRI (%)	20 - 30	18,2
QUÍMICA		
CINZAS (% MASSA SECA)	8 - 12	11,3
ENXOFRE (% MASSA SECA)	0,5 - 0,9	0,4

4. METODOLOGIA

4.1 Sistema de trituração *shredder* e separação *eddy current* da planta industrial em estudo

A planta industrial de processamento de sucata empregada no presente trabalho pertence a uma usina semi-integrada localizada no sudeste do Brasil. A visão aérea do Pátio de Metálicos desta usina é mostrada na [Figura 19](#). O Pátio de Metálicos possui um mega *shredder* (SHR120118) fornecido em 1999 pela Metso e dois separadores magnéticos *eddy current*. Além do aumento de densidade esperada da sucata processada, a remoção de impurezas é fundamental para impedir que alguns materiais não sejam introduzidos no forno, como: plásticos, espumas, madeira e tecidos (presentes em carros, fogões, geladeiras, etc); metais não ferrosos (cobre presente em motores de indução, aço inox, etc) e terra. Uma informação relevante é que embora o aço inox seja uma liga ferrosa, alguns tipos dessas ligas são vulgarmente chamados de ‘metal não ferroso’, pois não são separados nem pelo sistema de imantação nem pelo separador magnético *eddy current*, sendo, pois, um componente presente no *fluff*.



Figura 19 – Foto aérea do *shredder* e do *eddy current* utilizados no presente trabalho e identificação dos principais pontos do processo (Google Maps).

O processo se inicia pelo abastecimento da esteira de alimentação (*'apron'*) feita com máquinas móveis com garras com capacidade de até 4 t por operação. Esta esteira direciona a sucata para o moinho de martelos que giram em altas velocidades periféricas e compactam a sucata contra as grelhas obtendo um produto de tamanho conhecido.

O perfil de sucata que abastece o *shredder* é a sucata de obsolescência de materiais diversos, condensada em pacote ou solta, atendendo a restrição de dimensional menor que 2997 mm de largura e aproximadamente 1" de espessura. Peças com comprimento muito grande tem dificuldades para atravessar a esteira e, por isso, são separadas para outros processamentos (por exemplo, oxicorte) ou simplesmente sofrem um pré-processamento conforme o padrão interno da planta.

Após cominuição da sucata no moinho, a mesma passa por tambores magnéticos que direcionam a sucata metálica ferrosa para esteiras com ponto de catação manual para a retirada de peças como transformadores e indutores contendo alto teor de cobre e, em seguida, abastece as baias para a alimentação do forno elétrico a arco (FEA). O material não imantado (resíduo de *shredder*) remanescente do tambor magnético é misturado ou não ao resíduo succionado pela exaustão do moinho, sendo direcionado por um conjunto de esteiras a um separador magnético na entrada do *eddy current*.

Após passar novamente por um separador magnético, o resíduo é peneirado utilizando uma peneira vibratória com 2 *decks* de telas perfuradas (divulgação das características e dimensões não autorizada), conforme exemplo ilustrativo na [Figura 20](#).



Figura 20 – Imagem de um exemplo de sistema de peneiramento (AEI Solutions, 2019).

O passante é formado predominantemente por terra e o material retido nas telas é encaminhado ao *eddy current*, o qual promove a separação dos metais não ferrosos.

Dessa forma, são geradas ao todo 5 correntes:

- Terra: passante da peneira vibratória,
- Não ferroso fino: metais não ferrosos separados do retido na tela fina,
- Não ferroso grosso: metais não ferrosos separados do retido na tela grossa,
- *Fluff* fino: material retido na tela fina após separação dos não ferrosos, e
- *Fluff* grosso: material retido na tela grossa após separação dos não ferrosos.

A geração de resíduo nesse processamento depende do perfil de sucata consumida, abastecimento, eficiência de trituração, qualidade da separação por imantação ferrosa e eficiência do equipamento de separação dos metais não ferrosos, além do efeito significativo da umidade na qualidade dos coprodutos gerados.

4.2 Balanço de massa do resíduo do *shredder*

4.2.1 Adaptação da planta de processamento do resíduo do *shredder* para preparação de amostra para testes na planta piloto de coqueria

Após caracterização preliminar do *fluff*, o resultado foi apresentado à equipe de especialistas de coqueria para possível realização de um teste em uma planta piloto de coqueria. Constatou-se a partir dos resultados de balanço de massa que o *fluff* produzido na planta de *eddy current* na configuração existente não atenderia os requisitos de qualidade exigidos para o teste e consumo posterior. Consequentemente o processo foi redesenhado alterando-se as seguintes configurações: separação do produto remanescente da exaustão, separação das esteiras de *fluff* fino e grosso, nova adequação das malhas da peneira e ajuste das configurações de operação do separador magnético suspenso (UME 115 130 R), vulgo *eddy current*. O detalhamento das alterações é de cunho confidencial e faz parte do *know-how* da empresa, todavia, os resultados obtidos a partir dessa alteração encontram-se detalhados no balanço de massa apresentado no item 5.2.

4.2.2 Método de realização do balanço de massa do resíduo do *shredder*

Antes de realizar o balanço de massa em um equipamento como o *shredder*, que é um meio de transformação em escala industrial, é fundamental garantir que a entrada de sucata a processar (*input*) represente o perfil de consumo real médio da planta.

Para garantir a informação fidedigna foi realizado um estudo levantando dados das sucatas alimentadas nos seis meses anteriores, levando em consideração: o tipo de sucata consumida e a representatividade das fontes fornecedoras, sendo que lotes de compras específicas foram isolados e não foram consumidos durante os testes. Esse detalhamento também não pode ser apresentado devido à confidencialidade do perfil de compra dos metálicos.

Outro ponto analisado para representatividade da amostragem é o efeito da precipitação pluviométrica (mm). Para tal, foram avaliados dados da rede do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Foi identificado que entre novembro a março há uma alta na precipitação na cidade do Rio de Janeiro, em especial na estação Santa Cruz que fica localizada na região da usina onde os dados foram coletados. Pode-se afirmar com

95% de confiança que a precipitação desses 5 meses é superior aos outros 7 meses do ano, onde a média da alta precipitação é de 112,8 mm, enquanto a baixa precipitação é de 48,9 mm, segundo dados do INMET.

As amostragens aconteceram 2 vezes por mês em 2 meses distintos do ano, representando 12% da produção mensal (aproximadamente 400 t de resíduo de *shredder* amostrado em cada mês). As amostras foram realizadas nos meses de março (alta precipitação) e setembro (baixa precipitação), conforme exemplo do histórico do INMET, pois o percentual de umidade remanescente facilita ou dificulta a segregação dos materiais.

Durante o processamento, toda a área física do *eddy current* foi limpa para que não houvesse contaminação com resíduos e materiais oriundos de processamentos anteriores. Ao longo da operação os resíduos eram coletados através de pá carregadeira e caminhão *roll-on/roll-off* pesados na balança de caminhões do Pátio de Metálicos. Os caminhões eram pesados antes e após cada movimentação para evitar erros devido ao consumo de combustível ao longo da operação. Os equipamentos usados no balanço de massa encontram-se listados na [Tabela 8](#):

Tabela 8 – Lista de equipamentos utilizados no balanço de massa.

Equipamento	Marca	Modelo	Capacidade	Erro
Pá carregadeira	Caterpillar	924h	1,7 - 2,5 m ³	NA
Caminhão	Mercedes Benz	Actros 4444	24 m ³	NA
Balança rodoviária	Toledo	900i	80 t	10 kg
Balança integradora	Schenck	MULTIBELT® 2BMP	15.000 t/h	± 0.25%

Após as pesagens, os materiais foram segregados em local específico, homogeneizados e quarteados. Na primeira parte do trabalho foram analisadas amostras de aproximadamente 25 kg de terra, 140 kg de *fluff* e 30 kg de metálicos não ferrosos de cada tipo fino e grosso; a sucata triturada não foi caracterizada, sendo realizada uma verificação padrão para medição da impureza presente.

Na avaliação dos resíduos após a modificação da planta houve amostras com as seguintes características: em torno de 25 kg de terra, 120 kg de *fluff* fino (potencial uso em coqueria), 100 kg de *fluff* grosso e 30 kg de não ferroso de cada tipo fino e grosso; a sucata

triturada não foi caracterizada, sendo realizada uma verificação padrão para medição da impureza presente.

4.3 Caracterização do resíduo do *shredder*

Para realizar as caracterizações do resíduo do *shredder* após os balanços de massa adequados, estudantes da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) analisaram as amostras quarteadas e utilizaram laboratórios na universidade e na indústria para esse estudo, com fim de caracterizar granulométrica e qualitativamente os materiais.

Após a classificação granulométrica, cada fração foi analisada manualmente separando-se os diferentes tipos de materiais. A identificação foi feita levando em conta a aparência física (forma, textura, cor), densidade e resposta à imantação com ímã. Vale ressaltar que esta é uma possível fonte de erro, principalmente para as frações de baixa granulometria, pois a identificação se torna difícil.

Foi usado inicialmente um sistema de peneira Granutest, com peneiras de dimensão 5” de diâmetro x 2” altura, todas de aço 1020, nas seguintes aberturas de malha: 19,05 mm, 4,00 mm, 3,38 mm, 2,00 mm e 0,50 mm, mais fundo.

Na primeira caracterização dos resíduos a agitação foi feita manualmente por 30 segundos em porções de 1-2 kg cada, em cada pesagem descontava-se a tara da peneira. A partir dos resultados alcançados nessas análises foi definido investir em um novo sistema de peneiramento, mais completo e robusto. A balança utilizada foi uma Mettler PM11 com escala máxima de 11.000g (11 kg) e erro de 0,1g.

Após as alterações feitas na planta de processamento de resíduo de *shredder* vulgo *eddy current*, as caracterizações foram realizadas no Laboratório de Tecnologia Mineral – LTM da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, enquanto se aguardava o novo equipamento. Durante o peneiramento, foi necessário o uso de luvas e máscara de segurança devido à grande quantidade de material particulado fino suspenso no ar durante o manuseio da amostra. Os dimensionais das peneiras foram idênticos (5” de diâmetro x 2” altura, todas em aço 1020), porém utilizou-se um jogo mais completo de malhas e um sistema de agitação Ro-Tap II (RX-94) a partir da peneira de abertura 9,50 mm, nem todas as peneiras foram utilizadas para todos os materiais, porém segue listado abaixo aquelas que fizeram parte do trabalho: 50,80 mm, 45,00 mm, 37,50 mm, 31,50 mm, 26,50 mm, 22,40 mm, 19,00 mm, 16,00 mm, 13,20 mm, 9,50 mm, 8,00 mm, 6,30 mm, 4,76 mm, 3,35

mm, 2,36 mm, 1,00 mm e fundo. As adições eram feitas através de baldes 10 l pesando entre 3-5 kg, a agitação pelo peneirador foi mantida fixa por 90 segundos e a pesagem foi realizada em uma balança de precisão.

Após adição do resíduo em quantidades fixas com balde de 18 l no topo da peneira era aguardado a vibração por 90 segundos, o descarte do fundo ($< 4,00$ mm) foi feito em um balde de 18 l. Esse padrão foi mantido para todas as amostras. Após o processamento nas peneiras, foram feitas a separação manual por faixa granulométrica e a pesagem em uma balança computadorizada ELGIN (capacidade: 15 kg - divisão de 2 g até 6 kg, divisão de 5 g de 6 a 15 kg, tara de até 15 kg) para compor o balanço de massa.

4.4 Determinação do poder calorífico do *fluff*

Parte do *fluff* enviado para os testes na planta de coqueria foi amostrado e enviado à UFRJ, passando por uma adequação qualitativa e granulométrica, sendo triturado no LTM empregando-se um mini triturador e removido todo remanescente metálico e inorgânicos de alta resistência (pedra + vidro) para análise do poder calorífico. Foi removido (22,4% em massa do total), realizado novo balanço de massa, sendo enviadas 10 amostras de 450 g cada do *fluff* triturado e homogeneizado para análise no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), no Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes, onde foram determinadas: % massa de umidade, % massa do hidrogênio, % massa do enxofre e poder calorífico superior e inferior (MJ/kg), utilizando os procedimentos/equipamentos listados a seguir:

- Determinação do teor de umidade, baseada na ASTM E1756-08(15).
- Determinação do teor de hidrogênio, baseada na ASTM D5373-14e2 – Método A. Equipamentos: Analisador de carbono, hidrogênio e nitrogênio, cód.: 43291, verificado com material de referência antes do ensaio. Balança analítica, cód.: 83823.

- Determinação do teor de enxofre total, baseada na ASTM D4239-14e2 – Método A. Equipamentos: Analisador de enxofre, cód.: 43252, verificado antes do ensaio. Balança analítica, cód.: LCL-003.
- Determinação do poder calorífico, baseada na ASTM D5865-13. Equipamentos: Balança analítica, cód.: 83823. Bomba calorimétrica, com cabeçotes códs.: 1 e 2.

4.5 Ensaio em planta piloto de coqueria

No estudo do comportamento de um carvão ou mistura durante a coqueificação, a unidade piloto permite que se obtenham informações suficientes para estabelecer o grau de interesse em um carvão e as condições para a sua utilização, e para uma mistura o nível qualitativo do coque e as condições em que ela deverá ser utilizada em escala industrial. Portanto, o forno piloto reúne uma quantidade de experiência e de aparelhagem que podem proporcionar um estudo completo dos carvões.

O forno piloto de coqueificação utilizado foi fabricado pela *Carbolite Furnace* em conjunto com a *Coal Research Establishment*, na Inglaterra e possui todas as facilidades necessárias ao enformamento da carga, desenformamento do coque e aparelhos para a medida e registro de pressão de coqueificação, temperaturas das paredes, temperatura do centro de carga, medidor de contração e expansão. O forno possui uma estrutura de chapas grossas e de ferro fundido perfilado, em formato retangular, possui uma parede fixa e outra parede móvel montada sobre mancais lineares. As portas são articuladas a partir da estrutura principal de modo que a parte quente permaneça longe do operador. A abóbada do forno é suspensa por quatro parafusos que facilitam o deslocamento da parede móvel. Em termos de dimensões, as principais características são: 455 mm de largura x 930 mm de comprimento x 830 mm de altura, com volume útil de 0,350 m³ e capacidade de carga de 255 kg (base seca) a uma densidade de carga de 750 kg/m³.

Foram considerados 8 enformamentos na Unidade Piloto de Coqueificação, sendo válido somente aqueles que atenderam as seguintes condições:

- Temperatura interna do forno de coqueificação: $T > 1000^{\circ}\text{C}$;
- Tempo bruto de coqueificação por enformamento: 20 horas;
- Diferencial entre Rendimento (Coque/Carvão) Teórico e Real: $\pm 3\%$;

- Matéria Volátil (MV) do coque piloto por enformamento: $\leq 3,0\%$.

A base comparativa nesta etapa foi o coque MGC, um médio volátil de origem australiana, cuja caracterização fornecida pelo produtor é apresentada na [Tabela 9](#).

Tabela 9 – Caracterização do carvão MGC. Fonte: (Silva e Amorim et al., 2019)

Carvão	Umidade (%)	Matéria volátil (%)	Carbono fixo (%)	Cinza (%)	Enxofre (%)
MGC	7,00	20,74	70,15	9,12	0,60

Macerais (%)	Rank
Vitrinita	78,6
Resinita	0,8
Semifusinita	12
Macrinita	0,4
Fusinita	1,4
Inertodentrinita	4
Vitrinita oxidada	0,2
Vitrinita alterada	0,2

Fluidez (ddpm)	43
Log Máx Flu	1,63
Temp. Amolec (°C)	411
Temp. MáxFlu (°C)	469
Temp. Solidific (°C)	493
Range Plástico (°C)	82

Para os testes, realizados em duplicata, em amostras de 150 kg peso fixo base seca, foram feitas misturas do carvão metalúrgico e *fluff* (vide [Figura 21](#)) em diferentes proporções conforme mostrado na [Tabela 10](#).

Tabela 10 – Composição usada nos ensaios piloto com o *fluff*.

Identificação	Participação dos materiais (%)	
	Carvão metalúrgico	<i>Fluff</i>
Teste 1	100	0
Teste 2	99	1
Teste 3	95	5
Teste 4	90	10



Figura 21 – Exemplo de mistura de coque e *fluff*.

A preparação de cada amostra na planta piloto leva quase 50 h, conforme detalhado na [Tabela 11](#):

Tabela 11 – Etapas de preparação de amostras de coque na planta piloto.

Etapa	Etapas para preparação das amostras de coque na planta piloto	Tempo de execução (h)
1	Coleta e preparação das matérias-primas	2,50
2	Enfornamento (carga 150 kg – base seca)	0,50
3	Tempo de coqueificação	20,00
4	Desenfornamento	0,25
5	Extinção do coque (Resfriamento)	0,25
6	Secagem	24,00
7	Estabilização do coque	0,50
8	Preparação das amostras de coque	0,50

Após as amostras prontas, as seguintes análises em laboratório listadas na [Tabela 12](#) foram realizadas, que levam cerca de 5 a 7 dias para ficarem prontas.

Tabela 12 – Ensaios realizados no laboratório da coqueria.

Tipos de ensaios	Ensaios	Descrição dos ensaios	Normas
Metalúrgica	CSR	Resistência mecânica do coque após reação com CO ₂	ASTM-D-5341
	CRI	Reatividade (1100°C com CO ₂)	ASTM-D-5341
Física	DI	Resistência mecânica a frio (queda transporte)	JIS 2185
Química	CZ	Teor de cinza	ASTM-D-3174
	S	Teor de enxofre	ASTM-D-2492

No estudo foi feita uma avaliação da mistura base do coque para obter o valor de referência e poder comparar os resultados com as amostras com *fluff*. Os pontos utilizados para o cálculo de viabilidade foram: rendimento global do coque, teor de cinzas, reatividade, resistência mecânica do coque após reação com CO₂ e resistência mecânica a frio. Tais avaliações permitem comparar a viabilidade econômica do produto e aplicação nas coquerias. Os valores de referência encontram-se na [Tabela 13](#).

Tabela 13 - Parâmetros de comparação (base) do coque usado.

Base	Qualidade			
Carvão	Rendimento Global	Cinza	CSR	DI
Referência	78,14	13,53	75,35	84,67

O detalhamento do método de cálculo do rendimento global e do valor em uso (VIU) do coque que define o interesse econômico de uma mistura em relação a uma referência não é detalhado nesse trabalho por ser de domínio estratégico da empresa. Todavia, sugere-se consulta ao livro *The Coal Handbook: Towards Cleaner Production* nas páginas 455-496, no qual há um trabalho dedicado ao tema.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Adequação do layout da planta industrial para melhorar a qualidade do resíduo do *shredder* gerado

A partir da indicação do potencial de aproveitamento do *fluff* disponível na literatura, o esforço inicial foi destinado a entender o perfil do resíduo gerado na condição incipiente do equipamento, conforme [Figura 22](#), que mostra o layout original da planta de processamento de resíduo de *shredder* na condição de projeto e em uso no início das atividades da presente dissertação. Havia na planta original duas correntes de alimentação de resíduo no *eddy current*: a mais importante advinda do material não imantado pelos tambores magnéticos do *shredder* e a segunda vinda dos resíduos leves captados do sistema de despoeiramento do *shredder*. A partir desses entrantes geravam-se 5 saídas. A primeira saída é dos materiais imantados pelo separador magnético, ricos em metálicos ferrosos e finos fortemente magnéticos. A segunda saída é o passante da peneira de malha de menor tamanho chamado de “terra”, cuja composição química foi determinada pela aluna de graduação da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Marcelle Dias dos Reis, vinculada a esse projeto na condição de estagiária voltada ao estudo do aterro temporário. A terceira saída é do extrator magnético suspenso 1, destinado a captar o *zorba* ‘fino’ (material intermediário entre a peneira inferior e superior). A quarta saída, o produto do extrator magnético suspenso 2 focado no *zorba* ‘grosso’ (material com tamanho superior a peneira de maior dimensional) e, por fim, uma correia única que captava os resíduos remanescentes dos dois extratores o *fluff* sendo a quinta saída.

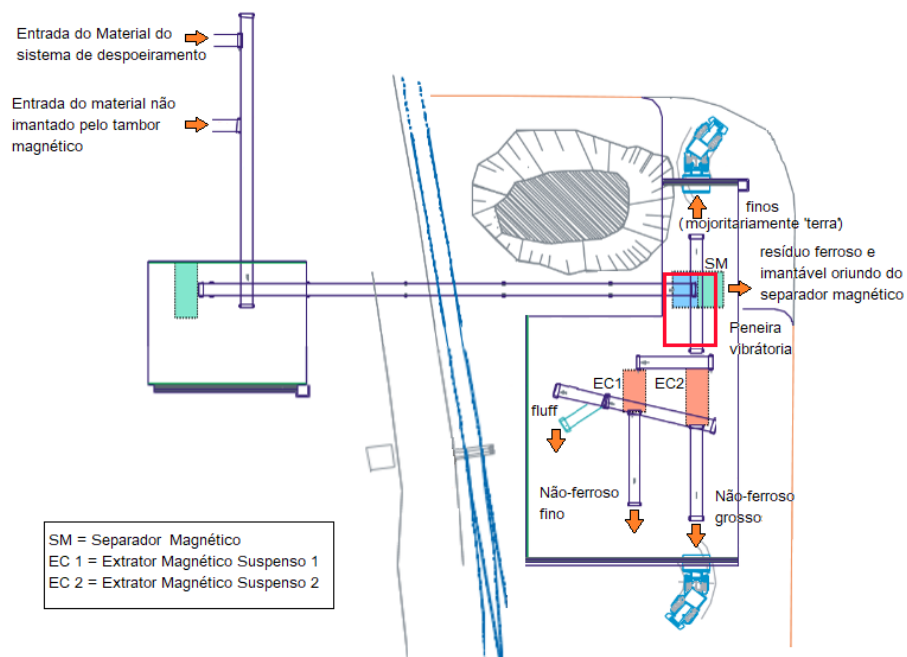


Figura 22 – Layout original da planta de processamento de resíduo de *shredder* utilizada no trabalho.

O produto das 5 saídas na configuração original da planta encontra-se mostrado nas Figuras 23, 24, 25 e 26:



Figura 23 – Saída dos metálicos ferrosos imantáveis e finos magnéticos da planta original.



Figura 24 – Finos ou “terra do *shredder*” ou simplesmente “terra” gerados na planta original.



Figura 25 – Zorba fino (esquerda) e zorba grosso (direita) gerados na planta original.



Figura 26 – Fluff gerado na planta original.

O balanço de massa simples da planta de processamento de resíduo de *shredder* na condição de projeto tem o *fluff* com 58,4%, a “terra de *shredder*” com 31,1%, o *zorba* total em 4,0% (fino 2,8% e grosso 1,2%) e o material imantável ferroso em 6,5%. No [Gráfico 15](#) tem-se uma correlação de 95,8% entre a “terra” e *fluff* (95% de confiança, coleta de dados de 13 meses), o qual sugere que o passante de menor dimensão aqui chamado de “terra” quando não peneirado de maneira eficiente é direcionado para o *fluff*, contaminando-o, sendo que o volume total desses dois resíduos se mantem similar em todos os meses. Isso reforça o papel chave do sistema de peneiramento para a qualidade dos coprodutos gerados nesse processo.

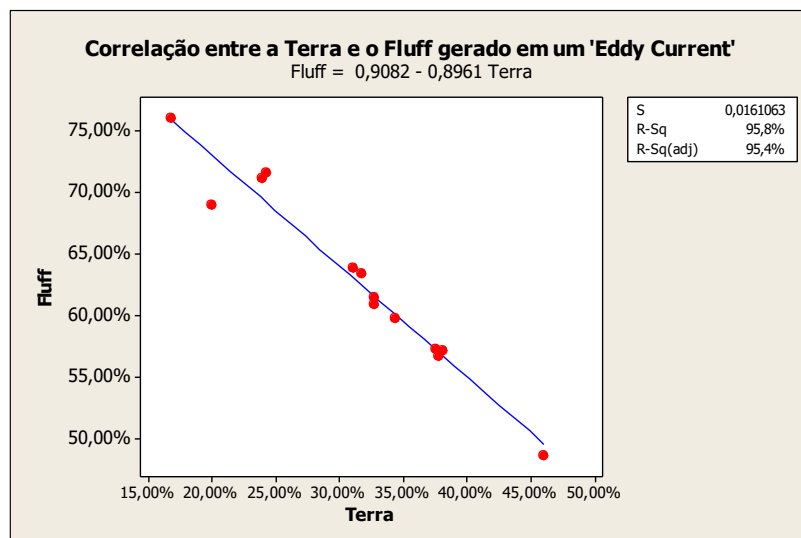


Gráfico 15 – Correlação entre ‘terra’ e *fluff* gerados no *eddy current*.

Essa condição fica evidente nas fotos de duas amostras de *fluff* a partir do mesmo *input*, do mesmo equipamento Figura 27, porém: uma com ineficiência de peneiramento e outra com operação padrão. Isso pode acontecer por diferentes motivos: limpeza inadequada das peneiras antes da operação, % umidade oriunda da sucata entrante (períodos de chuva) ou má regulação do sistema de despoeiramento, qualidade inferior da sucata entrante alterando o perfil de consumo.



Fluff com menor quantidade de terra



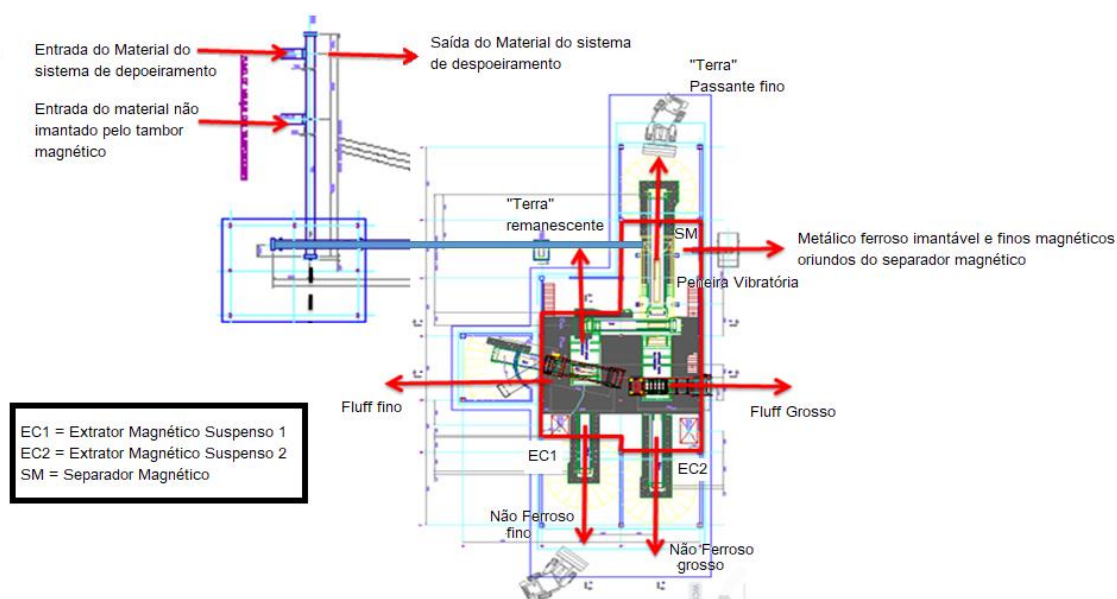
Fluff com maior quantidade de terra

Figura 28 – Comparativo entre a qualidade do *fluff* influenciado pela condição do peneiramento.

A partir do balanço de massa inicial e das caracterizações dos rejeitos e coprodutos que compõem o resíduo do *shredder* (apresentadas no item 5.2), foram realizadas

modificações na planta de *eddy current* com objetivo de reduzir perdas, otimizar o processamento, e garantir qualidade para transformar parte do resíduo em coproduto. As alterações feitas na planta encontram-se citadas no item 4.2.1. O novo layout foi elaborado pelo engenheiro mecânico da planta Wilton Portes com apoio de sua equipe, os novos fluxos dos resíduos são mostrados na [Figura 28](#).

Pode-se verificar que as duas correntes de entrada de material se mantêm, porém o material advindo do despoeiramento é desviado em uma nova saída. O layout da planta foi alterado e passou a ter 7 saídas ao invés de 5, uma nova saída destinada ao *fluff* grosso e uma nova saída de finos é mostrada na [Figura 29](#), criada através de um fundo de peneira na mesa vibratória que destina o passante intermediário para o extrator magnético suspenso 1, para remover a terra remanescente da fração de granulometria intermediária que iria para o extrator magnético suspenso 1.



[Figura 29](#) – Desenho esquemático no novo layout do *eddy current*.



Figura 30 – Adaptação da mesa vibratória do Extrator Magnético 1 (esquerda) e resíduo fino passante (direita).

Após as alterações os balanços de massa das novas rotas seguiram a distribuição apresentada na **Figura 30**: a nova saída para o material captado do despoeiramento corresponde agora a maior fração com 48,7%, em seguida as “terras” com 33,1% (saída original: 31,5% + nova saída do *eddy current* 1: 1,6%), o *fluff* fino corresponde agora a terceira maior fatia com 10,3% e o *fluff* grosso soma modestos 3,2%, sofrendo uma redução drástica em massa. O metálico não ferroso total 3,8%, tendo o fino reduzido modestamente para 2,7% e o grosso reduzido para 1,1%, há uma queda significativa no metálico ferroso (14x) para 0,9%.

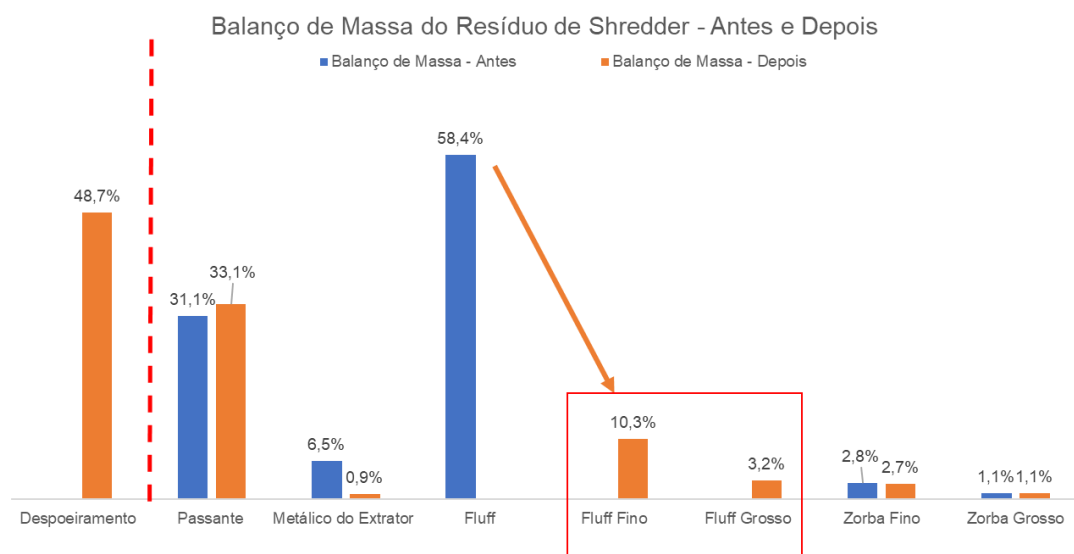


Figura 31 – Comparativos do balanço de massa antes e após alteração da planta de processamento do resíduo de *shredder*.

As fotos desses materiais são apresentadas nas Figuras 31, 32, 33, 34 e 35.



Figura 32 – Saída dos metálicos ferrosos imantáveis e finos magnéticos da planta, após alteração.



Figura 33 – “Terra do *shredder*” ou simplesmente “terra” após modificações na planta.



Figura 34 – *Zorba* fino (esquerda) e *zorba* grosso (direita) após alterações na planta.



Figura 35 - *Fluff* grosso (esquerda) e *fluff* fino (direita) após alterações na planta.



Figura 36 – Resíduo remanescente do sistema de despoeiramento após alterações na planta.

Os resultados apresentados nos balanços de massa, no primeiro e segundo cenários, deixam evidentes que as melhorias com o novo layout de processo promoveram uma evolução qualitativa nas saídas dos equipamentos, que podem ser evidenciadas pelas fotos e são quantitativamente comprovadas no item 5.2. As mudanças são fruto de minuciosa observação de processo, debates técnicos com especialistas e uma análise cuidadosa dos resultados obtidos, relativamente simples visto a complexidade e custo elevado envolvido em todo o sistema da planta.

Os resíduos e coprodutos do *shredder* antes da mudança no layout eram dispostos da seguinte maneira: 6,5% eram os metálicos que pela impureza presente eram reprocessados no *shredder* em um circuito fechado, 4% de *zorba* vendido e 89,5% destinado a aterro. Após as alterações com as características alcançadas obteve-se o seguinte potencial: 0,9% dos metálicos reaproveitados consumidos como sucata triturada no FEA, 3,8% de *zorba* vendido, 10,3% de *fluff* fino e 3,2% de *fluff* grosso, 20,0% de destinação da terra, e 61,8% destinado a aterro. Comparando-se as despesas e receitas, o segundo cenário apresenta um saldo positivo com aumento de 34,4% no resultado financeiro desse balanço.

5.2 Caracterização do resíduo de *shredder*

Inicialmente são apresentadas as caracterizações das saídas da planta de processamento de resíduo de *shredder* no layout original de projeto. A partir desses dados, são argumentadas as conclusões trazidas à luz por esses resultados, que promoveram as melhorias expostas. Simultaneamente para cada saída, são apresentadas as caracterizações após as modificações no layout, destacando vantagens e desvantagens. As análises estão agrupadas de modo a facilitar o entendimento.

Antes de esmiuçar as caracterizações, vale salientar que algumas fotos das separações manuais são exemplificadas e comentadas, todavia, devido ao rico conteúdo de materiais e granulometrias disponível não são apresentadas todas as fotos, sendo o objetivo divulgar a informação de maneira clara a fim de garantir uma compreensão robusta das análises.

5.2.1 Caracterização da “terra” de *shredder*

A distribuição granulométrica das várias frações de materiais encontradas na corrente de “terra do *shredder*” ou simplesmente “terra” gerados na planta original (vide [Figura 24](#)) é mostrada na [Tabela 14](#). Observou-se que quase 2/3 do material (64,0%) é considerado “terra”, constituída de material fino (granulometria < 2,00 mm) que não pôde ser classificado manualmente, sendo ainda todo material coletado no fundo (com granulometria < 0,50 mm) imantável (28,0% dos finos), indicando alto teor de óxido de ferro.

Tabela 14 – Caracterização da “terra” do *eddy current* no layout original.

Abertura	Ferroso	zorba	fluff	Vidro/pedra	Fundo ("Terra")	Total
4,00 mm < X < 19,05 mm	1,8%	1,1%	6,4%	2,6%	0,0%	11,9%
3,38 mm < X < 4,00 mm	1,6%	1,0%	4,3%	1,3%	0,0%	8,2%
2,00 mm < X < 3,38 mm	3,0%	1,3%	8,8%	2,8%	0,0%	15,9%
0,50 mm < X < 2,00 mm	-	-	-	-	36,0%	36,0%
X < 0,50 mm (fundo)	-	-	-	-	28,0%	28,0%
Total	6,4%	3,4%	19,5%	6,7%	64,0%	100,0%

Os ferrosos capturados por imantação estão apresentados na [Figura 36](#), em sua maioria constituída por fios finos que se emaranharam com as espumas e outros materiais

contidos no *fluff*, bem como o *zorba* (material metálico não ferroso) separado manualmente mostrado na Figura 37 que, em sua maioria, também aparece na forma de fios emaranhados a outros materiais. O extrator magnético suspenso disponível nessa planta foi projetado para capturar metálicos não ferrosos com diâmetro $> 8,00$ mm, portanto o material encontrado abaixo deste valor não deve ser considerado uma “perda” de processo. Existem equipamentos capazes de recuperar o não ferroso nesta condição de tamanho, porém têm custo elevado e improvavelmente seriam viabilizados em um *payback* aceitável, nas proporções encontradas.

O *fluff* separado manualmente e mostrado na Figura 38 consiste de uma mistura de trapo, madeiras, espumas e algumas ‘cascas’ (revestimentos poliméricos de tubos e equipamentos metálicos), sendo que a quantidade de polímeros, borrachas espuma presentes tem uma proporção significativa de 19,5%, que poderia prejudicar uma aplicação futura da terra na forma de óxido. Por fim, os vidros e pedras encontrados e mostrados na Figura 39 não prejudicariam uma possível aplicação da terra como fonte de óxidos e representam 6,7% do total.

A ineficiência do peneiramento é demonstrada nessa análise através da quantidade de material com granulometria $< 4,00$ mm (88,1%), menos de 1/3 da granulometria da peneira utilizada, indicando possível retenção de terra para o processo subsequente, o que é deletério ao sistema de recuperação do *zorba*, reduzindo sua eficiência e vida útil.



Figura 37 – Metálico ferroso separado da ‘terra’ por imantação.



Figura 38 – Metálico não ferroso separado manualmente.



Figura 39 – Plástico presente na ‘terra’ separado manualmente.



Figura 40 – Pedras e vidros segregados da ‘terra’ separados manualmente.

A caracterização da corrente de terra processada após as modificações no layout da planta encontra-se apresentada na [Tabela 15](#), em que se observa uma redução no material fino de fundo de 64,0% para 57,3% (-10,5% de redução). Há claramente um aumento de granulometria média devido a um aumento da eficiência da peneira. Aparece agora a presença de madeira que não era captada na condição anterior, o *fluff* presente no fundo é apresentado na [Figura 40](#) e as pedras e vidros se mantêm presentes em proporção um pouco maiores que a anterior, 7,8%. O *fluff* que somava 19,5% foi contabilizado em 24,5% (+ 25,6% de aumento).

Tabela 15 – Caracterização da “terra” do *eddy current* após modificação no layout.

Abertura	Ferroso	Zorba	<i>fluff</i>	Pedras / Vidros	Inox	Madeira / Orgânicos	Fundo ("terra")	Total
9,50 mm < X	0,0%	0,2%	0,6%	0,0%	0,0%	0,2%	0,0%	1,0%
8,00 mm < X < 9,50 mm	0,2%	0,7%	2,4%	0,9%	0,0%	0,5%	0,0%	4,7%
6,30 mm < X < 8,00mm	0,1%	1,2%	1,8%	1,6%	0,1%	1,4%	0,0%	6,2%
4,76 mm < X < 6,30 mm	0,2%	0,6%	4,0%	1,5%	0,1%	1,7%	0,0%	8,1%
3,35 mm < X < 4,76 mm	0,1%	0,4%	6,3%	2,6%	0,1%	1,6%	0,0%	11,1%
2,36 mm < X < 3,35 mm	0,2%	0,7%	9,5%	1,2%	0,0%	0,0%	0,0%	11,6%
1,00 mm < X < 2,36 mm	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	16,7%	16,7%
x < 1,00 mm (fundo)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	40,6%	40,6%
Total	0,8%	3,8%	24,5%	7,8%	0,4%	5,4%	57,3%	100,0%



Figura 41 – Material considerado “*fluff*” presente na terra após modificação da planta.

5.2.2 Caracterização do *fluff*

Na configuração original da planta, o *fluff* não estava separado em diferentes granulometrias (fino e grosso), sendo a classificação granulométrica das frações de materiais encontradas nesta corrente mostrada na [Tabela 16](#).

Pode-se verificar que há uma presença significativa de metálicos (ferrosos + zorba = 12,0%), sendo a de maior representação o metálico ferroso (9,9%), indicando uma deficiência no processo anterior de extração magnética. A partir dessa primeira caracterização concluiu-se que o *zorba* possuía um potencial de recuperação de no mínimo 0,6% no *fluff* (fração > 19,05 mm), que nas quantidades produzidas naquela configuração de planta ao preço de venda praticado na época representava um potencial de receita adicional anual de mais de R\$ 450 mil. Na faixa inferior (19,05 mm a 4,00 mm) que continha 1,2% de *zorba* em massa do *fluff* o potencial é incerto, pois há restrição de recuperação do equipamento abaixo de 10 mm segundo o fornecedor, valor intermediário da faixa analisada, o que influenciou a mudança do perfil de peneiras para o teste após a modificação do equipamento.

Os materiais com potencial calorífico (plástico, borracha, espuma, madeira) somam 61,4% sendo 85,8% desse valor maior que 4,00 mm, e os materiais inertes como vidro e pedra só se apresentam na granulometria maior que 4,00 mm representando quase 8% do resíduo. O fundo, ou como chamado nesse trabalho “terra” é significativo 18,8% indicando a ineficiência da peneira inferior, como mostrado na [Figura 24](#).

Tabela 16 – Composição física do *fluff* no layout original.

Abertura	Ferroso	Zorba	Plásticos	Borracha	Espuma	Madeira	Vidros	Pedra	Fundo ("terra")	Total
19,05 mm < X	4,3%	0,6%	12,1%	9,0%	0,2%	2,9%	0,8%	0,3%	0,0%	30,1%
4,00 mm < X < 19,05 mm	5,4%	1,2%	17,2%	6,1%	0,4%	4,8%	2,6%	4,1%	0,0%	41,8%
3,38 mm < X < 4,00 mm	0,0%	0,1%	3,8%	1,2%	0,0%	0,3%	0,0%	0,0%	0,0%	5,5%
2,00 mm < X < 3,38 mm	0,2%	0,1%	3,3%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%	4,0%
0,50 mm < X < 2,00 mm	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4,8%	4,9%
X < 0,50 mm (fundo)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	13,8%	13,8%
Total	9,9%	2,1%	36,4%	16,4%	0,6%	8,0%	3,4%	4,5%	18,8%	100,0%

Após alteração da planta o perfil do *fluff* mudou completamente, como se observa na [Figura 34](#). Na [Tabela 17](#), são apresentadas as características físicas do *fluff* fino, que é objeto principal deste trabalho e desenvolvido para ser empregado no teste em coqueria. A maioria dos materiais (79,4%) está concentrada nas granulometrias entre 31,50 mm a 6,30 mm.

Pode-se verificar que houve uma concentração no material de alto poder calorífico (plástico, borracha, espuma e madeira) que agora somam 77,5% e uma redução do fundo (> 2,36 mm) de 6,5%, indicando uma redução significativa da presença de terra. Os materiais inertes (vidros e pedras) reduziram sua participação para 5,4% e os metálicos ferrosos e não ferrosos apresentam uma porção menor 10,5%, todavia há um aumento na proporção do *zorba* para 3,2%, embora quantitativamente significa uma redução de 3,5 vezes.

Tabela 17 – Composição física do *fluff* fino após modificação no layout.

Abertura	Ferroso	Zorba	Plásticos	Borracha	Espuma	Madeira	Vidros	Pedras	Fundo ("terra")	Total
50,80 mm < x	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
45,00 mm < x < 50,80 mm	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
37,50 mm < x < 45,00 mm	1,2%	0,1%	0,7%	0,0%	0,4%	0,1%	0,0%	1,0%	0,0%	3,4%
31,50 mm < x < 37,50 mm	0,6%	0,2%	3,7%	1,7%	0,2%	0,5%	0,0%	0,0%	0,0%	7,0%
26,50 mm < x < 31,50 mm	0,4%	0,0%	2,3%	0,6%	0,6%	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%	4,1%
22,40 mm < x < 26,50 mm	0,3%	0,2%	7,7%	4,1%	0,2%	0,9%	0,0%	1,4%	0,0%	14,7%
19,00 mm < x < 22,40 mm	1,8%	1,0%	8,4%	3,0%	0,7%	0,8%	0,0%	0,9%	0,0%	16,6%
16,00 mm < x < 19,00 mm	0,2%	0,2%	6,3%	1,9%	0,6%	0,7%	0,0%	0,4%	0,0%	10,3%
13,20 mm < x < 16,00 mm	0,4%	0,3%	6,9%	2,2%	0,8%	0,4%	0,3%	0,4%	0,0%	11,8%
9,50 mm < x < 13,20 mm	1,5%	0,3%	6,8%	1,5%	0,5%	0,7%	0,0%	0,5%	0,0%	11,9%
6,30 mm < x < 9,50 mm	0,3%	0,5%	7,6%	0,7%	0,3%	0,4%	0,0%	0,1%	0,0%	10,0%
4,76 mm < x < 6,30 mm	0,2%	0,3%	0,5%	0,4%	0,1%	0,3%	0,1%	0,1%	0,0%	1,8%
3,35 mm < x < 4,76 mm	0,2%	0,1%	0,3%	0,1%	0,1%	0,2%	0,0%	0,1%	0,0%	1,0%
2,36 mm < x < 3,35 mm	0,2%	0,1%	0,3%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,8%
x < 2,36 mm	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	6,5%	6,5%
Total	7,3%	3,2%	51,4%	16,3%	4,5%	5,3%	0,4%	5,0%	6,5%	100,0%

O *fluff* grosso obtido após modificação no layout da planta, que representa uma porção menor dentro do balanço de massa, tem 95% de seus componentes com granulometria maior que 22,40 mm (vide [Tabela 18](#)). Nessa caracterização fica latente a presença de inox não magnético representando 2,9% do total, a fração de metálico ferroso é quase insignificante 0,2% e o *zorba* é 1,0 % do total. Há uma rica concentração de materiais poliméricos que somam 95% e quase nenhum material inerte. Esse seria o melhor produto para aplicação na coqueria se não fosse a restrição granulométrica limitada a 40 mm, logo seu reuso requer adequação de tamanho.

Tabela 18 – Composição física do *fluff* grosso após modificação no layout.

Abertura	Ferroso	Zorba	Inox	Plásticos	Borracha	Espuma	Madeira	Vidros	Pedras	Fundo ("terra")	Total
50,80 mm < x	0,0%	0,0%	0,4%	15,8%	5,9%	0,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	22,6%
45,00 mm < x < 50,80 mm	0,0%	0,0%	2,0%	22,3%	6,6%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	31,0%
37,50 mm < x < 45,00 mm	0,0%	0,0%	0,5%	2,6%	4,5%	0,1%	1,2%	0,0%	0,0%	0,0%	8,7%
31,50 mm < x < 37,50 mm	0,0%	0,3%	0,0%	5,3%	0,4%	0,0%	0,5%	0,0%	0,0%	0,0%	6,5%
26,50 mm < x < 31,50 mm	0,0%	0,7%	0,0%	3,6%	0,1%	1,2%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	5,7%
22,40 mm < x < 26,50 mm	0,1%	0,0%	0,0%	15,5%	0,1%	0,9%	3,7%	0,1%	0,0%	0,0%	20,4%
19,00 mm < x < 22,40 mm	0,0%	0,0%	0,0%	0,4%	0,7%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	1,2%
16,00 mm < x < 19,00 mm	0,0%	0,0%	0,0%	0,7%	0,5%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,3%
13,20 mm < x < 16,00 mm	0,1%	0,0%	0,0%	0,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,6%
9,50 mm < x < 13,20 mm	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
6,30 mm < x < 9,50 mm	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
4,76 mm < x < 6,30 mm	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,0%
3,35 mm < x < 4,76 mm	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2,36 mm < x < 3,35 mm	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
x < 2,36 mm	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,9%	0,9%
Total	0,2%	1,0%	2,9%	66,7%	18,7%	3,0%	6,6%	0,1%	0,0%	0,9%	100,0%

5.2.3 Caracterização do zorba

Após a caracterização física do *zorba* não foram realizadas análises químicas individuais de cada partícula que contemplam esses pontos de saída da planta, devido à condição física das partículas e o elevado custo relacionado à preparação e amostragem individual por partícula. Entretanto seguiu-se a orientação de classificação sugerida pelos fornecedores de equipamentos *Steinert* e *Metso*, separação por imantação e coloração (cinza e amarelo), conforme exemplo das Figuras 41 e 42. Logo, os materiais chamados cinza são os metálicos não ferrosos compostos majoritariamente por alumínio e suas ligas, estanho, inox não magnético e os materiais chamados amarelos são compostos por cobre e suas ligas como bronze e latão. O *fluff* é todo residual não metálico presente acima de 2,00 mm e abaixo dessa granulometria tem-se “terra” que é o fundo.

Na caracterização do *zorba* fino gerado na planta original (Tabela 19), observa-se que o metálico não ferroso (cinzas e amarelos) representa 88,9% do total do *zorba* fino, nível próximo ao valor trazido por *benchmarking* interno com equipamentos similares em plantas nos Estados Unidos e Canadá que é acima de 92% para o *zorba* fino e acima de 98% para o *zorba* grosso. A amostra tem majoritariamente metálico não ferroso cinza cuja maior parte é alumínio e suas ligas (82,4%) e o metálico não ferroso amarelo majoritariamente cobre e suas ligas é 6,5%. Há ainda a presença de não metálicos, chamado *fluff* (8,4%) e do fundo chamado “terra” (2,7 %), houve também uma pequena presença de material ferroso 0,1% (separado por imantação dos ‘cinzas’).

Tabela 19 – Caracterização do *zorba* fino antes da modificação da planta.

Abertura	Ferrosos	Zorba Amarelo	Zorba Cinza	"fluff"	Fundo ("terra")	Total
19,05 mm < X	0,0%	4,2%	53,6%	2,6%	0,0%	60,4%
4,00 mm < X < 19,05 mm	0,0%	2,3%	28,8%	3,6%	0,0%	34,7%
3,38 mm < X < 4,00 mm	0,0%	0,0%	0,0%	1,6%	0,0%	1,6%
2,00 mm < X < 3,38 mm	0,0%	0,0%	0,0%	0,6%	0,0%	0,7%
0,50 mm < X < 2,00 mm	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,3%	0,4%
X < 0,50 mm (fundo)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	2,3%	2,3%
Total	0,1%	6,5%	82,4%	8,4%	2,7%	100,0%



Figura 42 – Exemplo de metálico não ferroso cinza retirado da amostra de *zorba* fino antes da modificação da planta.



Figura 43 – Exemplo de metálico não ferroso amarelo retirado da amostra de *zorba* fino antes da modificação da planta.

Para caracterização do *zorba* grosso na configuração original da planta não foi realizada separação por faixa granulométrica devido à restrição das peneiras disponíveis, sendo o resultado mostrado na [Tabela 20](#). Destoando da análise de *zorba* fino, houve a presença de 2,3% de placas eletrônicas e agregadas ao material após separação e 1,1% de terra que foi retirado do fundo do recipiente de coleta. Há uma presença relevante de *fluff* (plásticos, borrachas, madeira e afins), conforme exemplo na [Figura 43](#). Um total de 86,9% de metálicos não ferrosos (cinzas e amarelos) foi encontrado, tendo uma maior relevância nos materiais amarelos em relação ao *zorba* fino. E entre os materiais cinzas foi realizada uma separação por densidade aparente, conforme [Gráfico 16](#), e os materiais com densidade mais elevada foram analisados no espectrômetro de emissão ótica, com objetivo de analisar a composição química do metálico, parte identificados como inox, o exemplo dessas amostras analisadas estão na [Figura 44](#) e representaram 1,5% da amostra.

Tabela 20 – Caracterização do *zorba* grosso antes da modificação da planta.

Ferrosos	Zorba Amarelo	Zorba Cinza	"fluff"	Placas Eletrônicas	Fundo ("terra")	Total
0,0%	10,7%	76,2%	9,7%	2,3%	1,1%	100%



Figura 44 – Exemplo de *fluff* encontrado no *zorba* grosso antes da modificação da planta.

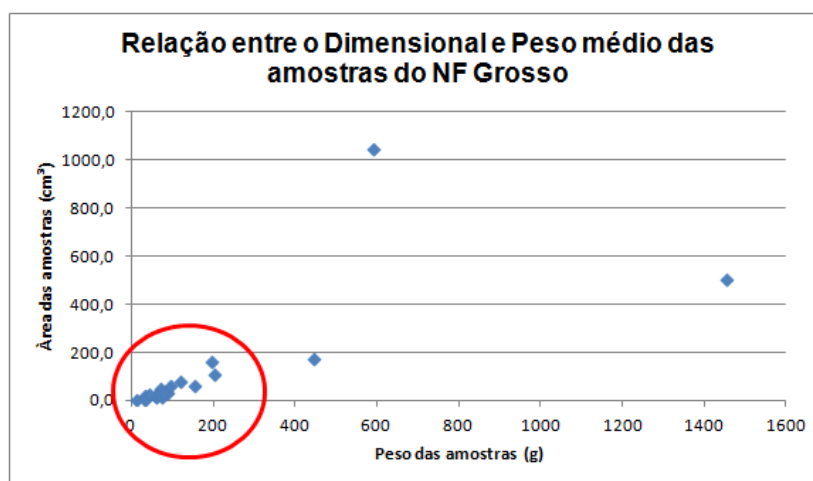


Gráfico 16 – Relação de dimensional e peso das amostras de *zorba* grosso.



Figura 45 – Exemplo de amostras analisadas no espectrômetro ótico da unidade.

A partir desses resultados ficou evidenciado que a presença dos não metálicos no *zorba* é significativa e deteriora a qualidade exigida internacionalmente para exportação.

Após as modificações no layout da planta de processamento, a qualidade do *zorba* aumentou significativamente. O *zorba* fino, cuja caracterização é mostrada na [Tabela 21](#), passou a atingir o percentual de 92,9% de metálicos não ferrosos (cinzas e amarelos). Ainda, reduziu em 58% a presença do fundo e em 48% o *fluff*, as placas eletrônicas encontradas nas amostras anteriores se apresentaram em 1,2%, não tendo sido encontrada presença de material ferroso, o que indica uma maior eficiência dos processos anteriores.

Tabela 21 – Caracterização do *zorba* fino após adaptação da planta de processamento.

Abertura	Zorba Cinza	Zorba Amarelo	Placas Eletrônicas	"fluff"	Fundo ("Terra")	Total
16,00 mm < x < 19,00 mm	36,0%	6,3%	0,6%	0,2%	0,0%	61,0%
12,00 mm < x < 16,00 mm	13,4%	2,1%	0,3%	2,4%	0,0%	20,4%
9,50 mm < x < 12,00 mm	15,2%	1,2%	0,1%	1,5%	0,0%	14,6%
8,00 mm < x < 9,50 mm	13,0%	0,7%	0,1%	0,3%	0,0%	7,9%
6,30 mm < x < 8,00 mm	4,1%	0,1%	0,0%	0,1%	0,0%	1,4%
4,76 mm < x < 6,30 mm	0,5%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,4%
3,35 mm < x < 4,76 mm	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,3%
2,36 mm < x < 3,35 mm	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
1,00 mm < x < 2,36 mm	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
1,00 mm (fundo) < x	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,2%	0,1%
Total	82,4%	10,5%	1,2%	4,7%	1,2%	100,0%

O *zorba* grosso também não sofreu separação granulométrica, como a amostra do mesmo material na condição anterior, após a modificação no equipamento o resultado encontrado é apresentado na **Tabela 22**, indicando uma evolução relacionada à qualidade. Houve uma redução expressiva do *fluff* em 49,5%, não havia nenhuma presença de terra ou material no fundo do recipiente. A proporção de material amarelo praticamente se manteve enquanto a porção cinza subiu de 76,2% para 83,3%.

Tabela 22 – Caracterização do *zorba* grosso após da modificação da planta.

Ferrosos	Zorba Amarelo	Zorba Cinza	"fluff"	Placas Eletrônicas	Fundo ("terra")	Total
0,0%	10,5%	83,3%	4,9%	1,4%	0,0%	100%

5.2.4 Caracterização da baía de metálicos ferrosos

Como apresentado anteriormente no balanço de massa (item 5.1), essa saída teve uma redução brusca de 6,5% para 0,9% do total em massa das amostras de resíduo, corroborando para o objetivo de equilibrar a quantidade de material destinada à peneira e separadores, a fim de garantir a qualidade nos coprodutos gerados.

A baía do material metálico ferroso é a saída do separador magnético que antecede a peneira, e a caracterização do material desta corrente está apresentada na **Tabela 23**. O resultado da caracterização granulométrica na configuração original deixa evidente a baixa eficiência do separador: 68,3% de ferroso (coletado por imantação). Há ainda a perda de

1,4% de metálicos não ferrosos (amarelos e cinzas), uma porção significativa de materiais não metálicos acima de 2,00 mm tido como “*fluff*” com 7,9% e composto por plásticos, espumas, borrachas, vidros, pedras e outros, e ainda uma quantidade significativa de finos abaixo de 2,00 mm, majoritariamente terra 22,4%.

Tabela 23 – Caracterização do material da baía de metálico ferroso antes da modificação do processo.

Abertura	Ferroso	Zorba Amarelos	Zorba Cinzas	"fluff"	Fundo ("terra")	Total
19,05 mm < x	30,4%	0,8%	0,3%	2,9%	0,0%	34,4%
4,00 mm < X < 19,05 mm	37,6%	0,1%	0,2%	4,3%	0,0%	42,2%
3,38 mm < X < 4,00 mm	0,3%	0,0%	0,0%	0,5%	0,0%	0,8%
2,00 mm < X < 3,38 mm	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,1%
0,50 mm < X < 2,00 mm	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,7%	1,7%
X < 0,50 mm (fundo)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	20,7%	20,7%
Total	68,3%	0,9%	0,5%	7,9%	22,4%	100,0%

Após alteração no layout da planta houve uma redução significativa de outros materiais presentes como mostrado na [Tabela 24](#), o metálico ferroso ficou concentrado em mais de 95%, todo material se apresentou abaixo de 26,5 mm e a presença de não ferrosos caiu para 0,6%, o fundo agora representa apenas 2% do total e os não metálicos ou *fluff* em 2,1%. Fica evidenciada, assim, a evolução na qualidade desse material.

Tabela 24 – Caracterização do material da baía de metálico ferroso após modificação do processo.

Abertura	Ferroso	Zorba Amarelos	Zorba Cinzas	"fluff"	Fundo ("terra")	Total
50,80 mm < x	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
45,00 mm < x < 50,80 mm	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
37,50 mm < x < 45,00 mm	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
31,50 mm < x < 37,50 mm	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
26,50 mm < x < 31,50 mm	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
22,40 mm < x < 26,50 mm	1,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,2%
19,00 mm < x < 22,40 mm	7,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	7,8%
16,00 mm < x < 19,00 mm	1,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,0%
13,20 mm < x < 16,00 mm	11,9%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	11,9%
9,50 mm < x < 13,20 mm	19,0%	0,0%	0,0%	0,4%	0,0%	19,4%
6,30 mm < x < 9,50 mm	23,2%	0,0%	0,0%	0,7%	0,0%	23,9%
4,76 mm < x < 6,30 mm	26,9%	0,0%	0,3%	0,4%	0,0%	27,6%
3,35 mm < x < 4,76 mm	4,3%	0,2%	0,1%	0,6%	0,0%	5,2%
2,36 mm < x < 3,35 mm	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
x < 2,36 mm	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	2,0%	2,0%
Total	95,3%	0,2%	0,4%	2,1%	2,0%	100,0%

5.2.5 Caracterização do material desviado do despoeiramento

O despoeiramento consiste de um ciclone que tem como característica intrínseca succionar materiais de baixa densidade. A caracterização simplificada desta corrente é apresentada na [Tabela 25](#). Foi observada uma condição distinta das outras saídas, uma presença considerável de espuma conforme [Figura 45](#), que foi separada dos outros materiais representando 9,5% do total da amostra. Há a presença de um fundo considerável de 20,2%, o que impacta na redução do passante da peneira. Os metálicos exemplificados na [Figura 46](#), mesmo em quantidades pequenas formam emaranhados com a espuma e plásticos maleáveis que agregariam na peneira prejudicando o peneiramento, [Figura 47](#). A retirada dessa condição antes do processamento da peneira é importante para auxiliar na estabilidade e eficiência da mesma.

Tabela 25 – Perfil do resíduo desviado do sistema de despoeiramento.

Abertura	Ferroso	Zorba Cinza	Zorba Amarelo	"fluff"	Fundo ("terra")	Total
50,80 mm < x	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
45,00 mm < x < 50,80 mm	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
37,50 mm < x < 45,00 mm	0,0%	0,0%	0,0%	0,8%	0,0%	0,8%
31,50 mm < x < 37,50 mm	0,0%	0,0%	0,0%	3,4%	0,0%	3,4%
26,50 mm < x < 31,50 mm	0,0%	0,0%	0,0%	1,7%	0,0%	1,7%
22,40 mm < x < 26,50 mm	0,0%	0,0%	0,0%	3,4%	0,0%	3,4%
19,00 mm < x < 22,40 mm	0,0%	0,0%	0,1%	3,1%	0,0%	3,2%
16,00 mm < x < 19,00 mm	0,1%	0,0%	0,0%	3,9%	0,0%	4,0%
13,20 mm < x < 16,00 mm	0,0%	0,0%	0,0%	2,3%	0,0%	2,3%
9,50 mm < x < 13,20 mm	0,1%	0,0%	0,2%	6,9%	0,0%	7,2%
6,30 mm < x < 9,50 mm	0,1%	0,1%	0,1%	15,7%	0,0%	16,0%
4,76 mm < x < 6,30 mm	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
3,35 mm < x < 4,76 mm	0,0%	0,0%	0,0%	18,6%	0,0%	18,6%
2,36 mm < x < 3,35 mm	0,0%	0,0%	0,0%	19,2%	0,0%	19,2%
x < 2,36 mm	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	20,2%	20,2%
Total	0,3%	0,1%	0,4%	79,0%	20,2%	100,0%



Figura 46 – Exemplo da espuma contida nos resíduos não metálicos.



Figura 47 – Exemplo de metálico contido no resíduo do despoeiramento.



Figura 48 – Exemplo de material agregado à peneira.

A partir dos resultados das caracterizações apresentadas acima, fica constatado que as alterações no layout realizadas na planta de processamento de resíduo de *shredder*

elevaram a um novo patamar de qualidade os coprodutos das saídas dessas plantas, possibilitando desenvolvimentos para aplicação em nichos específicos. Em especial a condição do *fluff* fino, foco do presente estudo, e o enriquecimento do não ferroso, que possibilitou alcançar referências internacionais de qualidade e poder de mercado.

5.3 Análise do potencial calorífico do *fluff*

O ponto crucial do trabalho após a adequação da qualidade dos coprodutos gerados nas saídas da planta de processamento do resíduo do *shredder* é constatar o potencial calorífico do *fluff* fino, pois o potencial calorífico é um parâmetro relevante para medir a qualidade do *fluff* frente aos parâmetros internacionais e direcionar sobre a qualidade entregue. Para isso foram acionadas algumas empresas e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) demonstrou-se apto para dar suporte no estudo. Foram realizadas análises em 10 amostras distintas de *fluff* fino, coletadas nas amostras classificadas manualmente e oriundas da corrente de *fluff* fino após as modificações no layout da planta (item 5.2.2).

O resultado de umidade nas amostras é de 2,9%.

Os resultados do percentual de hidrogênio em massa, mostrados no [Gráfico 17](#), tem média de 7,35%. O comportamento das amostras apresentou alguma flutuação esperada face à característica inerente do material que possui variabilidade considerável, destacando-se um ponto relevante (amostra 8) em 9,74%. Isso fez com o limite inferior de controle (LIC) da medida seja 3,3%, enquanto o limite superior de controle (LSC) da medida seja 11,4%.

Já as medidas de enxofre total das amostras mostradas no [Gráfico 18](#) resultaram em um valor médio de 0,2%. A medida, porém, foi muito influenciada por dois pontos relevantes em 0,45% (amostra 1) e 0,58% (amostra 6), que fizeram com que as amostras tivessem um comportamento mais instável com LSC em 0,62% e o LIC em 0 (restringido valor negativo). Assim, tem-se que a presença de enxofre nas amostras se mostrou bastante variável, indicando elevada variabilidade na composição dos materiais existentes, porém inferior a 1%.

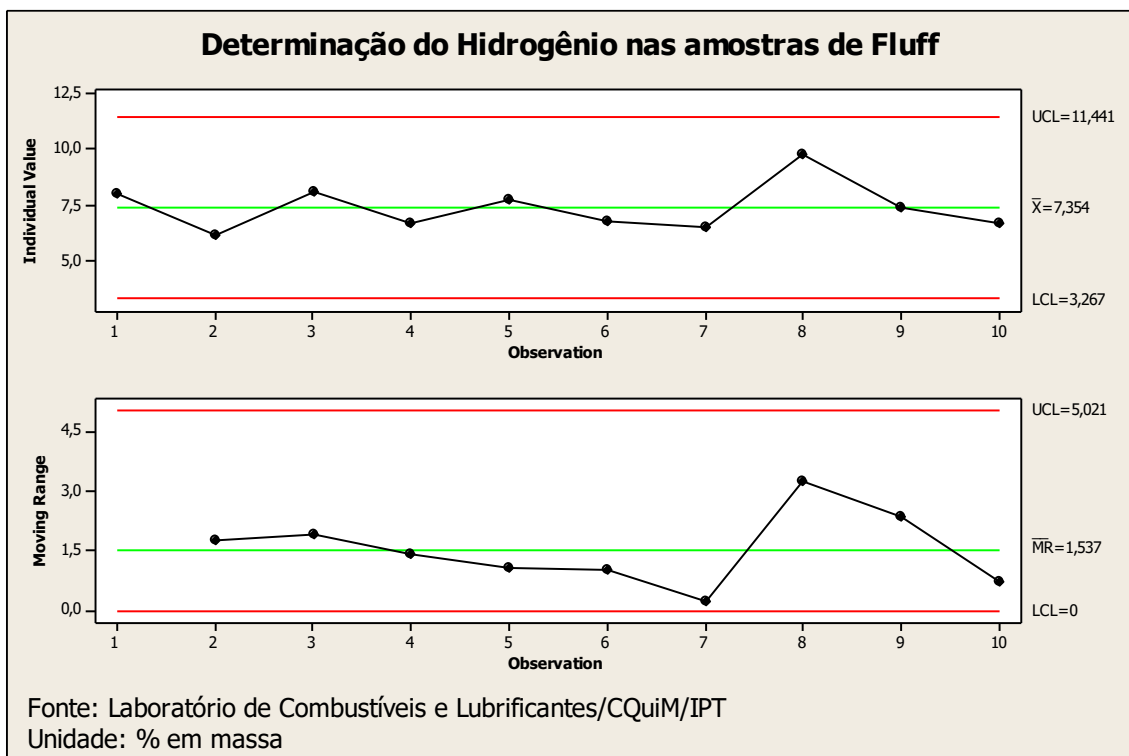


Gráfico 17 – Carta de controle do percentual de hidrogênio em massa nas amostras de *fluff*.

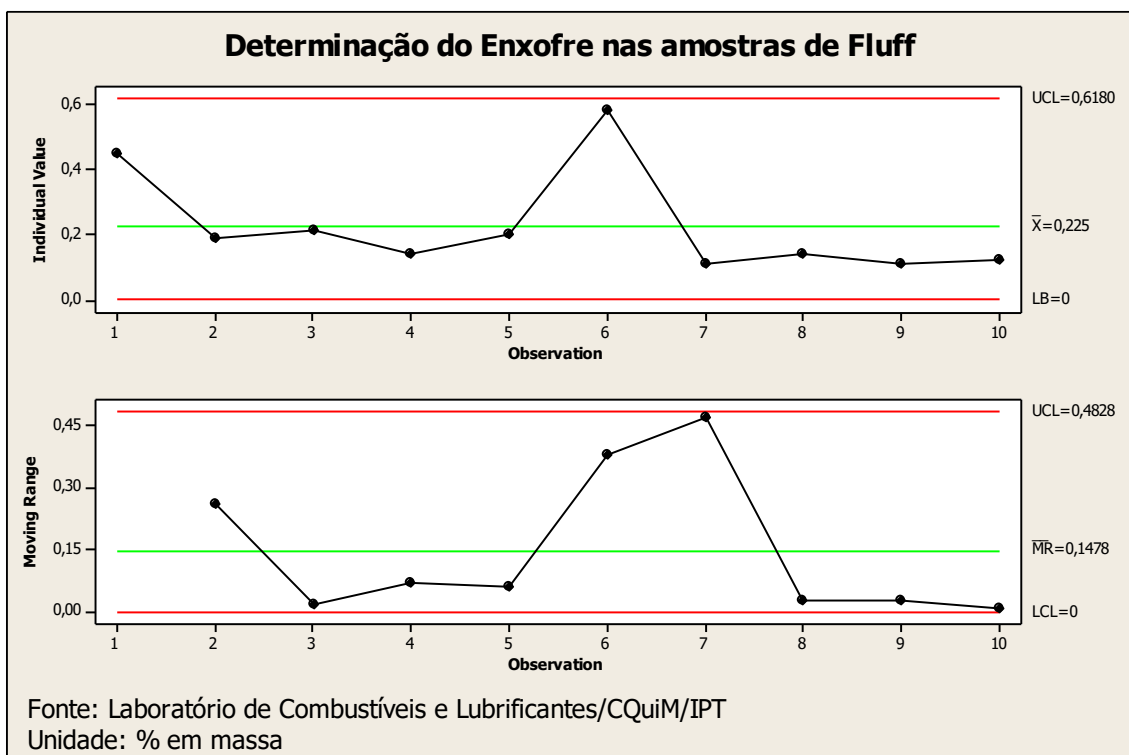


Gráfico 18 – Carta de controle do percentual de enxofre em massa nas amostras de *fluff*.

No [Gráfico 19](#) encontram-se apresentadas as medições para o poder calorífico superior que, para as amostras estudadas, apresentaram média de 26,9 MJ/kg e um limite inferior de controle de 23,3 MJ/kg, conforme indicado no gráfico e determinado pelo padrão estabelecido no Minitab (calculado através da média móvel - tamanho 2 - subtraído de três vezes o desvio padrão). Este valor corrobora a expectativa para medições de *fluff* disponíveis na literatura (Jody et al., 2006; Edo et al., 2013), atingindo resultados superiores aos do bagaço de cana e resíduos sólidos urbanos, listados na [Tabela 3](#), conforme esperado. A medição foi impactada apenas por uma amostra relevante (amostra 5). Considerando que esses dados são referentes à porção do *fluff* que representa 77,6% do total em massa da corrente de *fluff* fino, e que os outros materiais não têm poder calorífico (zero), infere-se que o valor do limite inferior de controle (LCL – *Low Control Limit*) na massa total seja 18,12 MJ/kg. Este seria um valor mais representativo para a corrente total de *fluff* fino a se considerar na condição das amostras enviadas para os testes em coqueria.

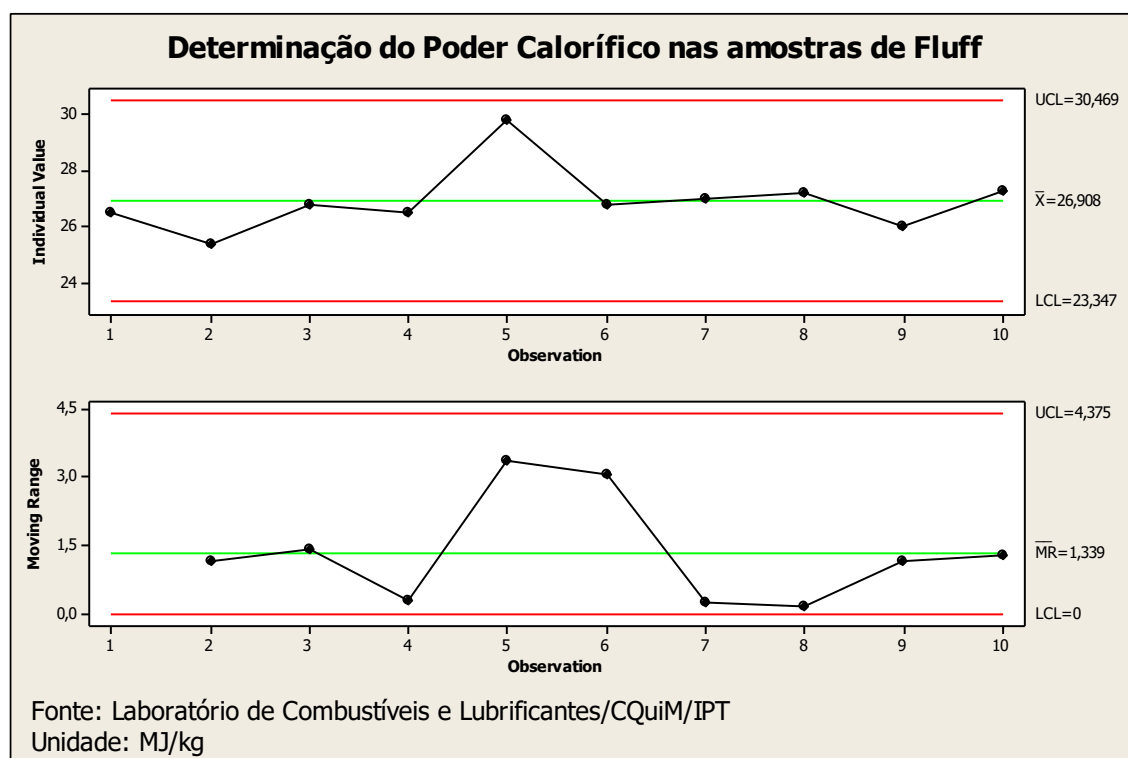


Gráfico 19 – Carta de controle do poder calorífico superior nas amostras de *fluff*.

A ótima reprodutibilidade da quantidade de calor produzida em 1 kg de *fluff* trouxe segurança para a realização de um teste piloto em coqueria, embora esse parâmetro não

esteja relacionado à capacidade de coqueificação que faz referência a valores internacionais de qualidade do *fluff* e complementam informações relevantes para validar sua aplicação.

5.4 Teste piloto em coqueria

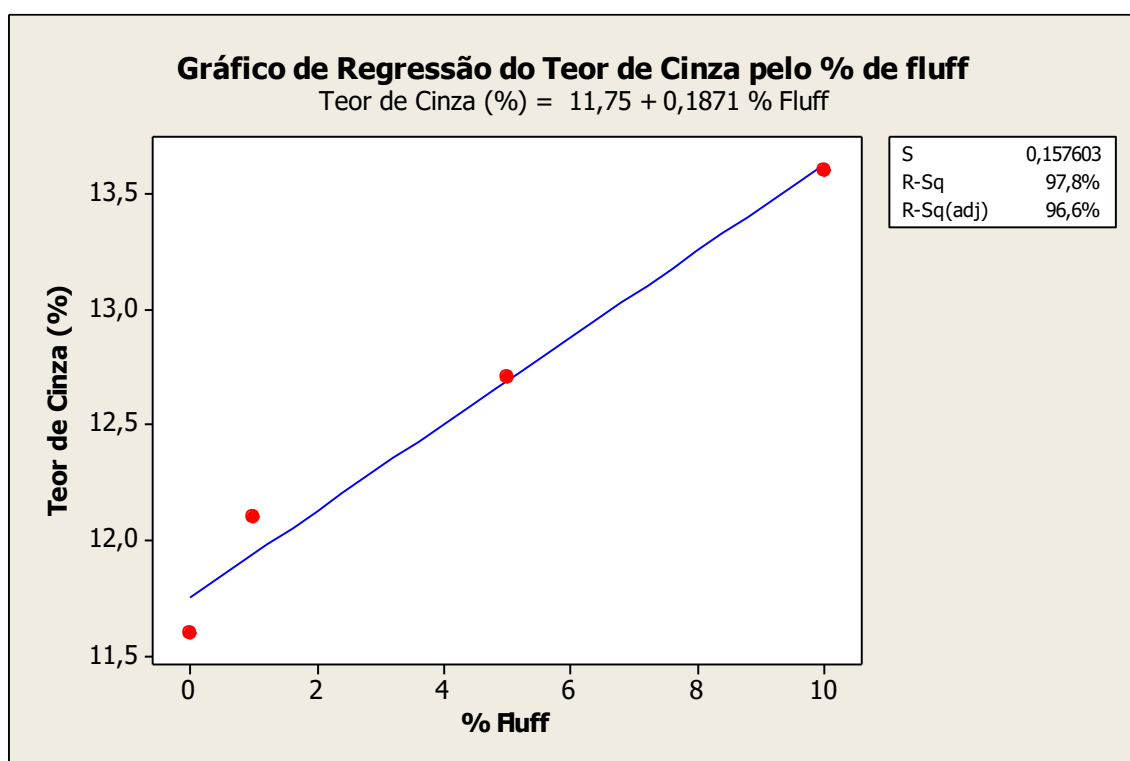
Nesse item são apresentados os resultados dos testes de caracterizações físico-química metalúrgicas utilizados para mensurar a viabilidade das diferentes misturas de carvão e carvão + *fluff*, comparando o carvão de referência citado na metodologia versus as misturas de carvão preparadas com diferentes porções de *fluff* (0%, 1%, 5% e 10% em massa). O *fluff* utilizado nos testes é o *fluff* fino obtido após modificação na planta de processamento do resíduo de *shredder*, cujas características são apresentadas anteriormente. Visualmente a mistura *fluff* + carvão já coqueificado apresenta características similares ao coque padrão (produzido apenas com carvão), entretanto algumas pedras possuem materiais agregados visíveis, como o exemplo da [Figura 48](#).



[Figura 49](#) – Exemplo do coque calcinado com adição de *fluff*.

5.4.1 Análise química – Teor de cinzas

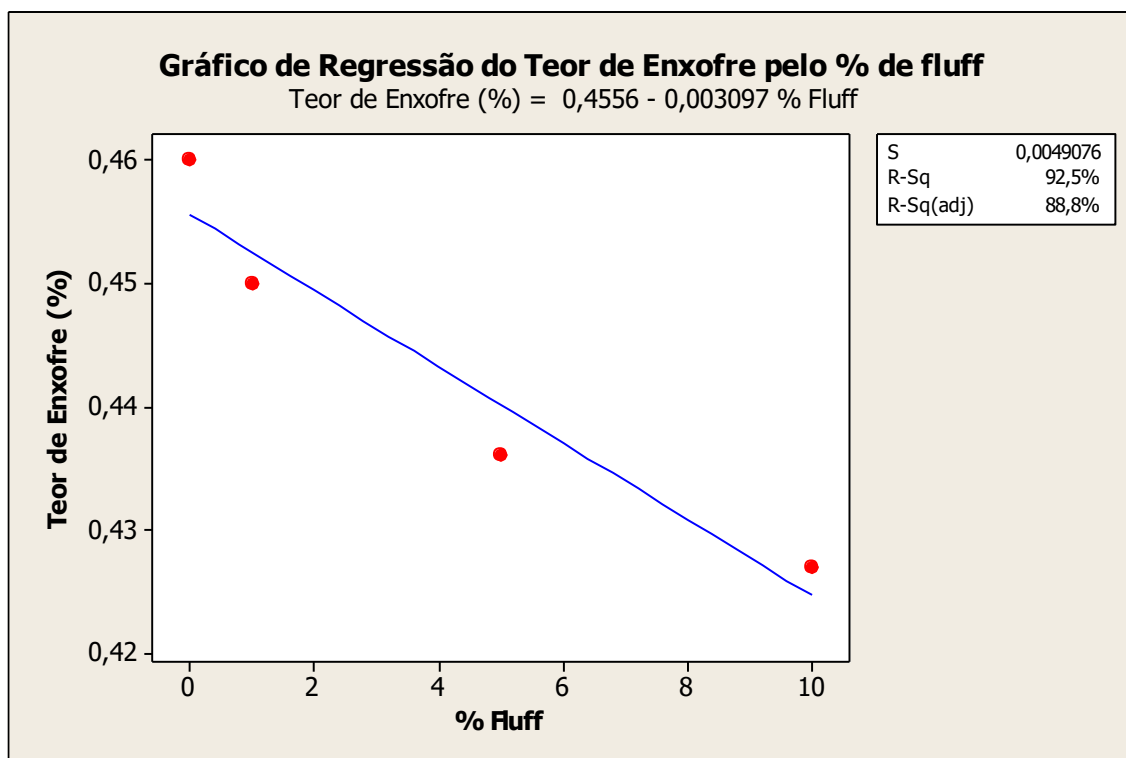
Pode-se evidenciar pelo [Gráfico 20](#) um aumento linear do teor de cinzas de acordo com o aumento no teor de *fluff*, seguindo uma correlação forte com coeficiente de determinação de 97,8%, explicando bem a baixa variabilidade dos dados ao redor da média. Significa dizer que há uma tendência de aumento das cinzas com a maior porção de adição do *fluff*. Como a geração de cinzas no processo de coqueificação não é desejada, pois reduz a concentração de carbono fixo e aumenta a relação escória/gusa aumentando o consumo de coque, tem-se aqui uma desvantagem. O aumento das cinzas, porém, era esperado devido ao percentual de fundo encontrado na amostra. Seguindo a curva de regressão linear, a medição de cinzas em uma concentração de 100% de *fluff* seria de 30,5%, bem acima da referência para um coque base, de até 13,5% (vide [Tabela 12](#)). Na ausência de *fluff*, houve 11,6% no teor de cinzas para o carvão puro usado no teste. Assim, para este carvão e com base na referência para o teor de cinzas, a adição de *fluff* estaria limitada a até 10%.



[Gráfico 20](#) – Regressão do teor de cinzas (%) versus percentual de *fluff* na mistura de carvão.

5.4.2 Análise química – Teor de enxofre

De maneira qualitativa, observa-se que o aumento na adição de *fluff* no coque resultou em redução do enxofre, consequência direta do maior teor de enxofre contido no coque (de 0,6% para o coque MGC como referência, vide [Tabela 9](#)) do que no *fluff* (de apenas 0,2%, vide análise mostrada no [Gráfico 20](#)). Os valores numéricos mostrados no [Gráfico 21](#) apresentaram um ajuste linear adequado (coeficiente de determinação: 92,5%), demonstrando uma tendência clara de comportamento. A redução no enxofre é uma vantagem, pois maiores teores de enxofre resultam em aumento no consumo de energia e afetam negativamente a qualidade do gusa produzido. Portanto, no tocante ao teor de enxofre, não houve limite para o uso do *fluff* nas condições estudadas, de até 10%.



[Gráfico 21](#) – Regressão do teor de enxofre (%) versus percentual de *fluff* na mistura de carvão.

5.4.3 Análise metalúrgica – Reatividade do coque ao CO₂ (*coke reactivity index* – CRI)

O índice de reatividade do coque (CRI) é determinado pela relação entre a perda de massa da amostra em relação a sua massa inicial, após a reação de Boudouard ($\text{CO}_2 + \text{C} = 2 \text{CO}$) através da eliminação de materiais voláteis, em condições controladas, seguindo a norma citada na metodologia. Assim, quanto maior a reatividade, maior a perda em massa, prejudicando o desempenho do alto-forno pelo aumento do consumo de coque. Os resultados de reatividade obtidos no presente estudo mostrados no [Gráfico 22](#) não apresentaram linearidade aceitável, logo foi apresentado um ajuste quadrático (coeficiente de determinação: 98,4%). O comportamento verificado experimentalmente não sugere erros de método ou medida, pois os resultados das duplicatas foram iguais em todos os pontos. Logo, sugere que o índice de reatividade apresente um comportamento incomum com o aumento de *fluff*, indicando uma inflexão quando o % de *fluff* está próximo de 6%, gerando uma recuperação do indicador a partir desse valor. A reatividade inicialmente tende a aumentar com a adição do *fluff* na mistura com carvão, e com apenas 1% de *fluff* aumentou-se 6,6% a reatividade da mistura; a presença de metálicos ferrosos no *fluff* fino mesmo em forma de óxido, podem reduzir durante a coqueificação obtendo-se ferro metálico que é um catalizador da reação de Boudouard, podendo provocar um aumento no CRI, sendo pois uma desvantagem. Essa característica, contudo, é esperada pois o *fluff* é composto em sua maior parte por polímeros que podem perder mais de 45% de sua massa, o que aumenta a porosidade (da Silva et al., 2018). Assim, com base no parâmetro CRI, o uso de *fluff* deve ser limitado ao mínimo possível, que nas condições estudadas é de apenas 1%.

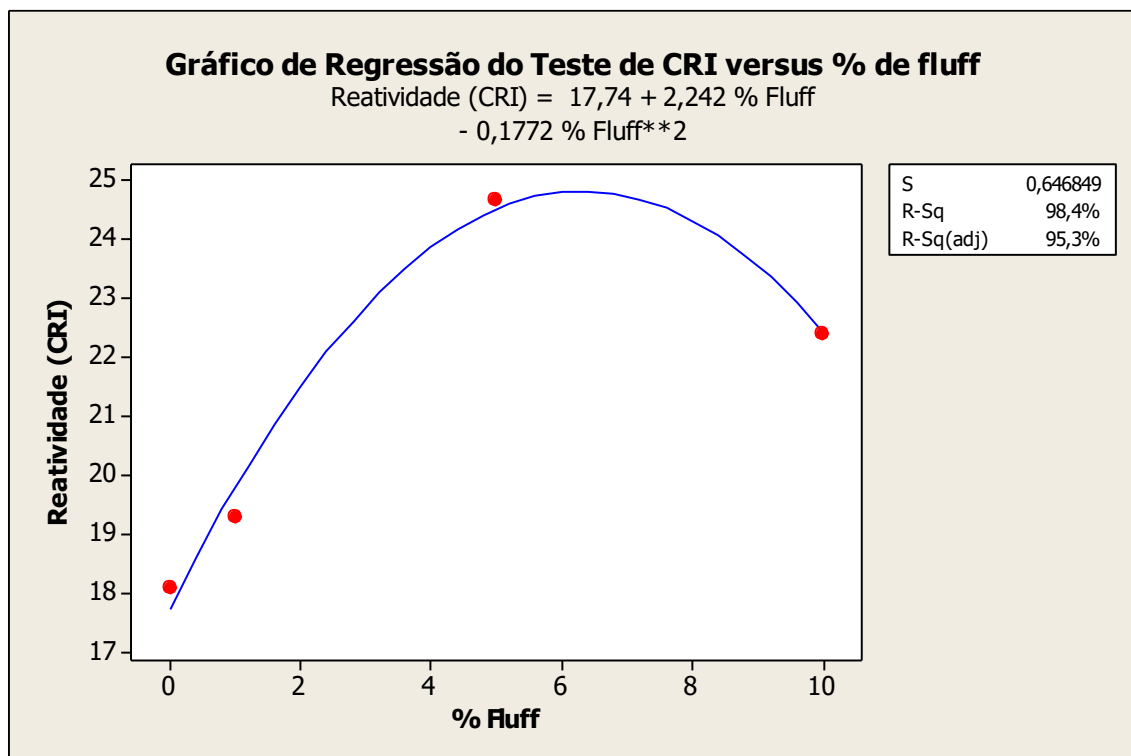


Gráfico 22 – Regressão quadrática da reatividade do coque (CRI) versus percentual de *fluff* na mistura de carvão

5.4.4 Análise metalúrgica – Resistência mecânica do coque após reação com CO₂ (*Coke Strength after Reaction* - CSR)

O teste de resistência mecânica após reação com CO₂ (CSR) consiste em colocar a mesma amostra utilizada no CRI submetida a 600 revoluções a 20 rpm em um tambor, os detalhes constam na norma ASTM – D 5341. Os resultados mostrados no [Gráfico 23](#) indicam que o aumento do *fluff* na mistura de carvão promove uma queda brusca na resistência mecânica, por exemplo, com apenas 1% de *fluff* na mistura reduz-se 4,2% na resistência mecânica, resultado que limita maiores adições. O valor de referência na [Tabela 12](#) é 75,4% e no teste da planta piloto o carvão base atingiu 76,6% (+1,6% da referência), com 10% de *fluff* na mistura obteve-se 69,2% de resistência. Essa queda esperada é prejudicial, pois quanto maior o CRI, maior a degradação quando o material é submetido a esforço, como o teste de resistência (Moura, 2017), pela perda da propriedade mecânica que desestabiliza a integridade das estruturas das camadas dentro do alto-forno. Como o comportamento experimental exibido resultou em baixa regressão linear, foi apresentada boa regressão quadrática (coeficiente de determinação: 97,7%) com indicação de um ponto

de inflexão entre 6-8 % *fluff*; contudo, para a faixa de adição de *fluff* estudada, parece haver manutenção da resistência mecânica em um patamar de 68-69% a partir de 5% de adição de *fluff*.

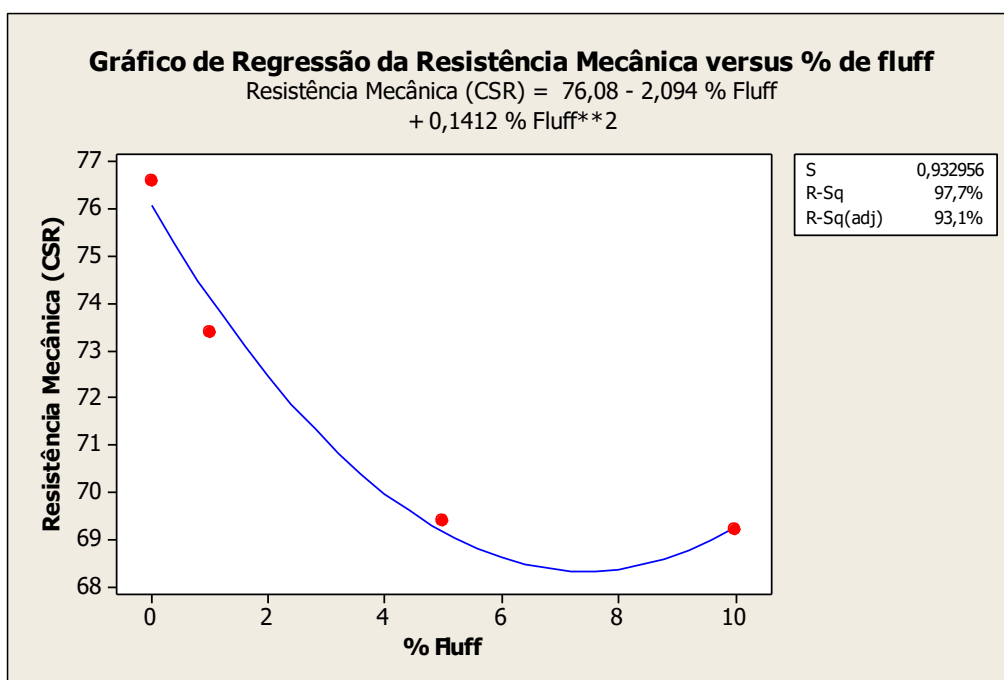


Gráfico 23 - Regressão quadrática da resistência mecânica (CSR) versus percentual de *fluff* na mistura de carvão

5.4.5 Drum Index (DI) – Resistência mecânica a frio

O teste de resistência a frio, para simular as condições do coque nas regiões superiores dos altos-fornos, consiste em mensurar o percentual remanescente de coque com granulometria abaixo de um determinado valor de peneira após tamboramento em um determinado número de revoluções (Sakimoto et al., 2016). De acordo com os dados mostrados no **Gráfico 24**, observa-se redução do índice de tamboramento (DI) em tendência linear aceitável (coeficiente de determinação: 97,8%) com o aumento na adição de *fluff* ao carvão, o que é desvantajoso. Uma possível explicação para esse comportamento pode ser visto na Figura 25 uma diferença granulométrica significativa no material homogeneizado (carvão+ *fluff*), o que após coqueificação da mistura pode significar a formação de poros grandes já que apenas 20% do plástico é coqueificável comparado aos

75% do carvão (Goto et al, 2002). Este comportamento deve-se aos fatores de perda de resistência a frio do coque, salientado no trabalho da *Kansai Coke and Chemicals Co.*: as quebras superficiais, causadas principalmente por porosidade e as quebras volumétricas causadas por descontinuidade do material, ambas latentes na mistura do *fluff* (Sakimoto et al, 2016). Com 1% do *fluff* há uma queda de apenas 0,5% na resistência ao tamboramento do carvão base, que alcançou um valor de 84,8% próximo ao da [Tabela 12](#) de referência cujo DI é 84,67%, que torna esse ponto interessante para testes, pois a adição de 1% de *fluff* praticamente não altera o comportamento dessa resistência.

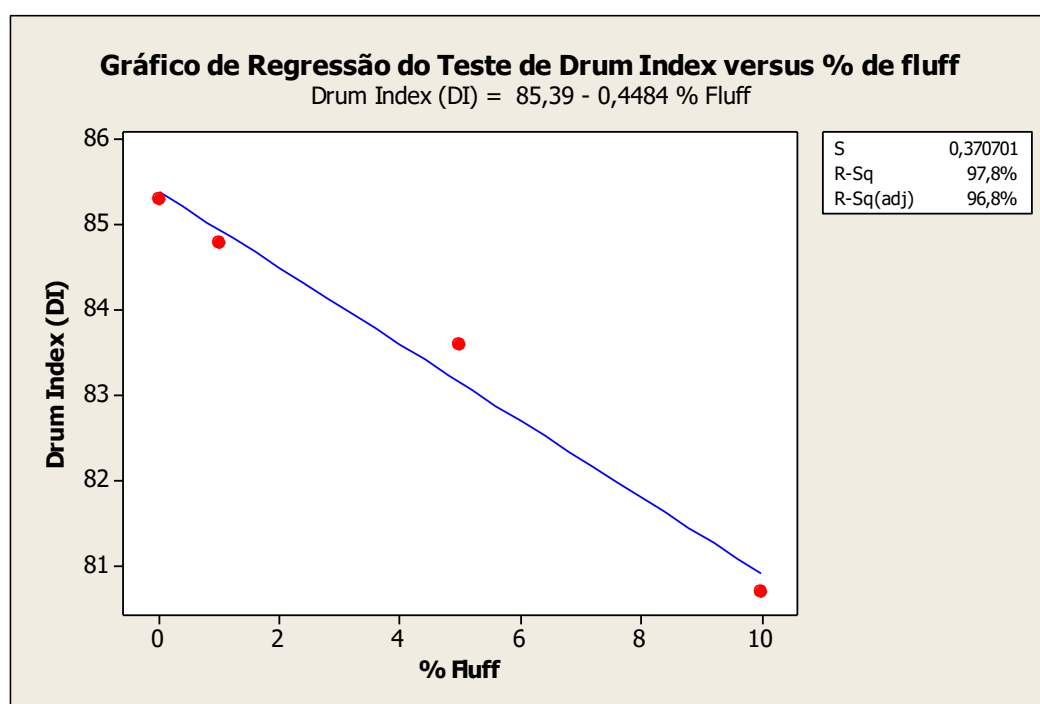


Gráfico 24 – Regressão *Drum Index* versus percentual de *fluff* na mistura de carvão.

5.4.6 Viabilidade financeira da mistura de carvão - Valor em Uso (VIU)

A partir dos resultados obtidos anteriormente com as análises química (teor de cinza e teor de enxofre), análise metalúrgica (reatividade do coque ao CO₂ e resistência mecânica do coque após reação com CO₂) e análise física (índice de tamboramento), somadas outras informações não explicitadas no trabalho como rendimento global, materiais voláteis, e outras é possível calcular o valor em uso (VIU), que indica a viabilidade financeira da adição de *fluff* ao carvão. Embora os cálculos não possam ser detalhados no trabalho por questões de confidencialidade, a [Tabela 26](#) mostra parte da base

de dados utilizada nos cálculos do valor em uso, além das informações fornecidas na metodologia. Chegou-se à conclusão de que através do valor em uso o *fluff* e seus custos agregados não poderiam custar mais de 24% da mistura de carvão.

Tabela 26 – Dados utilizados para cálculo do Valor em Uso do *fluff*.

IDENTIFICAÇÕES	<i>FLUFF</i>	RENDIMENTO	QUALIDADE COQUE (%)			COQUE
	(%)	Global	CSR	DI	CZ	<i>BREEZE</i>
MGC + 1% <i>FLUFF</i>	1%	77,2	73,0	84,8	12,1	6,5
MGC + 5% <i>FLUFF</i>	5%	75,1	69,2	83,3	12,7	9,3
MGC + 10% <i>FLUFF</i>	10%	66,9	70,4	80,7	13,5	17,8

6. CONCLUSÕES

Ficou evidenciado que para o uso do *fluff* seguindo o viés proposto neste trabalho, de aproveitamento do seu potencial energético na coqueria, a preparação do resíduo na planta de processamento é condição obrigatória para garantir a qualidade mínima exigida pelo cliente em potencial e reprodutibilidade dos resultados. Em outras palavras, o *fluff* deve apresentar granulometria e qualidade (alto teor de material com alto poder calorífico e livre de impurezas) adequadas. Para atender tal exigência, foi necessária a realização de mudanças na planta de processamento do resíduo de *shredder*, às quais promoveram uma redução significativa dos resíduos processados na planta, com o desvio do material oriundo do despoeiramento para 51,3% do total na condição original.

Após a modificação houve um aumento na granulometria média do passante mais fino chamado “terra” evidenciado pela redução de 10,5% do fundo (< 2 mm) gerado. Houve também uma redução expressiva do fundo (“terra”) no *fluff* fino em 65% e concentração na granulometria de interesse (> 45 mm). No *zorba* fino houve uma evolução qualitativa de 87,9% de metálicos não ferrosos para 92,9% e no *zorba* grosso de 86,9% para 93,8%, atingindo referências internacionais de qualidades. A redução brusca dos metálicos ferrosos de 6,5% para 0,9% mostrou que esses materiais não são oriundos da ineficiência dos tambores magnéticos, mas pela regulação da sucção do sistema de despoeiramento, uma oportunidade levantada a partir desse trabalho. Em suma, comparando-se as despesas e receitas advindas desta ação, constatou-se um saldo positivo com aumento de 34,4% no resultado financeiro desse balanço.

A análise do poder calorífico evidenciou uma ótima reprodutibilidade e um limite inferior de controle elevado, sendo obtido um valor de 23,35 MJ/kg para amostra pura de *fluff*. Considerando esse valor na massa total da amostra (77,5%), tem-se um mínimo de 18,12 MJ/kg, valor interessante para estudos de aproveitamento energético, superior a outros resíduos como bagaço de cana e resíduos sólidos urbanos.

Nas avaliações físico-químicas e metalúrgicas do coque verificou-se um aumento das cinzas, um aumento da reatividade até aproximadamente 6% de *fluff* na mistura e uma redução na resistência mecânica após reação com o CO_2 que são condições prejudiciais ao bom desempenho do coque no alto-forno com o uso do *fluff*, todavia houve bons resultados para o teor de enxofre e no índice de tamboramento na proporção de 1% de *fluff*, em que o valor alcançado 84,8% é próximo ao valor de referência 84,7% que se mostra satisfatório.

Em linhas gerais, adições de 1% de *fluff* se mostraram interessantes e devem promover pouco impacto na operação, com base nos parâmetros analisados.

Ainda com base nos resultados obtidos, se pode concluir que o uso do *fluff* em coqueria é viável, nas condições de qualidade definidas nesse trabalho para o *fluff* quando o mesmo representar com todos os custos secundários (transporte, processamento, preparação) até 24% do preço da mistura de carvão, o que depende fortemente do preço da mistura, do custo de processamento, movimentação e transporte do resíduo, ou seja, do cenário econômico do setor.

Toda conjuntura descrita acima criou um potencial de *saving* (arrecadação + redução dos custos de destinação) de + 35%, ou seja, a partir dos preços e custos de destinação, dos novos volumes gerados, pode-se reduzir destinação para aterro e criar rotas sustentáveis internas e externas, desenvolvendo novos *steakhoders*. Para consolidação desse novo nicho é necessária a consolidação de toda a prática operacional que depende da escolha da estratégia da indústria e investimento em prospecção de mercado.

Apesar do resultado promissor alcançado neste estudo, é importante frisar que o *fluff* contém quantidades consideráveis de componentes clorados, como PCBs (bifenis policlorados) e PVC (policloreto de vinila), que podem liberar substâncias nocivas quando incinerados, como HCl e outros gases clorados, dioxinas e furanos (Zhang et al., 2015). Tais emissões são associadas à combustão em baixa temperatura. Por isso, para reuso energético do *fluff* é necessário realizar combustão à alta temperatura (cerca de 1100°C). Neste contexto, embora a aplicação estudada esteja em aderência a esta recomendação ($T > 1000^{\circ}\text{C}$ foi usada), não foi realizada no presente trabalho nenhuma avaliação de contaminação decorrente da queima de *fluff*, que se faz obrigatória caso haja a intenção de implementação desta solução em larga escala.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Sakimoto, N., Takanohashi, T., Sakai, K., Shishido, T., Yoshida, T., & Okuyama, N. (2016). Effect of Volume Breakage Due to DI Measurement on Pore Structure in Coke. *ISIJ International*, 56(11), pp. 1948 - 1955. Acesso em 21 de 03 de 2020, disponível em https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/56/11/56_ISIJINT-2015-388/_pdf/-char/en
- Aggregates Equipment, Inc. (31 de julho de 2019). *AEI*. Fonte: AEI Solutions: <http://aeiscreens.com/solutions/bivi-tec/>
- Alfa Laval Aalborg. (2017). *Poder Calorífico Inferior*. Acesso em 16 de maio de 2017, disponível em <http://www.aalborg-industries.com.br/downloads/poder-calorifico-inf.pdf>
- Algix. (2013). *Addressing end-of-life issues of bioplastics*. Acesso em 16 de maio de 2017, disponível em <http://algix.com/sustainability/post-consumer-options>
- APME. (1999). A material for choice for automotive industry. *Association of Plastic Manufactures in Europe*. Fonte: <http://www.resol.com.br/textos/Plastics,%20a%20material%20of%20choice%20for%20the%20automotive%20industry.pdf>
- Baker, B. A., Brookside, N., Kenneth, L., Woodruff, Morrisville, P., Naporano, J. F., & Essex, F. N. (1995). *United States Patente Nº 5443157*.
- Batista, D. C. (2014). Classificação e caracterização dos resíduos do beneficiamento da sucata de ferro e aço utilizada no processo siderúrgico para identificação de viabilidade de aplicações. *Tese de Mestrado*. São Carlos, São Paulo, Brasil.
- BP Statistical Review of World Energy. (junho de 2018). Fonte: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf>
- Câmara, G. G. (2017). *CARACTERIZAÇÃO DAS FRAÇÕES DO RESÍDUO DO TRITURADOR DE SUCATA DE UMA SIDERÚRGICA*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais - PPGE3M, Porto Alegre. Acesso em 20 de Janeiro de 2020, disponível em <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/180144/001069492.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Casagrande, C. M. (Abril de 2010). AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CRI E CSR DO COQUE PRODUZIDO EM FORNO INDUSTRIAL, FORNO DE SOLEIRA AQUECIDA E BOX TEST. *PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS, UFOP*. Ouro Preto, MG.
- Correia, D. F. (02 de julho de 2009). Data Book do Extrator Magnético UME 115 130. *Manual de Instruções*.

- da Silva, G. L., Haneiko, B. N., Reis, T. C., & Carias, M. d. (04 de Outubro de 2018). CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS DE CARVÕES E DO COQUE COM ADIÇÃO DE PNEU INSERVÍVEL. *48º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas*.
- Dalberg Advisors. (2019). *SOLUCIONAR A POLUIÇÃO PLÁSTICA: TRANSPARÊNCIA E RESPONSABILIZAÇÃO*. Genebra, Suíça. Fonte: <https://www.wwf.org.br/?70222/Brasil-e-o-4-pais-do-mundo-que-mais-gera-lixo-plastico>
- Dietrich Hte, V., & Josef Weber, M. (3 de setembro de 1991). *United Stated Patente Nº 5044567*.
- Dobbs, S. (24 de Agosto de 2017). *Why sorting through residue is worth it*. Fonte: MRW: <https://www.mrw.co.uk/knowledge-centre/why-sorting-through-residue-is-worth-it/10021607.article>
- Edo, M., Aracil, I., Font, R., Anzano, M., Fullana, A., & Collina, E. (2013). Viability study of automobile shredder residue as fuel. *Journal of Hazardous Materials*(260), 819 - 824.
- EEA. (19 de março de 2013). *Typical charge (gate fee and landfill tax) for legal landfilling of non-hazardous municipal waste in EU Member States and regions*. Fonte: Europe Environment Agency: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/typical-charge-gate-fee-and>
- EPE. (2008). *Avaliação preliminar do aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos de Campo Grande, MS*. Nota Técnica DEN 06/08, Empresa de Pesquisa Energética, Série de Recursos Energéticos, Rio de Janeiro.
- Gent, M., Menéndez, M., Muñiz, H., & Torno, S. (2015). Recycling of fine, heavy fluff automobile shredder residue by density and differential fragmentation. *Waste Manangement*, pp. 421-233.
- Geyer, Roland ; Jambeck, Jenna R.; Law, Kara Lavender. (2017 de Julho de 2019). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*.
- GOLDSWORTHY et al. (2013). Value-in-use assessment for thermal and metallurgical coal. *The coal handbook*.
- Goto et al. (July de 2002). Plastics recycling by a coke-oven from waste plastics to chemical raw materials. *Nippon Steel Technical Report*, 86.
- Hwang, I., Yokono, S., & Matsuto, T. (2008). Pretreatment of automobile shredder residue (ASR) for fuel utilization. *Chemosphere*, 71, pp. 879 - 885.
- IEDI - Instituto de Estudos para o Desenvolvimento Industrial. (18 de abril de 2019). O perfil setorial do retrocesso da indústria brasileira. *Carta IEDI*. Acesso em 04 de Janeiro de 2020, disponível em https://iedi.org.br/cartas/carta_iedi_n_920.html
- INMET. (31 de julho de 2019). *INMET - Instituto Nacional de Meteorologia*. Acesso em 31 de 07 de 2019, disponível em Instituto Nacional de Meteorologia: http://www.inmet.gov.br/sim/gera_graficos.php
- Institute of Scrap Recycling Industries - ISRI. (21 de Janeiro de 2016). Scrap Specifications Circular. *Guidelines for Nonferrous Scrap*, p. 14.

- Instituto Aço Brasil. (2016). Relatório de Sustentabilidade. Fonte:
<http://www.acobrasil.org.br/site2015/downloads/sustentabilidade2016/>
- Instituto Aço Brasil. (2018). Relatório de Sustentabilidade. Fonte:
<http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., & Law, K. L. . (2015). *Plastic waste inputs from land into the ocean*. *Science* 347(6223), 768-771.
- Jody, B., Daniels, E., Duranceau, C., J.A., P., & Spangenberg, J. (2006). *End-of-Life Vehicle Recycling: The State of the Art of Resource Recovery from Shredder Residue*. Argonne National Laboratory, Energy Systems Division - U.S. Department of Energy.
- John, A. L. (2009). Melhorias no desempenho dos injetores supersônicos em operação em um forno elétrico a arco. *Tese de Mestrado, PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS*.
- Keller, C. (2003). Optimized disposal of automotive shredder residue. *Municipal Solid Waste Management - Strategies and Technologies for Sustainable Solutions*, pp. 294 - 307.
- Kusaka, K., & Lida, S. (2000). Sorting, compaction and solification technologies for automobile shredder residue (ASR). *JSAE Review*(21), pp. 549 - 554.
- Leite, M. R. (2015). Avaliação do impacto do teor de enxofre de carvões metalúrgicos nos seus valores em uso. *UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG*.
- Lobato, N. C., Villegas, E. A., & Mansur, M. B. (27 de maio de 2015). Management of solid wastes from steelmaking and galvanizing processes: A brief review. *Resources, Conservation and Recycling*, pp. 46-57.
- Magazine Pro on Genesis Framework. (11 de July de 2020). *Coal Exports by Country*. Fonte: Word's Top Exports : <http://www.worldstopexports.com/coal-exports-country/>
- Mancini, G., Tamma, R., & Viotti, P. (2010). Thermal process of fluff: preliminary tests on a fluff-scale treatment plant. *Waste Management*, 30, pp. 1670 - 1682.
- McLemore, M. (julho de 2006). Launcher for Compressible Materials and Associated Process. *U.S. Patent 7.073.669*.
- Metso. (2016). Treinamento de Processamento de Sucata. Fonte: Materia Interno - Confidencial
- Moura, L. C. (2017). *UTILIZAÇÃO DE FLUFF NA MISTURA DE CARVÕES DE COQUERIA*. OURO BRANCO: INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS CAMPUS OURO BRANCO - IFMG.
- MTB-Recycling Manufacturing Engineering. (s.d.). *Shredders residues recycling*. Fonte: MTB-Recycling : <https://www.mtb-recycling.fr/en/shredding-residues-recycling.html>
- Nagel, J. R. (13 de agosto de 2018). An Analytical Model for Eddy Current Separation. *Elsevier - Minerals Engineering*, 277 - 285.
- Nomura, S. (08 de Janeiro de 2015). Use of Waste Plastics in Coke Oven: A Review. *The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)*.

- OECD. (2018). *Global Material Resources Outlook to 2060 Economic drivers and environmental consequences*. Acesso em 17 de february de 2019, disponível em <https://www.oecd.org/environment/waste/highlights-global-material-resources-outlook-to-2060.pdf>
- Oliveira, S. (2014). Avaliação energética de biomassa do bagaço de cana-de-açúcar em diferentes indústrias sucroenergéticas. *Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)*. São José dos Campos.
- PARLAMENTO EUROPEU E O CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA. (11 de novembro de 2008). *DIRECTIVA 2000/76/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO 4 DE DEZEMBRO DE 2000 RELATIVA À INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS*. Acesso em 19 de janeiro de 2020, disponível em <https://op.europa.eu/pt/publication-detail/-/publication/f735dd50-bee0-43e5-aad7-f6387270dcb9/language-pt>
- Passarini, F., Ciacci, L., Santini, A., Vassura, I., & Morselli, L. (2012). Auto Shredder residue LCA: implications of ASR composition evolution. *Journal of Cleaner Production*.
- Pessôa, V. A. (Fevereiro de 2018). Reciclagem e Reutilização de Materiais Poliméricos Plásticos. *Projeto de Graduação*. (E. Politécnica, Ed.) Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Pineau, J., Kanari, N., & Menad, N. (18 de Março de 2005). Representativeness of an Automobile Shredder Residue Sample for a Verification Analysis. *Waste Management*(25), 737 - 746.
- Plastics and Polymer Composites in Light Vehicles. (Julho de 2018). *Economics & Statistics Department of American Chemistry Council*, pp. 3-5.
- Plastics Europe. (2018). *Plastics - The Facts 2017*. Association of Plastics Manufacturers. Fonte: https://www.plasticseurope.org/application/files/6315/4510/9658/Plastics_the_facts_2018_AF_web.pdf
- Ribeiro, F. d., & Kruglians, I. (2014). A Economia Circular no contexto europeu: Conceito e potenciais de contribuição na modernização das políticas de resíduos sólidos. *XVI Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente (ENGEMA)*. São Paulo.
- Sakai, S., Yoshida, H., Hiratsuka, J., Vandecasteele, C., Kohlmeyer, R., Rotter, V., . . . Yano, J. (2014). An international comparative study of end-of-life vehicle (ELV) recycling systems. *Journal of Material Cycles and Waste Manangement*, 16, 1-20.
- Sakimoto et al. (2016). Effect of Volume Breakage Due to DI Measurement on Pore Structure in Coke. *ISIJ International*, Vol. 56 , pp. 1948 - 1955. Fonte: <file:///D:/Users/40002932/Documents/Mestrado/Mestrado/Tese/Drum%20Index.pdf>
- Sattler, H., & Laage, B. (2000). From Wast to products. *Proc. of R'2000 Recovery, Recycling, Reintegration Conference*. Toronto, Canada.
- Saxena, S., Rao, N., Rehmat, A., & Mensinger, M. (1995). Combustion and co-combustion of auto fluff. *Energy*, 20 (9), 877-887.

- Schmitt, R. (1990). *Automobile shredder residue: the problem and potential solutions*. Carnegie Mellon Research Institute, Center for Metals Production (CMP). Pittsburgh: CMP Report No. 90-1.
- Silva e Amorim et al. (01 a 03 de Outubro de 2019). UTILIZAÇÃO DE FLUFF NA MISTURA DE CARVÕES DE COQUERIA. *ABM Week 2019, 49º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas e 7º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro*.
- Silva, G. L. (Dezembro de 2016). Utilização de Moinha de Biorredutor e Pneu Inservível na Produção de Coque Metalúrgico. Ouro Preto, MG.
- Steinert . (2018). Fonte: Steinert Global: <https://steinertglobal.com/magnets-sensor-sorting-units/magnetic-separation/eddy-current-separators/>
- Steinert. (2017). *STEINERT FinesMaster*. Fonte: CESARO MAC IMPORT: <https://www.cesaromacimport.com/en/machines/2693-magnetic-separation/2724-steinert-finesmaster.html>
- The American Society of Mechanical Engineers. (16 de setembro de 1994). The Newell Shredder. *A National Historic Mechanical Engineering Landmark*.
- Trouve, G., Kaufman, A., & Delfosse, L. (1998). Comparative Thermodynamic and Experimental Study of Some Heavy Behavior during Automotive Shredder Incineration. *Waste Mangement 18*, (pp. 301 - 307).
- Wolman, M., Hubble, W., Most, I., & Natof, S. (1986). Power generation from automobile shredder waste fuel: Characterization and system feasibility. *National Waste Processing Conference. The American Society of Mechanical Engineers*, (pp. 91-103). New York.
- Wood, S., Fanning, M., Venn, M., & Whiting, K. (2013). Review of state-of-the-art waste-to-energy technologies. *WSP Group*.
- World Bank Group. (2019). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington DC. Acesso em 04 de janeiro de 2020, disponível em <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>
- World Population Review. (2019). *World Population Review*. Fonte: World Population Review: <http://worldpopulationreview.com/>
- Worldsteel Association. (2016). World Steel in Figure. *Anuário Mundial de Aço*. Fonte: <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:1568363d-f735-4c2c-a1da-e5172d8341dd/World+Steel+in+Figures+2016.pdf>
- Worldsteel Association. (2018). World Steel in Figure. pp. 7-13. Fonte: <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:f9359dff-9546-4d6b-bed0-996201185b12/World+Steel+in+Figures+2018.pdf>
- Yuan, Z., Bi, J., & Moriguichi, Y. (2006). The Circular Economy. A New Development Strategy in China. *INDUSTRIAL ECOLOGY IN ASIA*, 10. Fonte: <http://mitpress.mit.edu/jie>
- Zhang, M., Buekens, A., Jiang, X., & Li, X. (2015). Dioxins and polyvinylchloride in combustion and fires. *Waste Manangement and Reaserch*, pp. 630 - 643.

