

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS

ESTUDO DE CASO PARA PLANTA DE RECICLAGEM DE SUCATA

LUCAS JEAN WURZNER

Orientador: Prof. Dr. Vladmir Kronemberger Alves

OURO PRETO

2022

LUCAS JEAN WURZNER

ESTUDO DE CASO PARA PLANTA DE RECICLAGEM DE SUCATA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Minas

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Kronemberger Alves

OURO PRETO

2022



FOLHA DE APROVAÇÃO

Lucas Jean Wurzner

Estudo de caso para uma planta de reciclagem de sucata

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de XXXXXXXXXXXXXXXX

Aprovada em 14 de Outubro de 2022

Membros da banca

[Dr.] - Vladimir Kronemberger Alves - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)

[Dra.] - Priscila Maria Esteves Brandão - (Steinert Latinoamericana)

[Engenheira] - Thaís de Oliveira Soares - (Universidade Federal de Minas Gerais)

Vladimir Kronemberger Alves, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 08/11/2022



Documento assinado eletronicamente por **Vladimir Kronemberger Alves, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/11/2022, às 15:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0424917** e o código CRC **BF6B7F6C**.

Resumo

A reciclagem é um processo que vem se tornando cada vez mais necessário para um desenvolvimento sustentável. Com países como Alemanha, Inglaterra, China, Brasil e alguns estados dos Estados Unidos definindo o fim da produção de carros à combustão para a década de 2030, o processo de reciclagem automotiva terá um importante papel mundial. A reciclagem de sucata de forma geral compreende um material composto por metais ferrosos e uma parcela não ferrosa, comumente descrita como resíduos automotivos de *shredder* (*Automotive Shredder Residue – ASR*) que compreende metais não ferrosos, plásticos, tecidos, vidro, terra, papel, entre outros. Nem todos os compostos têm valor econômico para comercialização, sendo assim de extrema importância separar o material da melhor forma possível.

Neste trabalho, será descrito um processo de reciclagem de sucata, compreendendo a composição de sua alimentação, equipamentos utilizados para efetuar o processo de separação dos materiais de valor econômico dos materiais sem valor econômico e possíveis melhorias de fluxograma que poderão ser implementadas.

Ressalta-se o valor da reciclagem como agente da economia circular, promovendo não apenas a sustentabilidade, mas gerando valor econômico para a sucata que poderá servir de matéria prima e secundária na siderurgia. Esse conceito, conhecido como de lavra urbana, vem sendo cada vez mais levantado, em um contexto de alta preocupação ambiental, de forma a equilibrar os recursos finitos extraídos a partir do reuso de derivados desses recursos, como os metais ferrosos e não ferrosos.

Palavras-chave: Resíduo de *shredder*, ASR, metais ferrosos, metais não ferrosos, lavra urbana.

Abstract

Recycling is a process that has become increasingly necessary for sustainable development. With countries such as Germany, England, China, Brazil and some states of the USA setting the end of combustion car production for the 2030's, the process of recycling will play an important role worldwide. The recycling of Automotive Shredder Residue (ASR) involves, in general, a material composition of ferrous metals, non-ferrous metals, plastics, tissues, glass, earth, paper, and others. Not all compounds have economic value for commercialization, so it is extremely important to separate the material in the best way possible.

In this paper, a scrap recycling process will be described, comprising the composition of its feed, the equipment used to carry out the process of separating materials of economic value from materials without economic value and possible improvements in flow sheet that can be implemented.

The value of recycling as an agent of the circular economy is highlighted, promoting not only sustainability, but generating economic value for scrap that can serve as raw and secondary material in the steel industry. This concept, known as urban mining, has been increasingly raised, in a context of high environmental concern, in order to balance the extracted finite resources with the reuse of derivatives of these resources, such as ferrous and non-ferrous metals.

Key Words: Shredder residue, ASR, ferrous metals, non-ferrous metals, urban mining.

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Distribuição granulométrica.....	13
Tabela 2 - Composição do material	13

Lista de Figuras

Figura 5 - Fluxograma 1	12
Figura 2 - Esquema de funcionamento de um tambor magnético	16
Figura 3 - Desenho técnico de um extrator de sucata	16
Figura 4 - Esquema de funcionamento de uma polia magnética	17
Figura 5 - Desenho de uma peneira vibratória inclinada	19
Figura 6 – Catação manual	21
Figura 7 - Fluxo em um eddy current	22
Figura 11 - Fluxograma 2	25
Figura 12 - Esquema de um separador de ar zigzag	26
Figura 13 - Esquema de um separador de ar zigzag	27
Figura 14 - Geometrias de um separador de ar	27
Figura 15 - Sensor sorter	28
Figura 16 - Fluxo em um sensor sorter	29

Sumário

1. Introdução	7
2. Objetivo	8
3. Revisão da literatura	9
3.1. Lavra Urbana	9
3.2. Amostragem	10
4. Processo Atual	11
4.1. Descrição do Material	12
4.2. Descrição dos equipamentos.....	14
4.2.1. Shredder.....	14
4.2.2. Tambor magnético.....	15
4.2.3. Extrator de sucata.....	16
4.2.4. Polia magnética.....	17
4.2.5. Peneira Vibratória	18
4.2.6. Catação Manual	20
4.2.7. Eddy Current.....	21
5. Novos Equipamentos	24
5.1. Separador de ar	25
5.2. Sensor Sorter	28
5.2.1. Sensor de Indução	29
5.2.2. Sensor 3D.....	29
5.2.3. Sensor de Cores	30
5.2.4. Sensor Infravermelho	30
5.2.5. Sensor por Transmissão de Raios-X.....	30
5.2.6. Sensor por Fluorescência de Raio-X	31
6. Conclusão	32
7. Lista de Termos	34
8. Referências.....	35

1. Introdução

A extração de minerais vem sendo um dos grandes impulsionadores da vida humana, sendo a mineração uma atividade milenar exercida pela humanidade. A extração de minerais tem sido cada vez mais quantitativa e qualitativa, utilizando maquinários ao invés de força humana na extração e equipamentos de processamento com alta tecnologia, capazes de separar mineral de ganga com alta precisão e eficiência.

Entretanto, sabemos que os recursos terrestres são finitos. Exploram-se alternativas de mineração abaixo do nível do mar ou até mesmo em outros planetas e asteroides. No final do século XX, surge o termo de mineração urbana, que consiste na lavra e processamento de resíduos urbanos. Desde então, a reciclagem vêm sendo cada vez mais priorizada, uma vez que é uma forma de equilibrar a extração de recursos com a reciclagem de resíduos de diversas fontes. Metais ferrosos e não ferrosos podem ser, assim, separados do resto do resíduo de veículos automotivos ou eletrônicos, por exemplo.

Dessa forma, o processo de reciclagem de veículo em fim de vida (VFV ou ELV – *end of life vehicle*), contribui para uma alta taxa de reciclagem de materiais que poderiam ser descartados na natureza. Os resíduos de sucata devem, portanto, ser o mais bem separado possível, obtendo materiais com valor econômico e procurando deixá-los com um percentual mínimo de contaminantes para a comercialização.

A reciclagem de metais ferrosos e metais não ferrosos é a parte mais visada na recuperação de resíduos de sucata. Ligas de diferentes metais são recuperadas no processo a partir de diferentes etapas, utilizando maquinários corretamente aplicados. Assim, o processo de separação é de extrema importância e deve ser bem dimensionado, de acordo com uma caracterização previamente realizada e utilizando uma alimentação típica, tendo atenção em possíveis gargalos para procurar eliminá-los ou minimizá-los e tornar o processo adequado.

2. Objetivo

O presente trabalho realiza uma revisão bibliográfica e um estudo de caso a respeito do processo de reciclagem de sucata utilizando para tal dados do processo da empresa RFR, localizada em Guarulhos, São Paulo. Os dados foram coletados em nome da A5 Consultoria, empresa de consultoria em mineração, reciclagem e siderurgia, localizada em Belo Horizonte, Minas Gerais. Ao longo do texto serão discutidas possíveis melhorias que poderão ser aplicadas no processo atual da RFR, tendo em visto gargalos reais da empresa e criando um fluxograma de um processo melhorado.

3. Revisão da literatura

A seguir será discutido sobre a importância da economia sustentável, visando à lavra urbana e a recirculação de materiais. Além disso, será apresentada uma breve análise sobre amostragem desse material.

3.1. Lavra Urbana

De forma geral, a reciclagem de resíduos urbanos tem sido intensificada cada vez mais, tendo em vista uma crescente preocupação ambiental. Esta inclui dois principais fatores que são o correto descarte de resíduos e a possibilidade de reutilização de materiais recicláveis.

Em relação ao descarte de resíduos, vem sendo tomadas medidas principalmente a partir de 2010, com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, incentivo estatal para um melhor descarte de resíduos muitas vezes danosos para o meio ambiente. Com isso, os estados brasileiros têm criado os próprios regulamentos de acordo com a regulamentação federal (XAVIER, 2019). Obtém-se assim um maior controle dos resíduos hoje descartados tornando possível mitigar danos ao meio ambiente.

Por outro lado, a recirculação de materiais contribui não apenas para impactos ambientais, mas também favorece a sustentabilidade. Busca-se reaproveitar os resíduos para equilibrar os recursos renováveis e controlar os estoques finitos a partir da circularidade desses materiais (BARRETO e SENA DO NASCIMENTO, 2019). A lavra urbana torna-se, assim, uma alternativa para suprir a necessidade industrial de materiais finitos na natureza. Eletrodomésticos e automóveis em fim de vida, lixo eletrônico, resíduos de construção e demolição significam a recuperação de materiais metálicos ferrosos, não ferrosos e ainda não metálicos que, depois de recuperados, poderão voltar a compor matéria prima na indústria.

Esse modelo de reciclagem fomenta a economia circular, conceito econômico estratégico baseado na redução, reutilização, recuperação e reciclagem de materiais e energia, corroborando na redução da exploração de recursos minerais e na formação de novas cadeias de valor, a partir de novas demandas (BARRETO e SENA DO NASCIMENTO, 2019)

3.2. Amostragem

“Os tipos de amostragem considerados estatisticamente corretos, desde que seguidos alguns cuidados de dimensionamento e operação, são os executados por helicóides e por amostradores automáticos instalados em transportadores de correia. Todos os outros tipos de amostragem, inclusive a amostragem manual, são considerados incorretos” (OLIVEIRA et al., 2007). Entretanto, a sucata em geral representa um problema teórico do ponto de vista estatístico para a amostragem, devido a sua alta heterogeneidade. Isso implica em um processo que diverge do comum, e uma metodologia que precisa de cuidados redobrados, visando garantir a representatividade do material. Como descrito por RASEMANN et. al. em 2000, dificilmente possui-se um corpo modelo para o material, tendo em vista diferentes composições de material, com diferentes durezas, densidades, rugosidades, entre outros.

Alguns materiais apresentam difícil amostragem. Os cabos elétricos misturados à alimentação configuram um exemplo desse material (RASEMANN, 1999), tendo em vista que cabos isolados são dificilmente misturáveis e separáveis, além de que o conteúdo de cobre e alumínio varia entre 0 e 95%. Dessa forma a distorção entre valores amostrados e valores reais pode ser imensa. Além disso, a alimentação da planta não pode ser amostrada de forma satisfatória, devido à baixa homogeneização e à variação granulométrica (RASEMANN, 1999). Como o material forma um sistema heterogêneo, o conhecimento da miscibilidade dos seus compostos é uma dificuldade dentro do processo estatístico qualitativo. Por outro lado, a segregação do material também é fator importante dentro do sistema.

4. Processo Atual

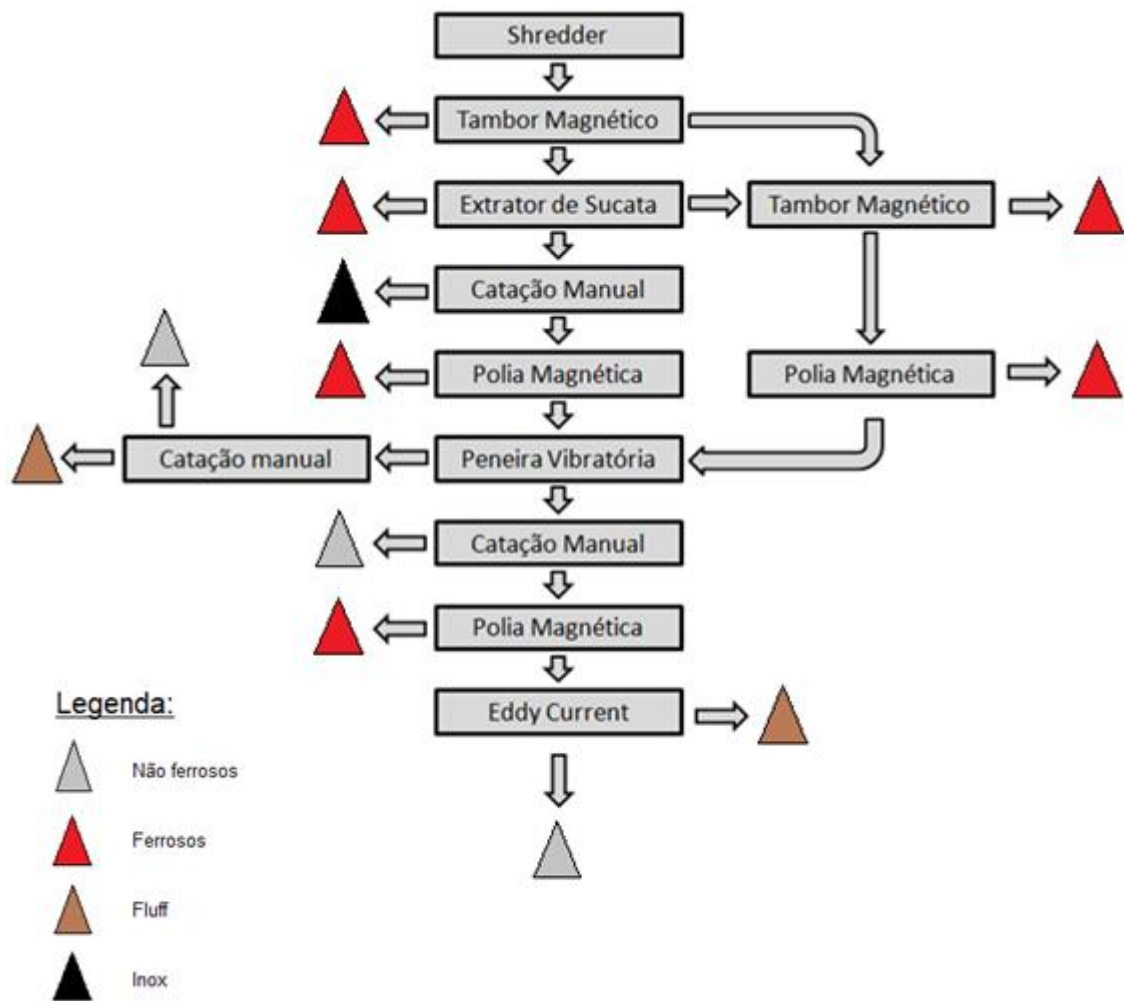
Neste capítulo será tratado o fluxograma apresentado pela RFR, começando pela descrição do material, na qual será brevemente abordada a complexidade da amostragem em um processo de reciclagem de sucata e uma análise da composição típica desse material.

Em sequencia será apresentado o processo atual em termos de equipamento, a começar pelo *Shredder*, que tritura o material de alimentação da planta de acordo com o tamanho da sua grelha, que definirá a granulometria máxima do material. O *Shredder* é alimentado por veículos automotivos em fim de vida e eletroeletrônicos diversos, sendo assim, a alimentação da planta. O material que compõe a saída do *Shredder* passa por tambores magnéticos visando a recuperação dos materiais ferrosos. O não magnético é denominado resíduo de *Shredder* e é todo o material que futuramente será processado na planta visando a recuperação de plásticos e ligas metálicas não ferrosas, por exemplo.

Uma vez triturado, o resíduo de *Shredder* passará por um tambor magnético, que retirará metais magnéticos. A parcela não magnética passa por um extrator de sucata e segue para o processo de catação manual, antes de ir para uma polia magnética. A sucata extraída e o material magnético retirado no processo anterior seguem para outro tambor magnético, que novamente extrai material magnético, o restante passa por uma polia magnética que se juntará ao material da polia magnética da linha principal, seguindo para uma peneira vibratória. A peneira realizará um único corte em 200mm, onde o material retido será passado para outra catação manual. O passante da peneira segue para uma terceira linha de catação manual, que segue para uma polia magnética e finalmente vai para o Eddy Current. Sabe-se, entretanto, que a peneira atual não é funcional, tendo sido desativada, havendo um material sem controle de granulometria ao longo de todo o processo.

A figura 5 apresenta o fluxograma do processo descrito acima:

Figura 1 - Fluxograma 1



Fonte: Autor

4.1. Descrição do Material

O material residual, ou sem valor econômico, gerado pelo processo de cominuição de um veículo em fim de vida está na grandeza de 227 kg por tonelada de material metálico recuperado (RECKZIEGEL, 2012). O material é extremamente heterogêneo, sendo que a reutilização da fração residual vem sendo estudada cada vez mais. A parte de metais não ferrosos e ferrosos é amplamente reciclada, enquanto a terra magnética fina e o *fluff* comumente são comercializados separadamente, com fins siderúrgicos.

Resíduos sem valor econômico são descartados de acordo com as normas de descarte de resíduos, que variam entre os estados brasileiros. De forma geral o descarte é realizado em aterros e o material pode chegar a ser incinerado, o que configura um problema ambiental, tendo em vista a nocividade de alguns materiais para a natureza e principalmente quando indevidamente descartados. Algumas empresas se comprometem a anular a destinação de resíduos a aterros ainda durante a década de 2020, sendo um importante ponto de estudo que corrobora com a sustentabilidade e preservação do meio ambiente.

A alimentação da planta se da da seguinte maneira:

A alimentação do circuito é de aproximadamente 14,72 t/h, gerando um total mensal de 2.267 t/mês e 27.204 t/ano.

A distribuição granulométrica do material está descrita na tabela 1:

Tabela 1 - Distribuição granulométrica

Granulometria [mm]	t/mês	Distribuição [%]
>60	472	21
30-60	891	39
20-30	244	11
10-20	231	10
<10	430	19

Fonte: Autor

A composição da alimentação do circuito está descrita na tabela 2:

Tabela 2 - Composição do material

Composição	t/mês	Distribuição [%]
Fluff	2095	92
Não ferrosos	84	4
Ferrosos	0	0
Inox	18	1
Outros	69	3

Fonte: Autor

O *fluff*, ou resíduo de *shredder* (ASR), é um material sem valor econômico, composto por uma mistura heterogênea de plásticos, borracha, vidro, papel, couro, tecido, madeira e outras impurezas. Assim, o *fluff* compõe a parte de resíduos leves.

Os metais não ferrosos são compostos principalmente por alumínio, magnésio e cobre. O alumínio é o principal elemento de valor econômico, tornando sua extração de grande importância. O cobre configura um problema recorrente de separação, que são os fios de cobre, que comumente contaminam o material, devido à dificuldade de recuperação desse material, de forma economicamente viável.

O material ferroso contempla ligas de aço, ferro fundido e ferro laminado. O percentual de ferro desses compostos deve ser de pelo menos 90%, com no máximo 5% de carbono e 5% de outros materiais. Vale ressaltar que metais ferrosos são altamente recicláveis.

O aço inox é uma liga de metais ferrosos que contém cromo. O material deve ser retirado por ser considerado um contaminante, entretanto apresenta uma difícil separabilidade.

Outros configura uma mescla de material como bobinas, PCB's (placas de circuito impresso), fios de cobre, capacitores, material comumente constituído por metais não ferrosos e resinas.

4.2. Descrição dos equipamentos

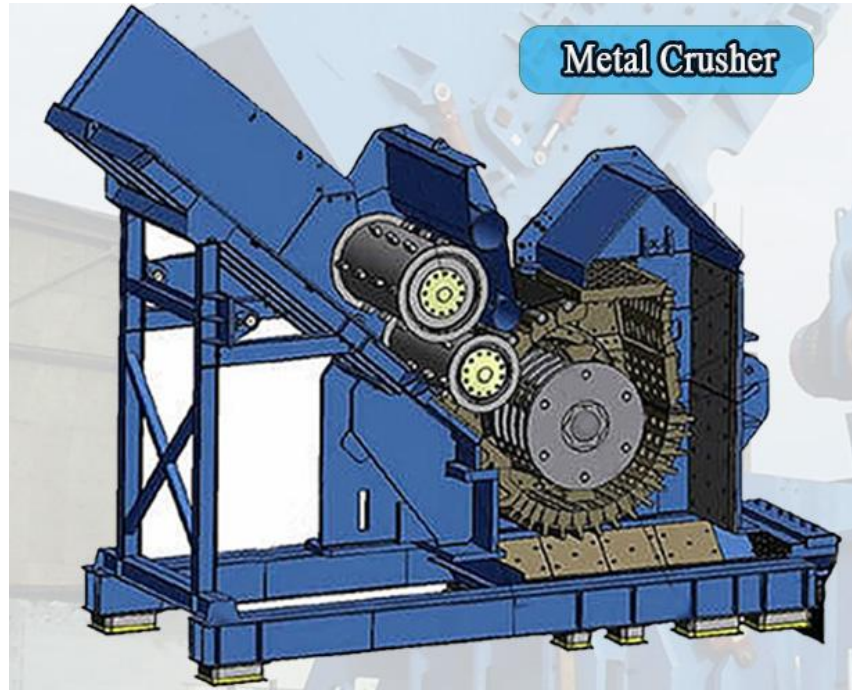
4.2.1. Shredder

O material que alimenta o Shredder é comumente composto por VFV podendo, entretanto ser composto ainda por eletrodomésticos como geladeiras, máquina de lavar roupa, entre outras sucatas variadas; além de outros materiais reciclados como computadores e componentes (PCB), bobinas diversas, material proveniente de reciclagem, etc.

O Shredder efetua o tritramento do material a partir de martelos fixos em um rotor horizontal, que cominui o material (mesmo que alimentado em grandes tamanhos) para a granulometria passante dada pela abertura da grelha que se localiza na sua saída (TRINDADE JUNIOR, 2013). Dessa forma, o material é previamente preparado para

seguir o fluxo na planta com granulometrias que permitam que os equipamentos possam processar o material.

Figura 6. Shredder CHM-4500 IMABE



Fonte: Yuxi Machinery

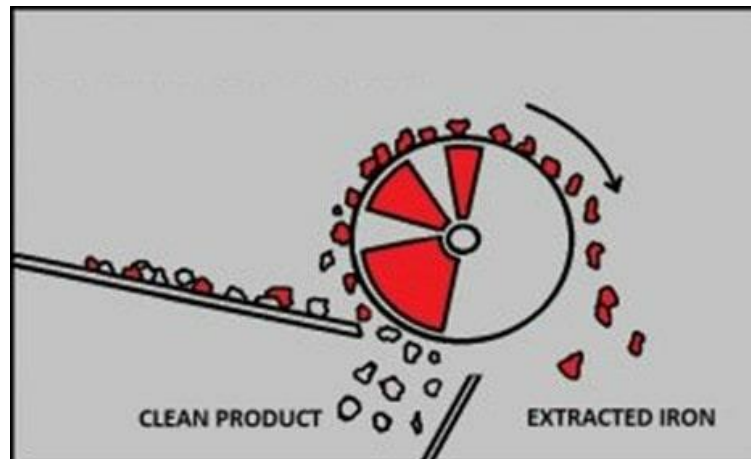
4.2.2. Tambor magnético

Como definido por Junior, 2013, os tambores magnéticos efetuam uma separação, que tem como principal objetivo separar os materiais ferrosos e não ferrosos. O equipamento é composto por uma bobina estática e magnetizada. A sucata magnetizável é atraída pelo tambor, enquanto a sucata não magnetizável cai através de uma calha. O passante é composto por metais não ferrosos como alumínio, cobre, latão, inox e outras ligas, além do material não metálico.

As dimensões destes equipamentos contemplam um diâmetro típico entre 800 e 3600 mm, com larguras que variam entre 800 e 3600 mm. O tambor magnético é operado com um campo magnético de aproximadamente 1000 Gauss.

A alimentação do tambor pode ser feita por cima ou por baixo do equipamento. A alimentação por baixo impacta em uma elevada capacidade, de 80 à 150 t/h de sucata, sendo utilizada em tambores principais, enquanto tambores secundários são alimentados por cima.

Figura 2 - Esquema de funcionamento de um tambor magnético



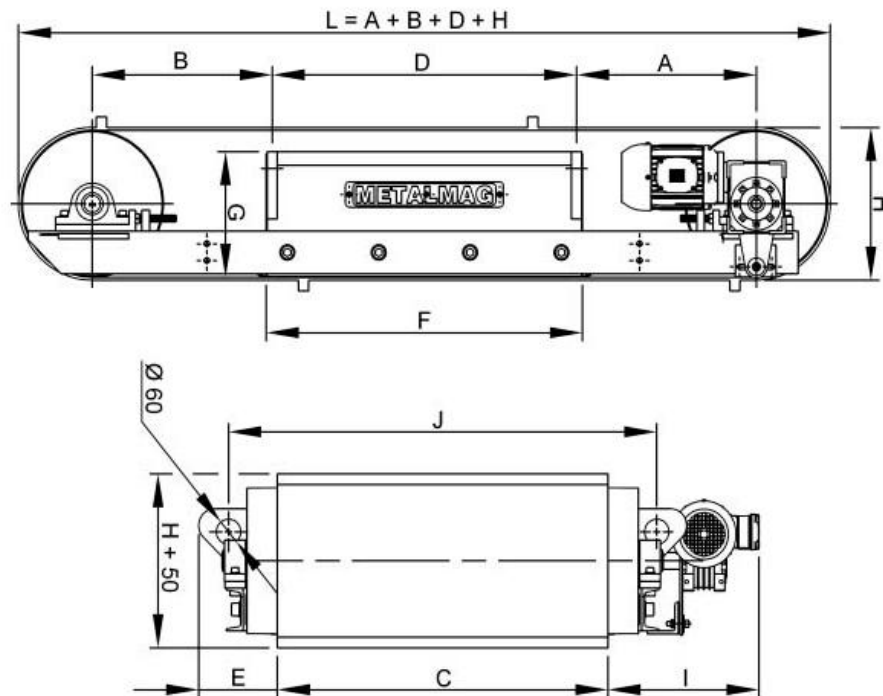
Fonte: Sollau

4.2.3. Extrator de sucata

Quando uma partícula suscetível a um campo magnético é colocada em um separador magnético, uma força magnética irá agir sobre esta partícula possibilitando a sua separação dos demais materiais (VEIT, 2005). Segundo este princípio, o extrator de sucata tem como principal função a retirada de contaminantes ferromagnéticos não retirados pelos tambores magnéticos, removendo não só material ferroso, mas também peças de desgaste que podem se soltar durante o processo, incluindo parafusos e porcas, por exemplo.

O extrator de sucata funciona por meio de um campo magnético de em torno de 500 Gauss, gerado a partir de bobinas eletromagnéticas ou ímãs permanentes. Posicionado acima da correia transportadora, o equipamento atrai o material ferromagnético para uma correia transportadora circulante sobre o campo gerado, que transportará as peças em contra fluxo.

Figura 3 - Desenho técnico de um extrator de sucata



Fonte: Metalmag

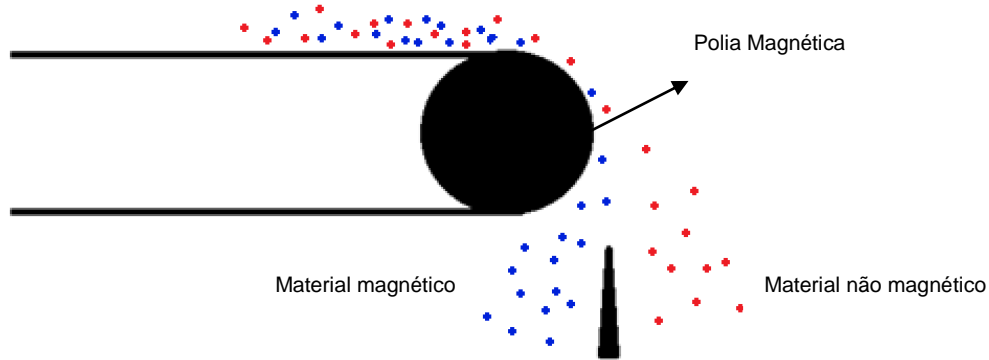
4.2.4. Polia magnética

Devido a diferentes condições magnéticas encontradas em cada material, torna-se necessário que existam condições favoráveis para uma separação efetiva. Polias magnéticas vêm sendo aplicadas amplamente na indústria, devido a simplicidade do processo em recuperar material ferroso.

Seu princípio de funcionamento se dá a partir de uma estrutura composta por uma correia ao qual, no final, é empregado um rolo magnético de campo magnético entre 500 e 1000 Gauss. O material passa de forma contínua por cima da polia, de modo que é criada uma zona de atração para o material com maior suscetibilidade magnética e o fluxo é desviado para o concentrado, enquanto o material não magnético segue para outro fluxo.

Um dos fatores mais relevantes para a separação bem sucedida da polia magnética consiste em uma camada homogênea do material e, principalmente, uma velocidade da correia transportadora que permita que o material magnético tenha condições de ser atraído pelo campo magnético, como demonstrado na figura abaixo:

Figura 4 - Esquema de funcionamento de uma polia magnética



Fonte: Autor

A velocidade da esteira implica no ângulo de atração do material, de forma que uma alta velocidade acaba lançando o material por cima da polia com um ângulo maior, não possibilitando que as partículas sejam atraídas pelo campo, implicando na queda de material magnético junto ao material não magnético. A esteira da polia magnética tem como velocidades típicas valores entre 0,6 e 1,5 m/s e o imã pode variar o seu diâmetro de acordo com a necessidade. Segundo a SULMAG, trata-se de diâmetros de 220 à 610 mm. Tanto o diâmetro como a largura da correia transportadora terão consequências na capacidade do equipamento.

4.2.5. Peneira Vibratória

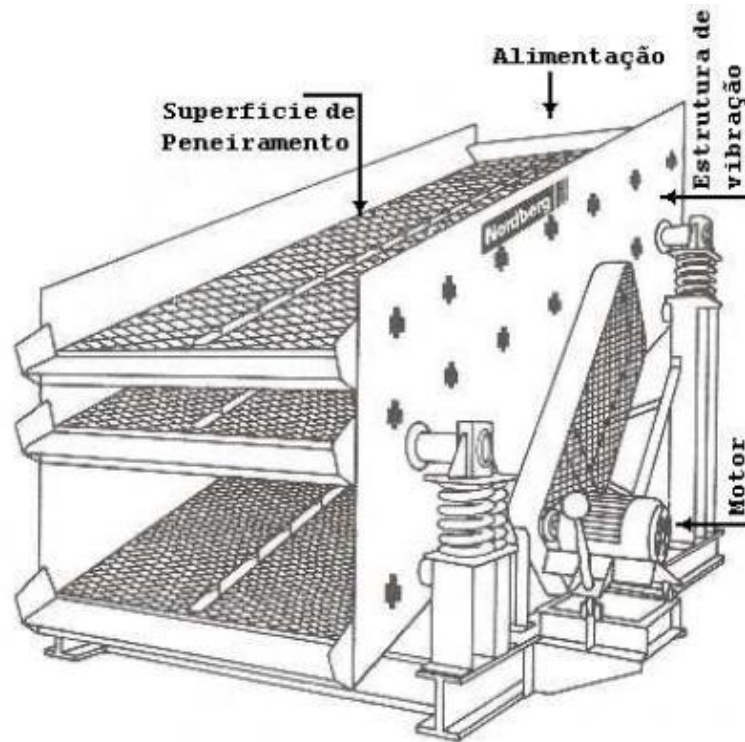
O peneiramento irá efetuar a separação por tamanho das partículas, corroborando na obtenção das granulometrias corretas do material a seguirem o processo.

Em um processo de reciclagem de resíduos de *Shredder*, comumente são encontrados finos particulados (terra magnética e não magnética) que podem acabar impactando o processo que, idealmente, cria um fluxo de material que chega ao Eddy Current com baixo conteúdo de finos, muitas vezes indesejados também no processo de catação manual.

Segundo Carrisso e Correia 2004, o movimento vibratório de uma peneira se dá por impulsos rápidos, normais ou elípticos/circulares à superfície, com baixa amplitude de 1,5 a 25 mm e alta frequência de 600 a 3600 movimentos por minuto. Estes impulsos podem ser gerados por mecanismos mecânicos ou elétricos. As peneiras vibratórias podem ser classificadas como horizontais e inclinadas. As peneiras horizontais não

possuem inclinação em seus decks, enquanto as peneiras vibratórias inclinadas (Figura 5) possuem decks que efetuam um ângulo com a horizontal. Este ângulo poderá ser ajustado de acordo com a necessidade de peneiramento e do material de alimentação.

Figura 5 - Desenho de uma peneira vibratória inclinada



Fonte: Carrisso et al.

Os decks podem ser constituídos por aço, borracha ou poliuretano (PU). Como o material proveniente do Shredder pode conter peças abrasivas ao aço, é altamente recomendado utilizar uma superfície de peneiramento constituída de PU, garantindo uma redução na manutenção efetuada na peneira vibratória e garantindo a qualidade ao longo do processo.

A eficiência da peneira é de suma importância do processo, uma vez que uma baixa eficiência de peneiramento permite que partículas com granulometrias indesejadas possam passar ou serem retidas na malha. Dessa forma, a eficiência pode ser descrita a partir da seguinte equação:

$$E = \frac{P}{aA} \times 100$$

Sendo:

E= eficiência,

P = passante (t/h),

A = alimentação (t/h),

a = porcentagem de material menor que a malha da alimentação

De forma geral, é possível concluir que a qualidade da malha da peneira é de extrema importância, uma vez que ela irá determinar o passante. Buracos e desgastes na malha são, portanto indesejados e afetam diretamente a produtividade do equipamento, sendo assim materiais como poliuretano de grande valia ao menos para o primeiro deck por onde a peneira será alimentada, contribuindo para uma queda na taxa de desgaste e conseqüentemente de manutenção da peneira. Visto isso, a alimentação deve respeitar a capacidade da peneira tanto em peso quanto em volume, uma vez que materiais que são volumosos como espumas, por exemplo, não necessariamente irão criar um gargalo de peso, mas sim de volume na peneira.

A vibração e o ângulo de rotação da peneira podem igualmente gerar uma má qualidade no peneiramento, necessitando uma calibração prévia em questão de frequência, velocidade e ângulo de rotação. Finalmente, seria indicado ainda adquirir uma peneira com maior número de decks, a fim de classificar o material em questão de granulometria em três, podendo assim diminuir a sobrecarga do eddy current para cada granulometria, além de retirar os finos para o processo de sensor sorting. Ambos os equipamentos citados anteriormente serão descritos em sequência.

4.2.6. Catação Manual

Devido à diferença de densidade, brilho, cor e textura apresentada entre os diversos materiais encontrados no ASR, o processo de catação manual das fases pode ser muito preciso, como descrito no capítulo de caracterização mineralógica dos minérios do CETEM, 2007. A catação busca, por meio da análise ótica e manual de um operário a retirada de certos materiais como não ferrosos e inox.

O catador exerce a função de retirar material de acordo com o seu próximo fluxo, ou seja, em uma saída de rejeito, a catação manual auxilia na retirada de material de interesse que por ineficiência dos maquinários chegou até aquele fluxo. Em caso de um processo subsequente ser para maior beneficiamento, pode-se empregar o catador como forma de retirar material de valor ou para aliviar o fluxo seguinte em relação à alimentação. Assim, a catação manual exerce o papel de controle de eficiência do

processo e de correção de ineficiências e gargalos, sendo uma forma de retirar contaminantes do material.

Figura 6 – Catação manual



Fonte: CGTN

4.2.7. Eddy Current

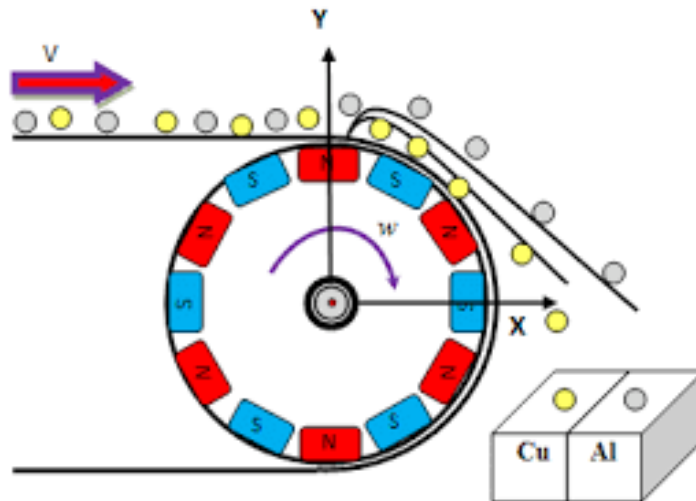
Como descrito por LIU et al., 2021, a recuperação de metais valiosos em um processo de ASR é uma das chaves na reciclagem automotiva. Dentre o material de interesse estão inclusos, substancialmente, metais ferrosos e não ferrosos. Dessa forma, a utilização de separação por indução magnética se torna de grande valia, com equipamentos como o Eddy Current sendo chave para o processamento em uma planta de reciclagem de sucata.

Sensores eletromagnéticos exploram amplamente o fenômeno da indução. Se um material condutor estiver próximo ao campo gerado, é induzida uma corrente parasita no material, como descrito pela Lei de Faraday. A corrente parasita induzida cria um campo eletromagnético oposto ao campo magnético primário gerado por uma bobina (Sophian et al, 2001).

O Eddy Current torna-se, portanto, um equipamento amplamente utilizado para a separação de metais não ferrosos, com a utilização do princípio da corrente de Foucault. O material entra no equipamento passando por uma correia que chega até o ponto das bobinas, onde a corrente parasita é induzida no material condutivo que sofre uma

alteração em sua trajetória enquanto o material não condutivo passa pelas bobinas sem sofrer alteração em sua rota, como demonstrado na figura à seguir.

Figura 7 - Fluxo em um eddy current



Fonte: Ahmed Nour El Islam Ayad

Um problema encontrado nesse princípio é o efeito pelicular, que afeta diretamente a entrada da corrente em uma peça, fazendo com que a corrente se limite a superfície do objeto, gerando um aumento da resistência aparente do condutor (Sophian et al, 2001). A profundidade com que o campo atinge uma peça, ou a profundidade de penetração pode ser descrita segundo a seguinte lei:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$$

Sendo

δ – profundidade da película (m)

μ – permeabilidade magnética (H/m)

σ – condutividade elétrica (S/m)

ω – frequência (Hz)

No próximo capítulo será realizada uma descrição de recomendações de novos equipamentos que poderão melhorar a produtividade da planta de reciclagem de sucata da RFR. Para isso foi construído um fluxograma que compreende mudanças não apenas

em novos equipamentos, mas também uma necessidade de troca da peneira para que a distribuição do fluxo ocorra de maneira satisfatória.

5. Novos Equipamentos

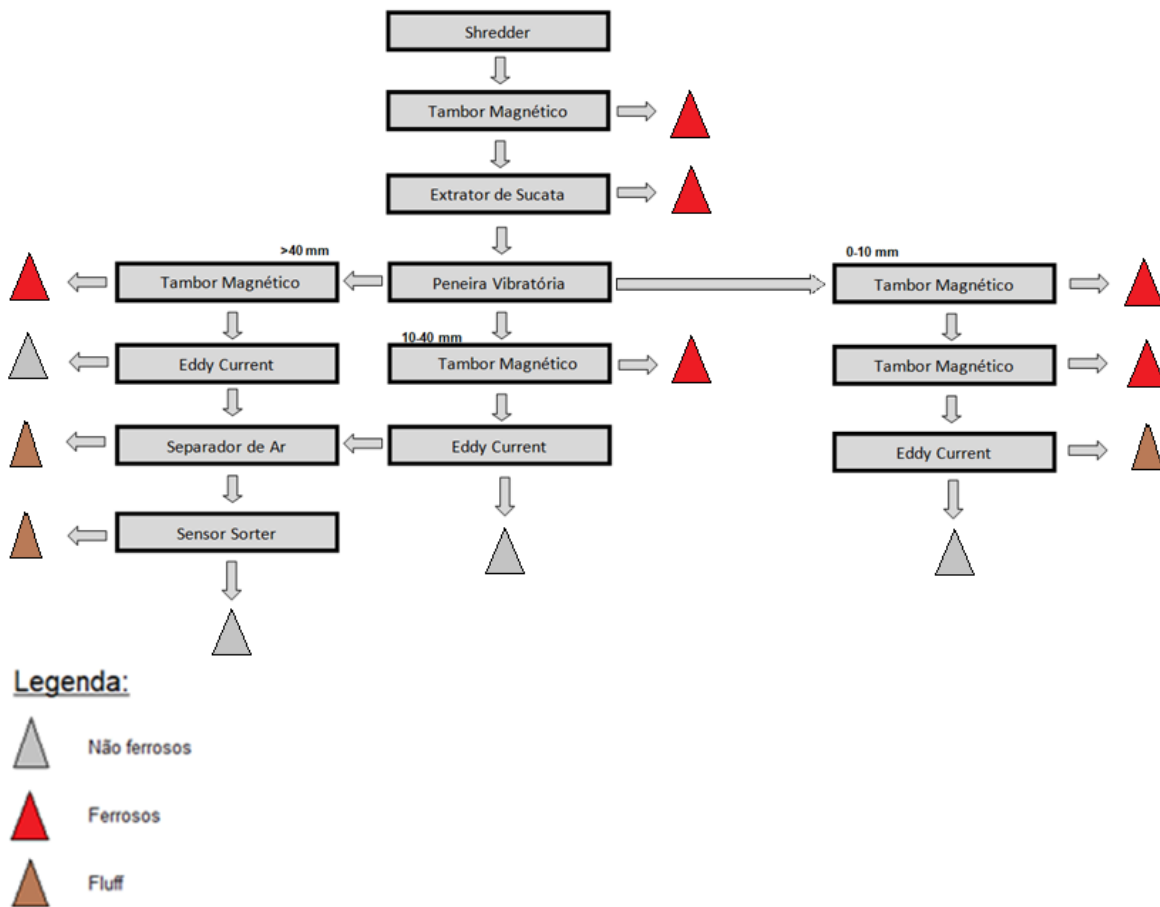
Com a crescente necessidade de efetuar processos cada vez mais eficientes, devido à concorrência e exigência do mercado em relação a contaminantes no produto, propõe-se neste capítulo a adição de novos equipamentos no fluxograma atual da RFR que possam melhorar o processo de reciclagem da empresa.

De forma geral, será sugerida a adição de equipamentos que possam retirar contaminantes antes da entrada do material nos Eddy Currents. Será descrito, portanto, o funcionamento de separador de ar modelo Zigzag, fluxo disposto previamente ao fluxo de Eddy Current. O emprego de um Sensor Sorter poderá ser também discutido, entretanto o equipamento seria disposto após o Eddy Current, com o objetivo de melhorar a separação dos produtos com mais eficiência que a catação manual empregada atualmente.

Além disso, propõe-se a implementação de uma nova peneira com dois decks, podendo assim efetuar uma separação por tamanho de forma a melhorar o desempenho dos Eddy Current em sequência. Ressalta-se ainda, que o fluxograma descrito neste capítulo tem por objetivo uma análise que não compreende fatores econômicos, devendo-se efetuar uma análise econômica para validar as mudanças descritas. Dessa forma, considera-se apenas o ponto de vista de melhorar a produtividade da planta de reciclagem da RFR.

O novo fluxograma proposto é descrito da seguinte forma:

Figura 8 - Fluxograma 2

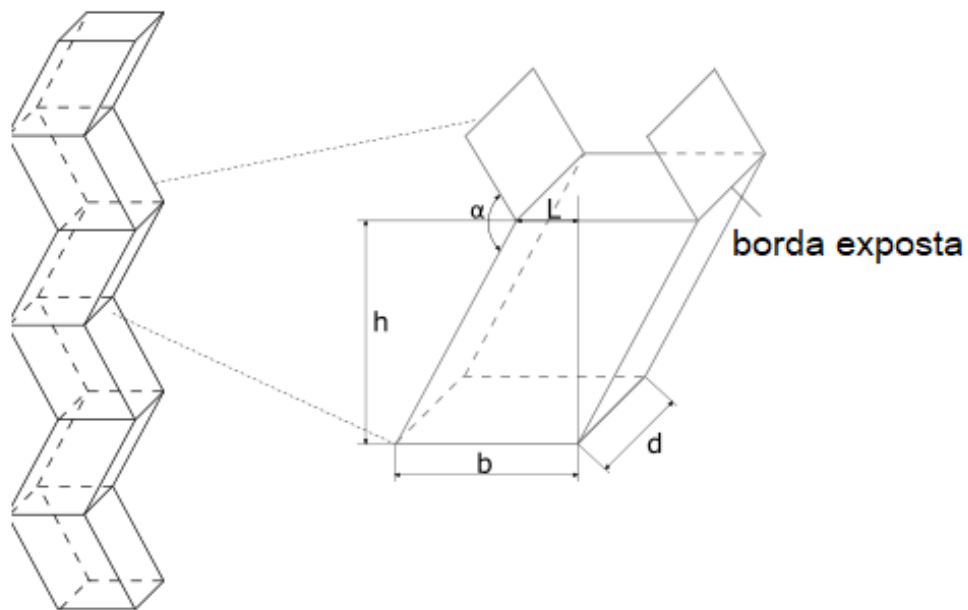


Fonte: Autor

5.1. Separador de ar

A separação à ar compõe um processo importante na reciclagem de resíduos e visa a retirada de material fluff e leves como espuma e finos diversos. Comumente utilizado no setor da reciclagem, tem-se o modelo zigzag. O classificador foi primeiramente mencionado por Stebbins em 1932, segundo Kaas et al., 2022, em uma patente. A figura 12 ilustra um modelo típico de um separador de ar zigzag.

Figura 9 - Esquema de um separador de ar zigzag



Fonte: Kaas et al.

Sendo:

h- altura

b- comprimento

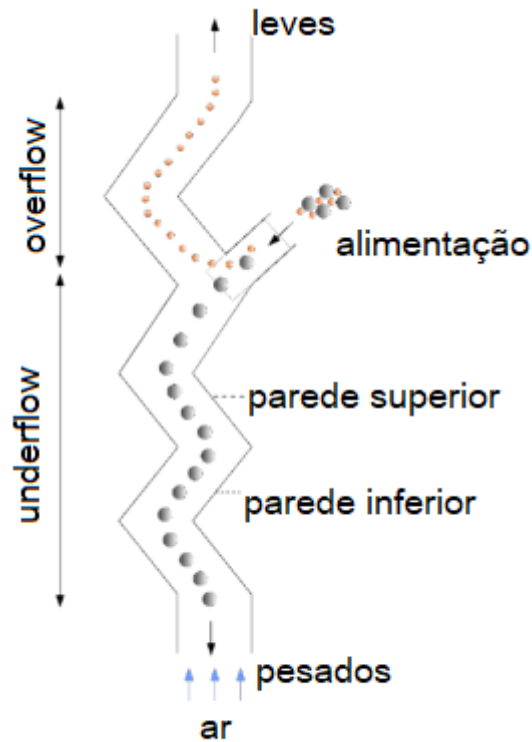
d- profundidade

L- distância horizontal da borda exposta

α – ângulo do zigzag

O equipamento possui um ângulo α típico de 120° . O dimensionamento é dado a partir da relação (b/d) , geralmente variando o parâmetro d . Uma relação esperada para a razão comprimento-profundidade gira em torno de valores abaixo ou igual à 1, utilizando-se uma relação (b/d) baixa para alta recuperação mássica. Uma alimentação comum para o equipamento gira em torno de 5 à 15 t/m²h, entretanto, como descrito por autores como Kaiser e Senden (citados por Kaas, 2022) altas taxas de alimentação resultam em baixa taxa de eficiência de separação. Kaas et al (2022) estima uma eficiência de separação de 0,8 para uma relação sólido-ar de até 2 kg/m. Comumente utiliza-se uma velocidade mínima de ar de 2 m/s para a indústria e com 1 m/s para aplicações laboratoriais. O fluxo do material no equipamento pode ser visto na figura abaixo.

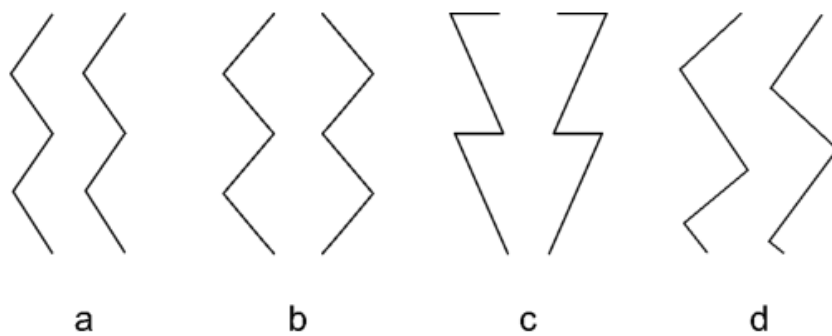
Figura 10 - Esquema de um separador de ar zigzag



Fonte: Kaas et al.

Peirce et al. e Schwechten et al. (apud Kaas, 2022) estudaram novas geometrias para separadores de ar, seguindo formatos retos, zigzag e formatos triangulares, assim como classificadores pulsantes, não pulsantes e pulsantes-passivos.

Figura 11 - Geometrias de um separador de ar



Fonte: Kaas et al.

A figura 14 ilustra geometrias diferentes para classificadores com diferente pulso: Zigzag não pulsante (a), Zigzag pulsante-passivo (b), triangular pulsante-passivo (c) e Classificador de ar híbrido (d).

5.2. Sensor Sorter

O sensor sorting, ou separação por sensores, é uma tecnologia cada vez mais utilizada na área da reciclagem e da mineração. A flexibilidade no uso de um ou mais sensores faz com que o equipamento possa ser amplamente empregado para diversas situações de alimentação. O uso de sensores diversos é dado por diferentes fabricantes como a Tomra e a Steinert. A de separadores de multisensores é um exemplo de equipamento funcional e flexível, podendo combinar sensor de cor, laser (detecção 3D), indutivo e transmissão de raio-X.

Figura 12 - Sensor sorter

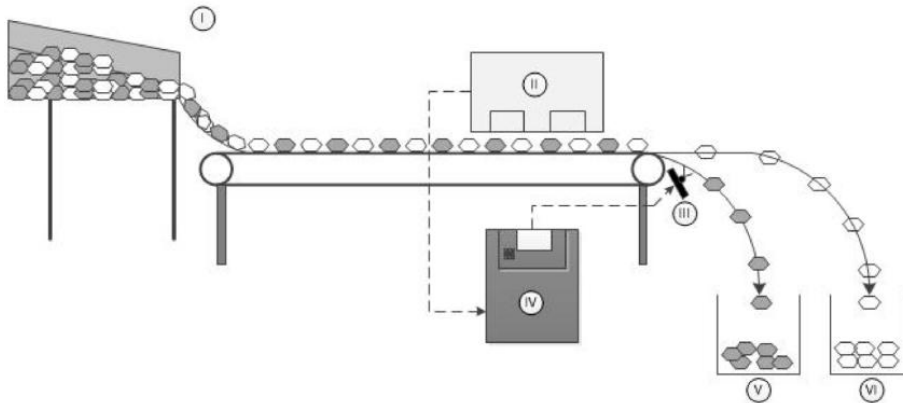


Fonte: Steinert

A figura 16 apresenta o fluxo do material dentro do maquinário (Robben e Wotruba, 2019). Em um primeiro passo (I) temos a alimentação do equipamento, de onde o material é transportado através de uma correia transportadora por dentro do sorter. O material composto por diferentes partículas passará então pelos sensores dispostos em (II), que irão tomar conhecimento do material e de sua posição na correia para efetuar ou não a ejeção dessa determinada peça, em um momento (III).

Dessa forma ocorre a obtenção de duas saídas, um material não ejetado (V) – conhecido como drop - e o material ejetado (VI). O processamento de dados é feito em uma unidade à parte (IV) composta por um CPU.

Figura 13 - Fluxo em um sensor sorter



Fonte: Robben et al.

O sorter pode ser amplamente empregado na indústria, utilizando um ou mais sensores para separar o material de interesse do outro material. O equipamento possui sensores variados: de indução, cor, 3D e/ou infravermelho, transmissão raios-X ou ainda fluorescência de raios-X. A seguir será discutida a função de cada um dos sensores.

5.2.1. Sensor de Indução

O sensor de indução consiste em duas bobinas ativas localizadas abaixo da correia transportadora do equipamento (Napoli, 2021). Cria-se um campo magnético ao redor das bobinas, com o qual o equipamento é capaz de detectar diferentes propriedades magnéticas e condutoras nas peças, podendo diferenciá-las segundo os parâmetros pré-definidos.

5.2.2. Sensor 3D

O sensor a laser 3D é utilizado em conjunto com outros sensores para inferir a posição de uma peça, garantindo maior precisão na ejeção. Isso se torna possível por um

ajuste de ângulo na disposição do laser que possibilita detectar outros parâmetros como brilho, forma, tamanho e rugosidade. As imagens são computadas na CPU, sendo processadas e podendo ser analisadas para realização de teste e calibragem do equipamento.

5.2.3. Sensor de Cores

Utilizando uma câmera centralizada na parte superior do sorter, o sensor óptico ou de cor detecta além de cor, dimensões e formatos além da estrutura e o posicionamento da peça. Trabalhando com frequências do espectro visível (comprimento de onda de 400-700nm), cria-se uma conversão de sinal que gera imagens RGB (vermelho, verde, azul) e HSL (Matriz Saturação Luminosidade).

5.2.4. Sensor Infravermelho

Também conhecido como espectrometria NIR (near-infrared), consiste em um método espectrométrico vibracional que utiliza sensores baseados numa faixa de frequência de emissão infravermelho, com comprimento de onda 1 μm e 1mm.

5.2.5. Sensor por Transmissão de Raios-X

Os raios-X possuem um comprimento de onda entre 0,01 e 1nm, sendo gerados por um emissor e penetrando no material, de acordo com a sua densidade. Peças com maior densidade absorvem uma maior quantia de raios-X, podendo o equipamento assim avaliar a absorção de cada peça, que consiste na diferença entre a radiação incidente e a radiação transmitida. Define-se um limite da densidade atômica que segue como critério de separação no equipamento. Segundo Napoli, 2021, o sensor sorter mede as diferenças densimétricas entre os materiais, utilizando energia dual para compensar a influência de diferentes espessuras do material.

5.2.6. Sensor por Fluorescência de Raio-X

A análise por fluorescência de raio-X (XRF) é um método quantitativo e qualitativo tomando como base o número de raios-X detectados por unidade tempo. Os raios excitam os elementos das partículas do material que emitem linhas espectrais características ao elemento amostrado. O XRF pode ser utilizado, portanto, para determinar e classificar elementos químicos contidos no material com alta precisão.

6. Conclusão

Com os estudos realizados neste documento é possível concluir que:

- O processo do circuito estudado pode ser melhorado com algumas alterações na disposição dos equipamentos.
- Recomenda-se efetuar mudanças nas malhas da peneira, que hoje não é eficiente no processo da RFR, tendo em vista a má condição das mesmas. Sendo assim, recomenda-se amplamente ao menos o primeiro deck de poliuretano, ao invés de malhas convencionais de arame/aço, garantindo uma vida útil maior para a malha, adaptando uma peneira de dois decks para conseguir atingir 3 granulometrias no processo. Além disso, recomenda-se a aquisição de mais dois Eddy Current, que lidarão separadamente com cada fluxo granulométrico. O Separador de ar poderá ser utilizado para retirar o material Fluff antes do Sensor Sorter, que executará a função da catação manual, de forma automática e mais eficiente. A substituição da polia magnética por tambores magnéticos resultará em uma melhora na retirada de materiais ferrosos.
- A escolha do equipamento magnético se dá de acordo com a eficiência no processo que os diferentes tipos de equipamento podem fornecer para cada caso. O extrator de sucata torna-se útil no retirado de peças grandes de metais ferrosos devido ao alto gradiente gerado no equipamento. Para a retirada dos demais materiais ferrosos, há as opções de utilizar polia magnética ou tambor magnético de baixa intensidade. Pela forma de utilização dos equipamentos no processo, o tambor magnético consegue ser mais eficiente devido ao posicionamento do equipamento em relação à correia, sendo assim a polia magnética menos favorável, gerando produtos mais contaminados do que o tambor magnético.
- O Sensor Sorter poderá ser operado utilizando o sensor de indução para retirada de não ferrosos, material mais indutivo que o fluff contido na alimentação do Sorter, além de utilizar, simultaneamente o sensor laser 3D, para ter uma maior exatidão na identificação da posição das peças e garantindo maior eficiência no processo de separação do material não ferroso.

- Para a implementação de novos equipamentos torna-se necessário efetuar um estudo levando em conta o espaço oferecido pela RFR. Eventuais problemas de espaço podem ser uma realidade, necessitando de um projeto base sólido para oferecer estruturas que podem compreender uma linha de processo maior. Dessa forma, recomenda-se efetuar uma análise de viabilidade econômica e uma análise de retorno financeiro.
- Com as alterações de fluxo apresentadas neste trabalho, espera-se uma melhora na recuperação dos produtos, principalmente de metais ferrosos, metais não-ferrosos e fluff.
- Antes de implementar as mudanças sugeridas neste trabalho é de extrema importância uma avaliação técnica mais detalhada com ensaios em escala de bancada e posterior validação em escala piloto

7. Lista de Termos

- VFV: Veículos em fim de vida. Veículos que serão utilizados como alimentação no processo de reciclagem de sucata.
- ASR: Automotive shredder resíduo. São os resíduos do shredder, compreendendo material como vidro, tecidos, borrachas, plásticos, líquidos e particulados.
- Fluff: Outro termo para definir os resíduos do shredder.
- PCB: do inglês *printed circuit board* são placas de circuito impresso.

8. Referências

1. RASEMANN, W; PREUSZE, C; MÜLLER, A; HERBST, M; HERRMANN R. Qualitätssicherung bei der Untersuchung und Bewertung von festidspersen Stoffsystemen anhand der Partikelgeometrie. Freiberg, Alemanha, 2000.
2. RASEMANN, W; Qualitätssicherung von Stoffsystemen im Abfall- und Umweltbereich. Freiberg, Alemanha, 1999.
3. OLIVEIRA, M. L. M; AQUINO, J.A. CETEM Capítulo 1 - Amostragem. Rio de Janeiro, 2007.
4. ROBBEN, C; WORTUBA, H. Sensor-based ore sorting technology in mining—past, present and future. Aachen, Alemanha, 2019.
5. TRINDADE, R.B.E; MARQUES, S.A. Alguns aspectos sobre reciclagem de materiais e metalurgia secundária de metais não ferrosos. Rio de Janeiro, 2013.
6. NAPOLI, L.B. Aplicabilidade do sensor based sorting para minério de ferro no quadrilátero ferrífero. Ouro Preto, 2021.
7. CARRISSO, R. C. C; CORREIA. J. C. G. Classificação e peneiramento, Capítulo 5, CETEM. Rio de Janeiro, 2004.
8. VEIT, H. M. Reciclagem de cobre de sucatas de placa de circuito impresso. Porto Alegre, 2005.
9. Kaas, A.; Mütze, T.; Peuker, U.A. Review on zigzag air classifier. Freiberg, Alemanha, 2022.
10. LIU, Y; ZHANG, Z; YIN, W; CHEN, H; YU, Z; WANG, Q. A novel conductivity classification technique for nonmagnetic metal immune to tilt variations using eddy current testing. Taiwan, China, 2021.
11. SOPHIAN, A; TIAN, G. Y; TAYLOR, D; RUDLIN, J. Electromagnetic and eddy current NDT: a review. Insight, 2001
12. JUNIOR, J. C. N. T. Obtenção, mercado e reciclagem de sucatas ferrosas na indústria siderúrgica brasileira. Rio de Janeiro, 2013.
13. VEIT, H. M. Reciclagem de cobre de sucata de placas de circuito impresso. Porto Alegre, 2005.
14. BARRETO, R.C; SENA DO NASCIMENTO, J.A. Mineração urbana de resíduos eletroeletrônicos e os objetivos do desenvolvimento sustentável: avaliações preliminares. Rio de Janeiro, 2019.

15. XAVIER, L.H. Mineração urbana e a gestão de resíduos eletroeletrônicos: Estado da arte do arcabouço legal e normativo. Rio de Janeiro, 2019.
16. RECKZIEGEL, V. N. Caracterização para o aproveitamento do resíduo de um triturador de sucata em uma usina siderúrgica. Porto Alegre, 2012.
17. <https://www.metalmag.com.br/>
18. <http://www.yuxi-shredder.com>
19. Simulation of Eddy Current and Repulsive Force of Non-Ferrous Particles in Eddy Current Separator , Ahmed Nour El Islam Ayad, 2019/06/05
20. <https://newseu.cgtn.com/news/2020-09-26/-Be-part-of-the-solution-not-the-pollution-CEO-The-Plastic-Bank--U5gaga8m08/index.html>
21. <https://www.sollau.com/electromagnetic-drum-mb-e>