

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

**ESCOLA DE ENGENHARIA**

**PPGEM - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,  
METALÚRGICA E DE MATERIAIS**

**GABRIELA GRESPAN CÂMARA**

**CARACTERIZAÇÃO DAS FRAÇÕES DO RESÍDUO DO TRITURADOR DE  
SUCATA DE UMA SIDERÚRGICA**

**Porto Alegre**

**2017**

GABRIELA GRESPAN CÂMARA

**CARACTERIZAÇÃO DAS FRAÇÕES DO RESÍDUO DO TRITURADOR DE  
SUCATA DE UMA SIDERÚRGICA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia modalidade Acadêmica.

**Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dra. Rejane Maria Candiota Tubino**

**Porto Alegre**

**2017**

*Dedico este trabalho à minha mãe Ivone  
Grespan Câmara, pelo amor incondicional e  
incentivo aos estudos de seus filhos e netos.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me iluminado e estar sempre ao meu lado me dando força durante toda esta etapa da minha vida.

Agradeço a UFRGS e à minha professora e orientadora Rejane Maria Candiota Tubino pela oportunidade de realização deste trabalho, pelo apoio técnico e por participar deste momento tão importante da minha vida.

Agradeço à empresa em que trabalho por me permitir frequentar as aulas necessárias para a execução deste trabalho, bem como pela oportunidade de conhecimento técnico.

Aos meus pais Luiz Fernando Dias Câmara e Ivone Grespan Câmara por todo carinho, amor e principalmente pela confiança em mim depositada.

Ao meu esposo Rogerio de Araújo Lopes, por todas as horas de verdadeiro companheirismo, pelo amor, paciência e também por acreditar na importância deste trabalho. Aos meus filhos Bianca Grespan Câmara Rodrigues e João Luiz Grespan Câmara Lopes por serem a razão para eu seguir estudando e aprimorando meu conhecimento.

À Pós-doutoranda Daniele Perondi, pelo apoio e amizade prestados nesta parceria que formamos a partir dos nossos trabalhos.

Às outras pessoas que direta ou indiretamente colaboraram na elaboração desse trabalho, o meu agradecimento.

Aos membros da banca, por terem aceito o convite e por contribuírem com este trabalho.

*“Ainda que seus passos pareçam inúteis, vá abrindo caminhos,  
como a água que desce cantando da montanha. Outros te seguirão...”*

*Antoine de Saint-Exupéry*

## RESUMO

O setor siderúrgico é um grande consumidor de energia e envolve grandes volumes de insumos, emissões de poluentes e resíduos sólidos. As usinas siderúrgicas semi-integradas são recicladoras de aço, tendo a sucata como sua principal matéria-prima. Os trituradores de sucata são utilizados para minimizar as impurezas e ajustar as dimensões da sucata. Esta etapa de separação gera um grande volume de resíduos que não são aproveitados no processo siderúrgico. Assim, o objetivo deste trabalho foi caracterizar as frações do resíduo de um triturador de sucata de uma indústria siderúrgica da região do Vale dos Sinos-RS, para fins de um posterior reaproveitamento. Através de estudos de otimização do equipamento foi possível separar o material em quatro frações <20 mm (funil), >20 e <30 mm (EC1), >30 e <100 mm (EC2) e >100 mm (TC9). Estas frações foram analisadas em relação à composição das amostras, distribuição granulométrica, análise térmica, análise imediata, análise elementar, análise do poder calorífico superior, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a concentração de metais. Pode se concluir que a fração fina (<20 mm), possui potencial para incorporação em blocos cerâmicos estruturais. A fração entre 20 mm e 30 mm apresentam características compatíveis para o uso na indústria cimenteira. As amostras de maior granulometria, fração entre 30 e 100 mm e > 100 mm, apresentam potencial de uso para o reaproveitamento energético. Apontou-se oportunidade na recuperação de ferrosos e não ferrosos em todas as frações estudadas. Para o reaproveitamento do resíduo do shredder é necessário a separação deste em granulometrias diferentes.

Palavras chave: Resíduo do shredder, Triturador de sucata, Indústria siderúrgica, Fluff

## ABSTRACT

The steel sector is a major consumer of energy and involves large volumes of inputs, pollutant emissions and solid waste. The semi-integrated steel mills are steel recyclers, with scrap as their main raw material. Scrap grinders are used to minimize impurities and adjust scrap dimensions. This separation stage generates a large volume of waste that is not used in the steelmaking process. Therefore, the objective of this work was to characterize the fractions of the waste from a scrap crusher from a steel industry in the Vale dos Sinos-RS region, for purposes of subsequent reuse. By means of equipment optimization studies it was possible to separate the material into four fractions <20 mm (funnel), > 20 and <30 mm (EC1), > 30 and <100 mm (EC2) and > 100 mm (TC9). These fractions were analyzed in relation to the composition of the samples, particle size distribution, thermal analysis, immediate analysis, elemental analysis, higher calorific value analysis, scanning electron microscopy (SEM) and metal concentration. It can be concluded that the fine fraction (<20 mm) has potential for incorporation of the raw material for the production of structural ceramic blocks. The smaller fractions (<20 mm and <30 mm) have compatible characteristics for use in the cement industry. Samples with higher grain size (> 30 mm and > 100 mm) show potential for use in energy recovery. It was pointed out an opportunity in the recovery of ferrous and non-ferrous in all fractions studied. For the reuse of the shredder residue it is necessary to separate it in different granulometry.

Keywords: Shredder residue, Scrap shredder, Iron and steel industry, Fluff

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Principais operações envolvidas no processo de uma siderúrgica semi-integrada.....	18
Figura 2: Vista de uma planta shredder .....	22
Figura 3: Resíduo do Shredder .....	23
Figura 4: Processamento da sucata no triturador Shredder .....	24
Figura 5: Composição em massa de materiais na fração do resíduo do shredder com granulometria > 2 mm .....	26
Figura 6: Operações da planta piloto de separação mecânica Argonne. ....	30
Figura 7: Processo WESA-SLF .....	32
Figura 8: Fluxograma geral da planta de processamento de sucatas metálicas da Siderúrgica .....	37
Figura 9: Procedimento de amostragem na indústria siderúrgica .....	38
Figura 10: Procedimento de quarteamento das amostras na indústria siderúrgica...	39
Figura 11: Fluxograma geral dos métodos utilizados neste trabalho .....	40
Figura 12: Fluxograma do processo de preparação das amostras .....	42
Figura 13: Fluxograma da análise do teor de matéria volátil.....	44
Figura 14: Soluções durante o procedimento de digestão ácida.....	48
Figura 15: Balões volumétricos contendo as soluções filtradas e avolumadas para análise do teor de metais. ....	48
Figura 16: Separação da amostra EC1 por categorias (granulometria >20 e <30 mm). ....	50
Figura 17: Separação da amostra EC2 por categorias (granulometria >30 e <100 mm). ....	51
Figura 18: Separação da amostra Funil por categorias (granulometria <20 mm). ....	51
Figura 19: Separação da amostra TC9 por categorias (granulometria >100 mm). ...	52
Figura 20: Composição da amostra EC1. ....	52
Figura 21: Composição da amostra EC2. ....	53
Figura 22: Composição da amostra Funil.....	53
Figura 23: Composição da amostra TC9.....	54
Figura 24: Distribuição das categorias por amostra. ....	54
Figura 25: Distribuição granulométrica acumulada das amostras (mistura).....	59
Figura 26: Termogramas obtidos para as quatro frações do shredder.....	60

Figura 27: Ampliação da região de temperaturas abaixo de 110 °C. ....	60
Figura 28: Derivada primeira para as quatro amostras de shredder. ....	61
Figura 29: Análise imediata das amostras de shredder. ....	63
Figura 30: Imagem de microscopia associada ao espectro químico para a amostra Funil (Ponto de verificação 1). Destaque para a intensidade do elemento Fe. ....	70
Figura 31: Imagem de microscopia associada ao espectro químico para a amostra Funil (Ponto de verificação 2). Destaque para a intensidade do elemento Fe. ....	71
Figura 32: Imagem de microscopia associada ao espectro químico para a amostra Funil (Ponto de verificação 3). Destaque para a presença dos elementos Co e Ni...	72
Figura 33: Imagem de microscopia associada ao espectro químico para a amostra EC1 (Ponto de verificação 4).....	73
Figura 34: Imagem de microscopia associada ao espectro químico para a amostra EC2 (Ponto de verificação 5).....	74
Figura 35: Imagem de microscopia associada ao espectro químico para a amostra EC2 (Ponto de verificação 6). Destaque para a presença do elemento químico Cl. .	75
Figura 36: Imagem de microscopia associada ao espectro químico para a amostra TC9 (Ponto de verificação 7). Ausência do elemento químico Fe.....	76
Figura 37: Imagem de microscopia associada ao espectro químico para a amostra TC9 (Ponto de verificação 8). Ausência do elemento químico Fe.....	77
Figura 38: Concentração (% m/m) de Alumínio e Cobre nas amostras estudadas. ..	78
Figura 39: Concentração (% m/m) de Cromo e Cobalto nas amostras estudadas....	78
Figura 40: Concentração (% m/m) de Manganês e Níquel nas amostras estudadas. ....	79
Figura 41: Concentração (% m/m) de Chumbo nas amostras estudadas. ....	79
Figura 42: Concentração (% m/m) de Titânio e Zinco nas amostras estudadas. ....	80
Figura 43: Concentração (% m/m) de Ferro nas amostras estudadas. ....	80
Figura 44: Concentração de metais (% m/m) na amostra Funil em diferentes faixas granulométricas.....	83
Figura 45: Concentração de metais (% m/m) na amostra EC1 em diferentes faixas granulométricas.....	84
Figura 46: Concentração de metais (% m/m) na amostra EC2 em diferentes faixas granulométricas.....	85
Figura 47: Concentração de chumbo (ppm) para as amostras Funil, EC1 e EC2 em diferentes faixas granulométricas.....	86

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Geração de resíduos de uma indústria siderúrgica semi-integrada brasileira.....	20
Tabela 2: Composição elementar do resíduo do shredder.....	27
Tabela 3: Concentrações (% m/m) de metais reportadas na literatura. ....	28
Tabela 4: Comparação de resultados característicos do resíduo do shredder .....	29
Tabela 5: Comparação da composição das amostras estudadas com valores reportados na literatura. ....	58
Tabela 6: Temperaturas e máxima taxa de reação .....	62
Tabela 7: Teor de matéria volátil para o shredder automotivo reportado por outros pesquisadores. ....	64
Tabela 8: Análise elementar e compostos halogenados nas amostras.....	65
Tabela 9: Resultados de análise elementar para o SR reportados na literatura .....	67
Tabela 10: Poder calorífico das amostras. ....	67
Tabela 11: Relação dos resultados por fração estudada. ....	68
Tabela 12: Poder calorífico para o SR .....	68
Tabela 13: Concentrações (% m/m) de metais reportadas na literatura (Adaptada de RECKZIEGEL,2012) .....	81
Tabela 14: Distribuição granulométrica da amostra Funil .....	81
Tabela 15: Distribuição granulométrica da amostra EC1 .....	82
Tabela 16: Distribuição granulométrica da amostra EC2 .....	82
Tabela 17: Resumo das principais características de cada fração estudada. ....	86

## LISTA DE ABREVIATURAS

ASR – *Auto Shredder Residue*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

C<sub>f</sub> – carbono fixo

C<sub>z</sub> – cinzas

EC1 – Fração do resíduo do shredder com granulometria de 20 a 30 mm

EC2 – Fração do resíduo do shredder com granulometria de 30 a 100 mm

FEA – Forno elétrico a arco

FUNIL – Fração do resíduo do shredder com granulometria < 20 mm

IABR – Instituto Aço Brasil

i-TEQ – Equivalente tóxico internacional

LAPROM – Laboratório de Processamento Mineral da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LAQIA – Laboratório de Análises Químicas Industriais e Ambientais da Universidade Federal de Santa Maria

LEBIO – Laboratório de Energia e Bioprocessos da Universidade de Caxias do Sul

LPOL – Laboratório de Polímeros da Universidade de Caxias do Sul

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MV – Matéria volátil

NBR – Norma Brasileira Regulamentada

PCDD – dibenzo-para dioxinas policloradas

PCDF – dibenzofuranos policlorados

PU - Poliuretano

PVC – Policloreto de vinila

RT – Resíduos de Trituração

SF – *Shredder Fluff*

SR – Resíduo do Shredder

TC9 – Fração do resíduo do shredder com granulometria > 100 mm

TCD – *Thermal Conductivity Detector*

TGA – *Thermogravimetric Analysis*

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	14
1.1 OBJETIVOS .....	15
1.1.1 Objetivo Geral .....	15
1.1.2 Objetivos Específicos .....	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	16
2.1 SIDERURGIA E MEIO AMBIENTE .....	16
2.2 TRITURADOR DE SUCATA .....	20
2.3 CARACTERÍSTICAS DO RESÍDUO DO SHREDDER.....	25
2.4 DESTINAÇÃO E ESTUDOS DE APROVEITAMENTO DO RESÍDUO DO SHREDDER .....	29
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
3.1 MATERIAIS .....	37
3.2 MÉTODOS .....	40
3.2.1 Distribuição granulométrica .....	40
3.2.2 Preparação das amostras de SR.....	41
3.2.3 Análise Térmica.....	43
3.2.4 Análise Imediata .....	43
3.2.5 Teor de Matéria volátil .....	43
3.2.6 Teor de Cinzas .....	44
3.2.7 Teor de Carbono Fixo.....	45
3.2.8 Análise Elementar .....	45
3.2.9 Análise de Halogênios (Cl/F).....	45
3.2.10 Análise do Poder Calorífico .....	46
3.2.11 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	46
3.2.12 Elementos Metálicos .....	47
3.2.13 Separação Granulométrica para posterior determinação de metais (Fe / Zn / Al /Pb) .....	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
4.1 COMPOSIÇÃO DAS AMOSTRAS .....	50
4.2 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS AMOSTRAS.....	58
4.3 ANÁLISE TÉRMICA .....	59
4.4 ANÁLISE IMEDIATA .....	62
4.5 ANÁLISE ELEMENTAR .....	65
4.6 ANÁLISE DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR.....	67

4.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	69
4.7.1 Funil.....	69
4.7.2 EC1 .....	72
4.7.3 EC2 .....	74
4.7.4 TC9.....	76
4.8 CONCENTRAÇÃO DE METAIS NAS DIFERENTES AMOSTRAS.....	77
4.9 CONCENTRAÇÃO DE METAIS (Fe / Zn / Al /Pb) EM DIFERENTES FAIXAS GRANULOMÉTRICAS .....	81
4.10 RESUMO DAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS FRAÇÕES ESTUDADAS .....	86
5 CONCLUSÃO.....	90
SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	92
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	93
Apêndice 1 – Distribuição granulométrica das amostras.....	98

## 1. INTRODUÇÃO

O aço é um dos metais mais antigos da civilização humana. No império romano, os soldados já encaminhavam os instrumentos de guerra inservíveis para a produção de novos aparatos. Ele é considerado um produto 100% reciclável, uma vez que a sucata pode ser transformada inúmeras vezes em um aço novo, sem perder qualidade.

O uso da sucata na fabricação de aço reduz os impactos ambientais. Na reciclagem, o consumo de energia elétrica chega a ser 64% menor (DCI, 2014). O processo de reciclagem também ajuda na preservação dos recursos naturais, pois evita a extração de matéria-prima, o que reduz ainda as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

A atividade siderúrgica, se não controlada, pode causar grandes impactos ambientais. A produção de aço em escala mundial é responsável por um alto consumo de recursos naturais renováveis e não renováveis, tais como: minérios, carvão, água, gases industriais, óleos e lubrificantes, energia, sucatas, além de gerar uma série de resíduos (RECKZIEGEL, 2012).

O equipamento triturador de sucata, também conhecido como Shredder, surgiu para atender a necessidade de processamento e limpeza da sucata antes desta ser enviada como matéria prima para os fornos da aciaria.

Nas usinas semi-integradas que possuem o equipamento triturador de sucata, os resíduos de maior geração são a escória de aço carbono, a escória de forno panela, a carepa, o resíduo do shredder e o pó de aciaria. Dentre estes, o resíduo de maior volume e o único que ainda não possui alternativa de reciclagem viável é o resíduo do shredder (SR).

Segundo Perondi (2017) em outros países a alimentação dos trituradores de sucata é realizada com automóveis, ao passo que no Brasil, os materiais alimentados no triturador procedem das mais variadas fontes, tornando a composição do resíduo final extremamente heterogênea.

Considerando um cenário de crescimento da produção de aço, com conseqüente aumento da geração de seus subprodutos, elevação dos custos de disposição em aterros, tendência que os requisitos legais se tornem cada vez mais restritivos, preocupação com a prevenção da poluição e a busca pela melhoria

contínua dos processos, o aumento da busca por alternativas para reaproveitamento e reciclagem dos resíduos industriais se faz necessário (FIGUEIREDO, 2016).

O resíduo proveniente dos trituradores de sucata é constituído principalmente de plásticos, espumas, vidros, borrachas, têxteis, solos, etc. O destino mais utilizado para o resíduo do shredder pelas indústrias siderúrgicas Brasileiras é o aterro de resíduos industriais, sendo que este tipo de disposição acarreta um alto custo para os geradores. O referido resíduo é classificado segundo a NBR 10.004/2004 como não-inerte (Classe II A) (PERONDI, 2017).

A reciclagem e o reaproveitamento de resíduos do Shredder na sua totalidade já foram reportadas. Contudo, com o objetivo de aumentar as possibilidades de reaproveitamento, uma caracterização detalhada de cada uma das frações geradas pelo Shredder foi conduzida neste trabalho.

Assim, a contribuição científica deste trabalho, está na caracterização das quatro frações do resíduo do Shredder proveniente de uma indústria siderúrgica da região do Vale dos Sinos-RS, para fins de um posterior reaproveitamento.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é caracterizar as frações do resíduo de um triturador de sucata de uma indústria siderúrgica da região do Vale dos Sinos-RS, para fins de um posterior reaproveitamento.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Caracterizar quantitativamente as frações do resíduo do shredder;
- Identificar as principais características das quatro frações geradas, através das seguintes técnicas de caracterização: distribuição granulométrica, análise elementar, teor de metais, poder calorífico superior, análise imediata, microscopia eletrônica de varredura e análise térmica;
- Propor alternativas de trabalhos futuros para o aproveitamento das frações do resíduo em estudo;
- Identificar oportunidades de recuperação de ferrosos e não-ferrosos nas frações estudadas.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo será conduzida a revisão bibliográfica dos seguintes tópicos: processo de siderurgia e meio ambiente, processo de geração do resíduo do Shredder a partir do equipamento triturador de sucata, características do resíduo do Shredder e algumas formas de aproveitamento deste resíduo.

### **2.1 SIDERURGIA E MEIO AMBIENTE**

A produção de aço é um forte indicador do estágio de desenvolvimento econômico de um país. Seu consumo cresce proporcionalmente à construção de edifícios, execução de obras públicas, instalação de meios de comunicação e produção de equipamentos (IABR, 2017).

As usinas siderúrgicas atuais podem ser divididas em dois grandes grupos: usinas integradas e usinas semi-integradas. Usina integrada é aquela cujo aço é obtido a partir de ferro primário, isto é, a matéria-prima é o minério de ferro, que é transformado em ferro na própria usina, nos altos-fornos; o produto dos altos-fornos, chamado ferro-gusa é transformado em aço através da operação de conversão. Usina semi-integrada é aquela cujo aço é obtido a partir de ferro secundário, isto é, a matéria-prima é sucata de aço, não havendo necessidade da etapa de redução do minério de ferro. A sucata é transformada novamente em aço comercial, por meio do emprego de fornos elétricos de fusão; são recicladoras de aço (MOURÃO, 2011).

A indústria do aço no Brasil é representada por 14 empresas privadas, controladas por onze grupos empresariais e operando 30 usinas distribuídas por 10 estados brasileiros, levando o país a ocupar a 8ª posição no ranking da produção mundial (IABR, 2017).

No estado do Rio Grande do Sul, há somente usinas semi-integradas, que operam com fornos elétricos a arco (FEA). O aço produzido é utilizado para usos industriais (perfil, tarugo, barras), construção civil (vergalhões, pregos, treliças), produtos agropecuários (cercas, arames farpados, arame ovalado), entre outros.

Após selecionada, prensada, cortada e triturada, a sucata é adicionada ao forno elétrico a arco de fusão, para ser fundida e submetida ao refino primário de aço. Para que se atinjam as propriedades desejadas, o aço também passa por um refino secundário, realizado no forno panela. O aço refinado é transportado ao lingotamento

contínuo. Os produtos lingotados são chamados de semi-acabados e conforme a forma, de lingotes, tarugos, blocos e placas (PERONDI, 2017).

O forno de reaquecimento eleva a temperatura do semi-acabado a uma faixa entre 1000 e 1200°C, para permitir o processo de conformação mecânica, como por exemplo a laminação. O produto final pode ser fornecido, em função da sua aplicação posterior, na forma de rolos de bobinas, barras, perfis ou chapas (PERONDI, 2017). Estas principais operações envolvidas no processo de um usina siderúrgica semi-integrada podem ser verificadas na Figura 1.

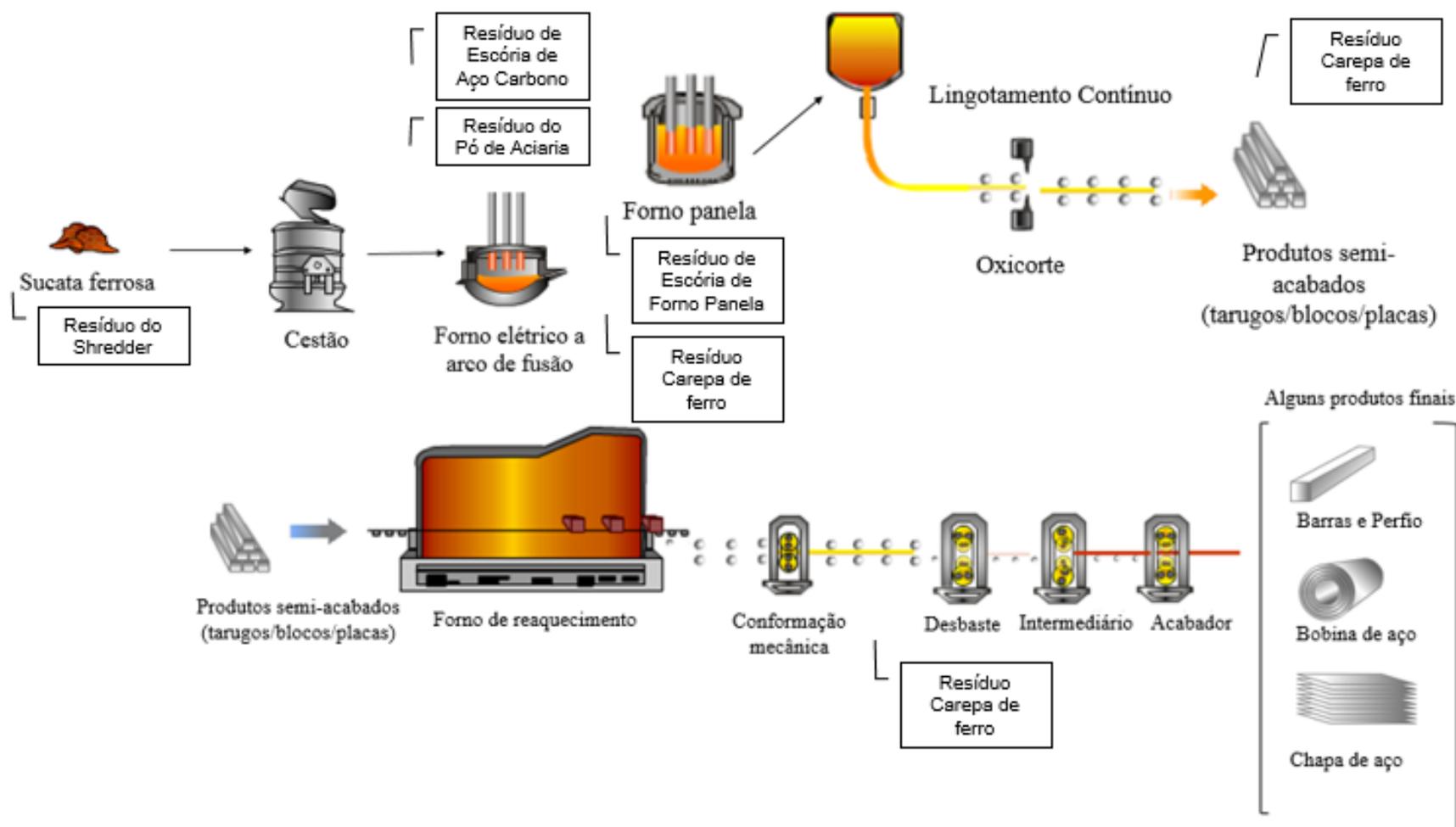


Figura 1: Principais operações envolvidas no processo de uma usina siderúrgica semi-integrada

Fonte: Adaptado de PERONDI, 2017.

O aço figura entre os materiais mais recicláveis e reciclados do mundo. O setor estimula a coleta e recicla o aço contido nos produtos no final da vida útil, empregando-o na fabricação de novos produtos siderúrgicos, sem qualquer perda de qualidade. Dessa forma, a produção de aço a partir de sucata reduz o consumo de matérias-primas não renováveis, economiza energia e evita a necessidade de ocupação de áreas para o descarte de produtos em obsolescência (IABR, 2017).

O setor siderúrgico brasileiro tem investido continuamente no desenvolvimento de práticas de gestão e operação que possibilitem o aprimoramento do desempenho ambiental de suas atividades. Tem havido um esforço contínuo das empresas para reduzir o consumo das diferentes matérias-primas e estabelecer processos cada vez mais eficientes. Tais iniciativas costumam trazer resultados significativos, tanto do ponto de vista econômico, reduzindo custos, quanto ambiental, minimizando o uso de recursos naturais não renováveis e os impactos sobre a natureza (RECKZIEGEL, 2012).

A indústria siderúrgica constitui um caso clássico de evolução tecnológica, em particular nos aspectos ambientais. Este setor é altamente intensivo em energia e envolve grandes volumes de insumos, materiais poluentes e rejeitos. Entre as empresas do setor já é possível identificar tendências para a integração das variáveis: competitividade (preço), qualidade de produto (desempenho) e redução do impacto ambiental (CAVALCANTI, 2012).

A atividade siderúrgica, se não controlada, pode causar grandes impactos ambientais. A produção de aço em escala mundial é responsável por um alto consumo de recursos naturais renováveis e não renováveis, tais como: minérios, carvão, água, gases industriais, óleos e lubrificantes, energia e sucatas, além de gerar uma série de resíduos. (RECKZIEGEL, 2012). Segundo dados do Instituto Aço Brasil, no ano de 2015 cada tonelada de aço produzido gerou 594 kg de coprodutos e resíduos, perfazendo um total de 19,8 milhões de toneladas (IABR, 2017).

Os coprodutos são materiais que, juntamente com o aço, resultam do processo siderúrgico e para os quais foram desenvolvidas tecnologias que permitem sua utilização, de forma ambientalmente adequada, como matéria-prima ou fonte de energia na própria atividade geradora ou por terceiros. O uso de coprodutos contribui para a sustentabilidade da indústria do aço, evitando a disposição de resíduos em

aterros, reduzindo a emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e preservando os recursos naturais não renováveis (CCA BRASIL, 2017).

As usinas semi-integradas geram diversos resíduos, tais como escórias, pó de aciaria, carepa de ferro, lodo de estações de tratamento de efluentes, resíduo do shredder, entre outros. A Tabela 1 apresenta a geração dos principais resíduos de uma indústria siderúrgica entre os anos de 2014, 2015 e 2016.

Tabela 1: Geração de resíduos de uma indústria siderúrgica semi-integrada brasileira.

Resíduo Gerado	2014		2015		2016		Média 2014/2016	
	Toneladas	%	Toneladas	%	Toneladas	%	Toneladas	%
Total Gerado	111621,77	100,0	101900,60	100,0	128886,74	100,0	114136,37	100,0
<b>Resíduo do Shredder</b>	<b>53275,36</b>	<b>48,0</b>	<b>53627,83</b>	<b>53,0</b>	<b>73883,07</b>	<b>57,0</b>	<b>60262,09</b>	<b>53,0</b>
Escória de Aço Carbono	34538,34	31,0	27997,46	27,0	28340,94	22,0	30292,25	27,0
Carepa de Ferro	6424,76	5,8	4761,16	4,7	6569,37	5,1	5918,43	5,2
Escória de Forno Panela	6525,00	5,8	5802,15	5,7	6015,80	4,7	6114,32	5,4
Pó de Aciaria	3341,23	3,0	2755,93	2,7	2732,52	2,1	2943,23	2,6
Lodo da ETE	1423,81	1,3	1641,93	1,6	1627,35	1,3	1564,36	1,4
Refratários	720,00	0,6	480,00	0,5	1086,52	0,8	762,17	0,7
Outros	5373,27	4,8	4834,14	4,7	8631,17	6,7	6279,53	5,5

Fonte: O autor

Através dos dados apresentados na Tabela 1, é possível verificar que dentre os resíduos gerados, o resíduo do shredder constitui o resíduo de maior participação, seguido pela escória de aço carbono. O aumento no volume de geração em 2016 deve-se ao fato de esta indústria siderúrgica ter aumentado sua produção de sucata a partir do triturador de sucata.

Dentre todos os resíduos gerados em uma indústria siderúrgica semi-integrada, o resíduo escolhido para este trabalho é o resíduo do shredder (SR), uma vez que o mesmo apresenta o maior volume de geração, adicionado ao fato de não possuir alternativas de reciclagem até o momento.

## 2.2 TRITURADOR DE SUCATA

A sucata é o principal insumo da usina semi-integrada, portanto é de extrema importância que ela chegue no forno da aciaria com o mínimo de impurezas e com as

dimensões adequadas, a fim de reduzir o consumo de energia e evitar interrupções no processo. É importante destacar que, foi a partir desta necessidade que surgiram os trituradores de sucata.

As sucatas processadas nas siderúrgicas nacionais são sucatas geradas em processos industriais e sucatas de obsolescências, dentre as quais, a maioria são veículos em final de vida, mas também são processadas sucatas da linha branca, como geladeiras, fogões, ar condicionado, entre outros.

O processamento da sucata pode ser realizado pela indústria sucateira, formada por agentes distribuidores e processadores, ou pode ser realizada pela própria siderúrgica, dependendo das condições de cada mercado. Os equipamentos mais utilizados no processamento da sucata são as prensas tesoura, trituradores de sucata, também chamados de Shredder, oxicorte (acetileno) e equipamentos de seleção e limpeza. Os equipamentos trituradores de sucata têm a função de triturar e retirar as impurezas da sucata. Os equipamentos Shredder mais modernos separam os metais não-ferrosos utilizando um equipamento conhecido como *Eddy Current* (BATISTA, 2014).

O equipamento triturador de sucata garante: (a) entrega da sucata fragmentada com elevada pureza; (b) minimização na geração de resíduos em etapas posteriores do processo; e (c) a possibilidade de obter subprodutos passíveis de venda, como o cobre e alumínio. Este processo de trituração da sucata gera milhões de toneladas de aço e metais não-ferrosos recuperados, porém gera os resíduos não reaproveitados composto por uma mistura de vidros, plásticos, tecidos, madeiras, borrachas e óxidos metálicos (RECKZIEGEL, 2012).

A sucata entra no transportador de alimentação, sendo direcionada até a calha de alimentação, após a sucata é processada no triturador, composto com martelos de manganês. A sucata já triturada é direcionada para o transportador de transferência, passando por tambores magnéticos que fazem a separação da sucata em duas correntes, ferrosos e não ferrosos. Os não ferrosos são direcionados para uma separação com correntes parasitas, que finalmente segregam o material em sucata não ferrosa, composta principalmente por alumínio e cobre, e o resíduo do shredder. A Figura 2 mostra este processo da planta do shredder.

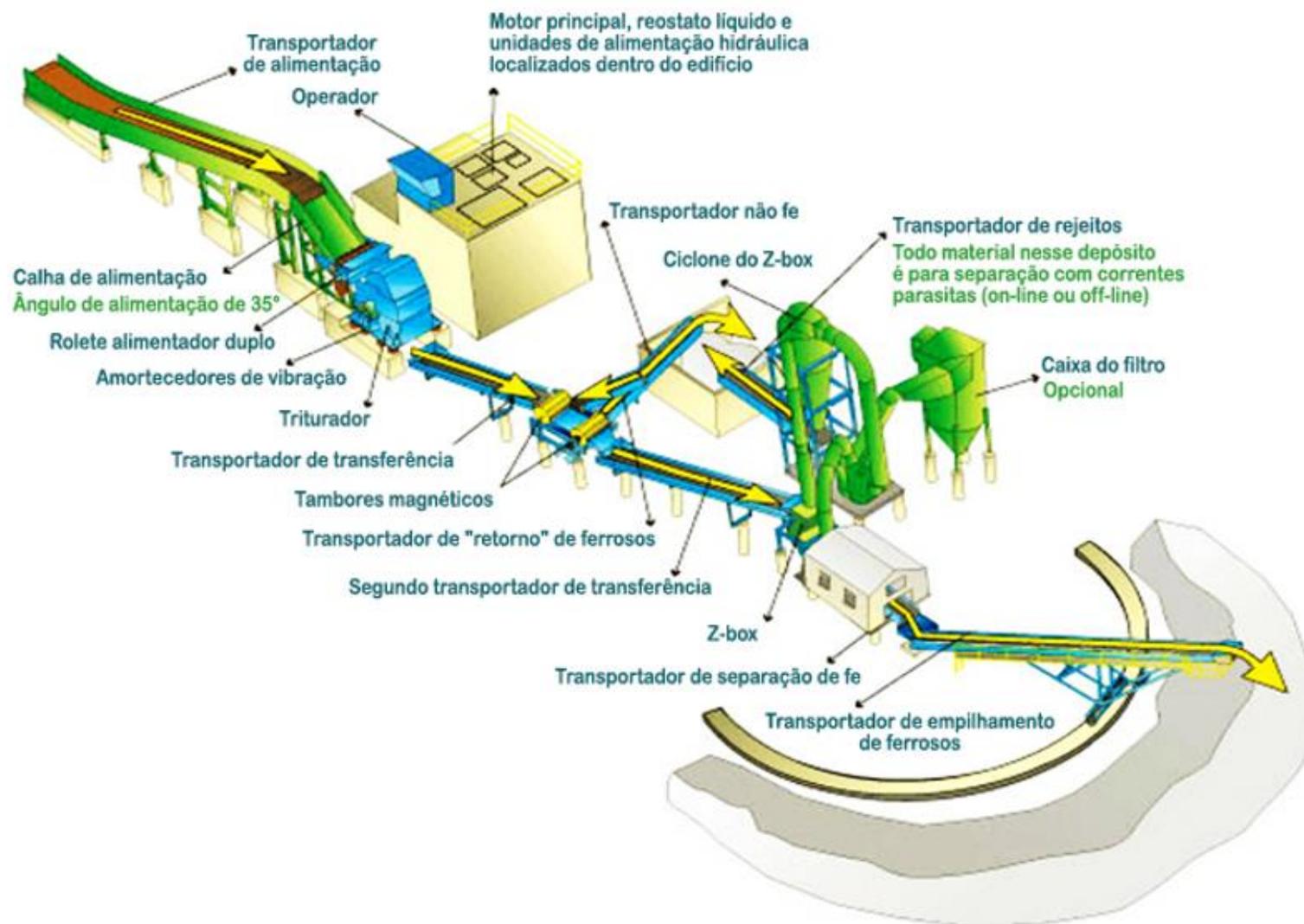


Figura 2: Vista de uma planta shredder

Fonte: Módulo de treinamento Shredder de uma indústria siderúrgica

O resíduo do Shredder (SR) ou Fluff do Shredder, ou simplesmente “Fluff”, conforme é apresentado na Figura 3, é gerado por estas tecnologias que recuperam metais não-ferrosos e plásticos de veículos em final de vida, aparelhos e outras sucatas leves. A matéria-prima metálica é coletada por operadores de ambas partes do setor automotivo, recuperação e desmanche, recicladores de metal e aparelhos (MANCINI et al., 2010).



Figura 3: Resíduo do Shredder

Fonte: MANCINI et al, 2010.

Anterior à etapa de trituração dos veículos em final de vida é realizada a operação “despoluir”, removendo os fluidos, baterias, rodas e pneus. As variações de tais práticas, de acordo com o tipo e idade do veículo e da alimentação de sucata adicional de produtos de linha branca e ferro leve, podem levar a uma considerável diversidade nas características e nos níveis de contaminação do resíduo do shredder. Como resultado o SR contém proporções de enxofre, cloro, metais pesados e óleos contaminantes a partir de elastômeros, PVC e fluidos de carro, respectivamente, que podem variar significativamente de hora em hora na mesma planta do triturador. A oscilação dos níveis de contaminação, com alta variação de umidade e energia, constitui um considerável desafio a ser enfrentado no design dos processos de tratamento adequados. Por estas razões, a gestão do resíduo do shredder é considerada como um crescente problema de preocupação mundial (MANCINI et al., 2010).

Inicialmente a sucata é triturada através do triturador (moinho de martelos), e após passa pelos tambores magnéticos, cujo objetivo é a separação da fração ferrosa

magnética da não-ferrosa. A fração ferrosa é o produto do triturador. Esse produto é chamado de sucata shredder ou de sucata triturada e é posteriormente encaminhado para ser carregado em fornos elétricos a arco. A fração não magnética (não-ferrosa) é encaminhada para um processo de separação (*Eddy Current*: corrente Parasita) que permite a segregação predominantemente do alumínio e do cobre. O Ensaio por Correntes Parasitas baseia-se fundamentalmente na Lei de Indução de Faraday, onde o campo magnético, gerado por uma bobina quando alimentada por uma corrente elétrica alternada, induz, na peça a ser ensaiada, correntes elétricas, também denominadas correntes parasitas. Tanto o alumínio, quanto o cobre, podem ser comercializados pela própria siderúrgica. A fração não magnética constitui o SR (PERONDI, 2017). O SR é direcionado para locais específicos, conforme sua faixa granulométrica (SR<20 mm, entre 20 e 30 mm, entre 30 e 100 mm e >100 mm).

Desta forma, após o processamento da sucata no triturador shredder, a sucata limpa alimenta os fornos da aciaria e o resíduo do shredder é atualmente disposto em aterro industrial. Além da sucata ferrosa e do resíduo, o triturador do shredder também separa a sucata não-ferrosa (alumínio, zinco, cobre, latão, etc) e então esta fração pode ser comercializada. A Figura 4 apresenta de forma esquemática, o Processamento da sucata no triturador Shredder (FIGUEIREDO, 2016).

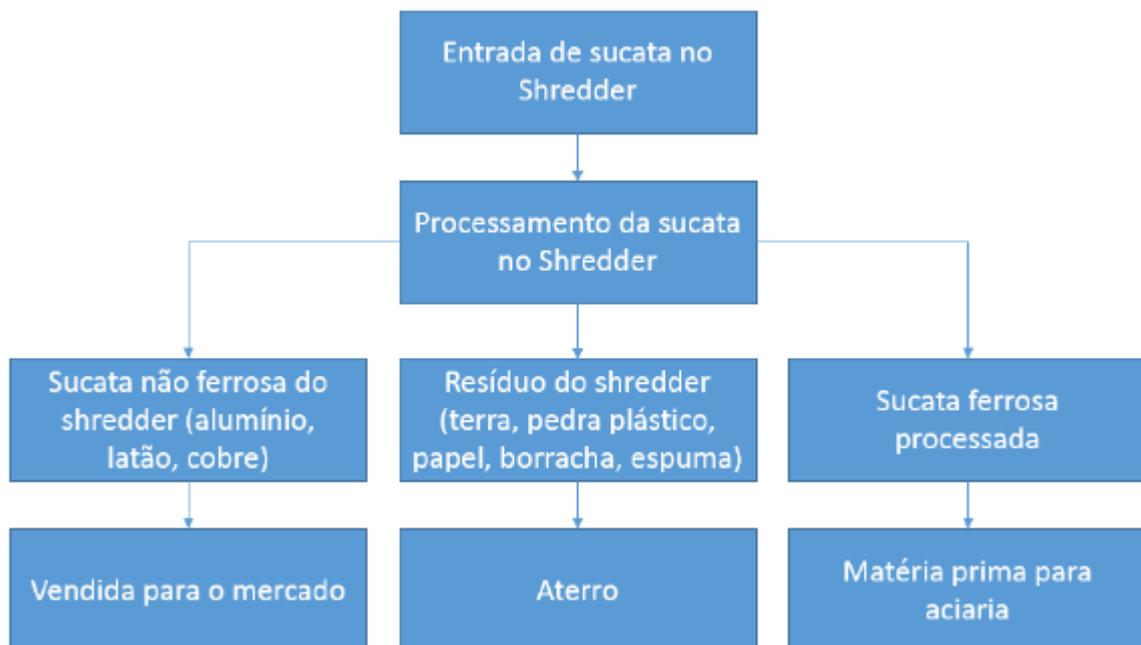


Figura 4: Processamento da sucata no triturador Shredder

Fonte: FIGUEIREDO, 2016.

### 2.3 CARACTERÍSTICAS DO RESÍDUO DO SHREDDER

O Resíduo do Shredder (SR) é a fração fragmentada de um veículo ou qualquer tipo de sucata, no fim do seu ciclo de vida, para os quais as rotas de reciclagem são escassas. Esse resíduo também é denominado de “Auto Shredder Resíduo (ASR)”, “*Shredder Fluff* (SF)”, Resíduos de Trituração (RT), “*Auto Fluff*” ou, simplesmente “*Fluff*” (RECKZIEGEL, 2012). A composição do resíduo pode variar de acordo com a alimentação do equipamento triturador de sucata. Se o veículo de fim de vida não receber um tratamento adequado de despoluição, compostos classificados como perigosos poderão permanecer no resíduo (CAETANO, 2016).

O SR é geralmente composto de plásticos (de 20 a 30%), borracha (entre 15 e 20%), papel e madeira (de 20 a 40%), materiais não combustíveis: inertes, tais como vidro, pintura e solo) (cerca de 10%) e metais (aproximadamente 20 %) (FIORE et al., 2012).

As frações orgânicas geralmente incluem borracha (pneus, câmaras de ar, tapetes de borracha, tiras de borracha de vedação, etc), plásticos (para-choques, luzes, painel de instrumentos, espuma de poliuretano de bancos de automóveis, *airbags*, etc), têxteis e fibras (esteiras, tampa de assento, parte superior dos carros conversíveis, etc) e, em alguns modelos, madeira. A maioria destes produtos orgânicos são polímeros utilizados para reduzir o peso do carro, a fim de diminuir o consumo de combustível e emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). A quantidade real de produtos orgânicos e diferentes tipos de polímeros usados varia drasticamente e depende em grande parte do modelo do carro, tipo, ano de fabricação, etc (MANCINI et al., 2010).

O SR gerado pelas siderúrgicas brasileiras difere dos demais países devido aos materiais que são alimentados no triturador de sucata. Comumente, em outros países os trituradores são alimentados com automóveis, ao passo que no Brasil, os materiais alimentados no triturador procedem das mais variadas fontes, tornando a composição do resíduo final extremamente heterogênea (PERONDI, 2017).

RECKZIEGEL (2012) realizou a caracterização do resíduo do shredder de uma siderúrgica do Vale dos Sinos, RS. O estudo de Reckziegel teve como alvo a fração do resíduo com granulometria compreendida entre 15 e 100 mm, que foi dividida após a separação granulométrica em duas frações (< 2 mm e > 2 mm). A Figura 5 mostra a distribuição dos materiais presentes na fração > 2 mm. Através dela, é possível

verificar que o resíduo é rico em compostos orgânicos, como borracha, papel, tecidos e plásticos. Também é possível observar que a referida fração apresenta componentes inorgânicos, tais como metálicos, eletrônicos, vidro e pedregulhos (rocha e concreto). Entretanto, 51 % do material não pode ser identificado, por apresentar granulometria muito baixa, abaixo de 8 mm.

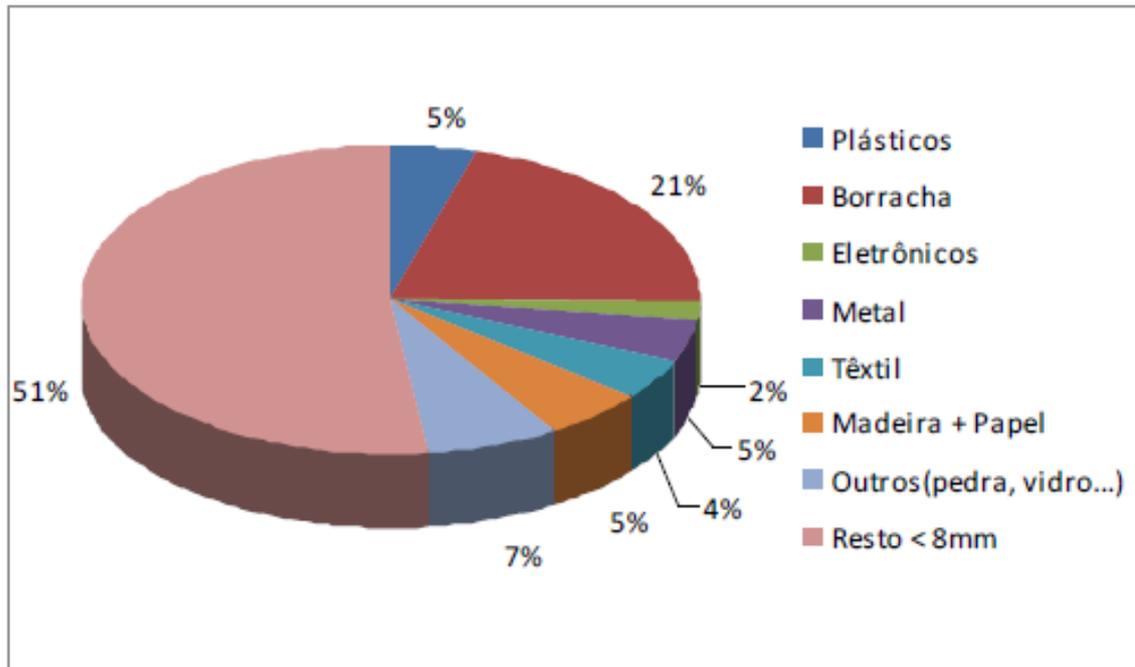


Figura 5: Composição em massa de materiais na fração do resíduo do shredder com granulometria > 2 mm

Fonte: Adaptado de RECKZIEGEL (2012)

A natureza física do SR, a contaminação cruzada, os mercados instáveis para materiais recuperados e a necessidade de um processamento significativo para atender às especificações do mercado dificultam a recuperação de materiais específicos de SR. Assim, com a exceção de uma pequena fração convertida em materiais recicláveis ou simplesmente queimado, o resíduo do shredder está sendo destinado quase que totalmente para aterros sanitários, tanto por membros, quanto por não-membros da União Européia (MANCINI et al., 2010) e atualmente nas usinas siderúrgicas do Brasil o resíduo do Shredder é enviado para aterro (FIGUEIREDO, 2016). No entanto, a pressão para alcançar os processos comerciais capazes de lidar com esse complexo resíduo como matéria-prima é uma tendência contínua na

tentativa de cumprir as exigências ambientais cada vez mais rigorosas (MANCINI et al., 2010).

Em relação à composição elementar deste resíduo, pode-se inferir que ela é muito variável. Há predomínio dos elementos C, H, N, S, Cl, F; devido aos materiais poliméricos de origem orgânica. A presença de silício também é alta, decorrente da presença de vidros e areia. Em relação aos metais, predomina o ferro, mas também há quantidades significativas de alumínio, cobre, níquel, zinco, cromo e chumbo (RECKZIEGEL, 2012).

A Tabela 2 apresenta os valores da composição elementar encontrados por diferentes pesquisadores: Mirabile *et al.* (2002), Roy & Chaala (2001), Lopes *et al.* (2009), Rieckziegel (2012) e Perondi (2017):

Tabela 2: Composição elementar do resíduo do shredder

	<b>Mirabile <i>et al.</i> (2002)</b>	<b>Roy &amp; Chaala (2001)</b>	<b>Lopes <i>et al.</i> (2009)</b>	<b>Reckziegel (2012)</b>		<b>Perondi (2017)</b>
	< 2mm	82,3% <26,5mm	>0,5mm	< 2mm	> 2mm	> 100mm
<b>C (%)</b>	49,50	32,80	31,10	6,67	39,26	72,92
<b>H (%)</b>	5,30	4,08	4,10	1,45	4,53	9,86
<b>N (%)</b>	4,50	0,59	1,00	0,21	0,75	1,45
<b>S (%)</b>	0,20	0,23	0,43	0,22	0,47	0,21
<b>Cl (%)</b>	0,50	1,64	0,73	0,09	2,56	1,33
<b>F (%)</b>	0,05	-	<0,02	0,10	0,51	-

Fonte: Mirabile *et al.* (2002); Roy & Chaala (2001); Lopes *et al.* (2009); Reckziegel (2012); Perondi (2017)

A composição elementar do resíduo do shredder pode variar, como pode ser observado nos resultados apresentados na Tabela 2, especialmente quando estamos comparando faixas distintas. Um ponto que é bastante discutido pelos pesquisadores da área é a concentração do elemento cloro, e principalmente a existência de organoclorados, como é o caso do PVC (policloreto de vinila). Os organoclorados geram dioxinas e furanos durante o processo de combustão (BATISTA, 2014).

A Tabela 3 apresenta as concentrações de metais reportadas na literatura para o resíduo do shredder, adicionalmente aos limites de lixiviados e solubilizados, considerando a NBR 10004 (ABNT, 2004).

Tabela 3: Concentrações (% m/m) de metais reportadas na literatura.

	<b>Keller, 2003 *</b>	<b>Mirabile <i>et al</i>, 2002</b>	<b>Mark e Fisher, 1999 *</b>	<b>Reckziegel, 2012</b>		<b>Perondi, 2017</b>	<b>Limites NBR 10.004/2004</b>	
		< 2mm		< 2mm	> 2mm	> 100mm	Lixiviado	Solubilizado
Al	2,00	-	-	2,82	2,35	0,445	-	0,2
Cu	1,10	1,20	1,80	0,20	4,54	0,292	-	2,0
Fe	14,0	25,70	13,65	24,67	5,55	2,286	-	0,3
Mn	0,10	-	0,11	0,52	0,68	0,036	-	0,1
Pb	0,51	0,20	0,50	0,22	3,48	0,026	1,0	0,01
Si	7,70	9,50	-	15,30	5,32	-	-	-
Ti	-	0,90	-	1,56	-	-	-	-
Zn	0,90	1,90	-	0,83	1,78	0,483	-	5,0

Fonte: (Adaptada de RECKZIEGEL, 2012) (\*) Não identificado.

Alguns elementos e compostos causam preocupação no resíduo do shredder, como por exemplo, as bifenilas policloradas, PCBs, o chumbo e o cromo. De acordo com Keller (2003), para todos os metais, exceto o mercúrio (Hg) e o cádmio (Cd), os níveis de concentração no SR são cerca de 10 x maior do que em resíduos sólidos urbanos. No caso do cobre, o conteúdo é semelhante ao de minérios exploráveis (RECKZIEGEL, 2012).

Uma amostra de resíduo do shredder proveniente de uma operação de um triturador de sucata canadense possui densidade de 405 kg/m<sup>3</sup>, 6% de umidade, 18% de partículas maiores que 25,5 mm, 37% de finos (menor que 2 mm) e poder calorífico de 11,8 MJ/kg (DAY *et al.* 1996). O resíduo também apresenta metais em sua composição, tais como zinco (0,25%), chumbo e cobre. Cádmio e cromo foram encontrados em uma quantidade inferior a 0,05% (PERONDI, 2017).

A massa específica do shredder proveniente da América do Norte e da Europa pode variar de 282 a 563 kg/m<sup>3</sup> (ROY e CHAALA 2001). Os teores de umidade variam entre 0,6 e 6,6%, enquanto o poder calorífico varia entre 16,9 e 30,7 MJ/kg. Segundo Nourreddine (2007) o SR apresenta poder calorífico similar aos agentes de redução (carvão mineral, coque metalúrgico e carvão vegetal) comumente utilizados nos processos de fabricação de ferro e aço (PERONDI, 2017).

A Tabela 4 demonstra a comparação destes resultados característicos do resíduo do shredder fornecidos anteriormente.

Tabela 4: Comparação de resultados característicos do resíduo do shredder

	<b>Triturador de sucata Canadense</b>	<b>Triturador de sucata da América do Norte e da Europa</b>
Massa Específica	405 kg/m <sup>3</sup>	282 – 563 kg/m <sup>3</sup>
Umidade	6%	0,6 – 6,6%
Poder Calorífico	11,8 MJ/kg	16,9 – 30,7 MJ/kg

Fonte: DAY *et al.* 1996; NOURREDDINE (2007); PERONDI, 2017; ROY e CHAALA 2001

Dados recentes mostram que a indústria global automotiva gera aproximadamente 50 milhões de toneladas de resíduos a cada ano. Atualmente os metais contabilizam 75% do peso dos veículos em final de vida, e são quase completamente recuperados (VIGANO *et al.* 2010). Os 25% remanescentes estão à espera de uma tecnologia de processamento de resíduos apropriada, alternativa à disposição em aterros (PERONDI, 2017).

A indústria automobilística está enfrentando uma crescente pressão para aplicar “atividades verdes” dentro da gestão da cadeia produtiva. O avanço tecnológico e a utilização de materiais diversificados trouxeram grandes avanços a este setor, entretanto, com as recentes preocupações ambientais, pode-se afirmar que o sucesso da indústria automotiva em longo prazo dependerá da capacidade do setor para mixar o seu produto final e a cadeia produtiva, com a garantia de um futuro ecologicamente sustentável.

## **2.4 DESTINAÇÃO E ESTUDOS DE APROVEITAMENTO DO RESÍDUO DO SHREDDER**

Com exceção de uma pequena parte que é encaminhada para a reciclagem ou incinerada, o resíduo do shredder é descartado em aterros, tanto dentro como fora do país, inclusive nos países da União Européia (RECKZIEGEL, 2012).

Vários processos para o tratamento dos resíduos do shredder tem sido desenvolvidos com o objetivo de aumentar a recuperação de materiais e energia do SR. As tecnologias aplicadas estão baseadas na triagem mecânica para a concentração de materiais passíveis de reciclagem, no tratamento térmico para a geração de energia e na recuperação de metais presentes no resíduo sólido, além de sua utilização como agregado em concreto (CAETANO, 2016).

A valorização física e mecânica do SR pode ser vista como uma extensão do processo de trituração e foi pesquisado intensamente nas últimas décadas. A recuperação de todos os materiais recicláveis do resíduo do shredder em uma única etapa não é viável devido à sua heterogeneidade (VERMEULEN *et al.*, 2011).

O resíduo do shredder tem potencial para gerar diferentes formas de energia. Ele pode ser processado no cimento ou no asfalto, pode gerar combustível no forno da cimenteira, e também providenciar contribuições para indústria metalúrgica na forma de combustível e aço, valorizando metais, polímeros. (MANCINI *et al.*, 2010).

Processos de separação mecânica do resíduo do shredder foram desenvolvidos no Laboratório Nacional Argonne (EUA), incluindo em escala piloto. Uma de suas plantas piloto foi desenvolvida segundo o processo ilustrado na Figura 6, ilustrando a obtenção de correntes concentradas de materiais, como polímeros e metais (JODY *et al.*, 2010). Os principais processos envolvidos são trituração, peneiramento, separação por imantação e por *Eddy Current* e granulação para remoção de espuma, terra e outros leves. A planta tem capacidade de processar 2 t/h de resíduo de shredder e atinge recuperação acima de 90% de polímeros e metais ferrosos, além de não-ferrosos residuais maiores que 6 mm.

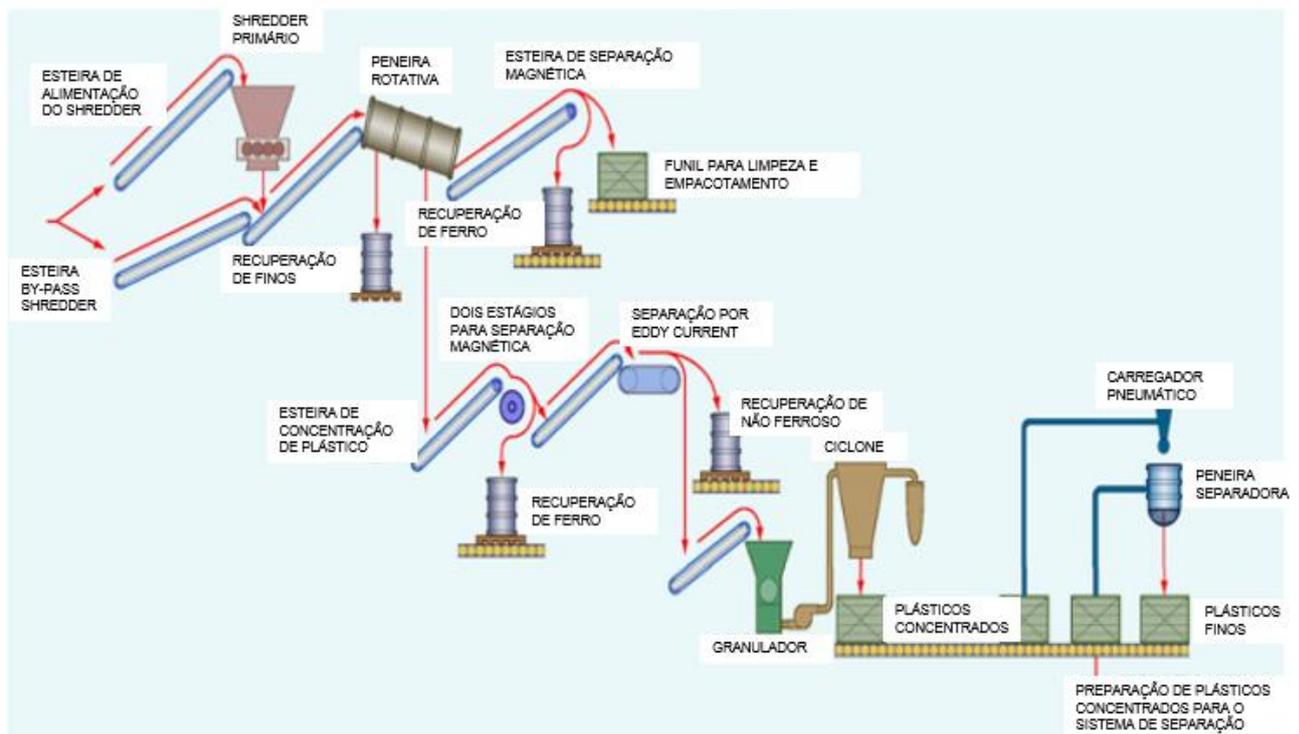


Figura 6: Operações da planta piloto de separação mecânica Argonne.

Fonte: JODY *et al.*, 2010

A empresa Belga Saly NV, utilizando equipamentos desenvolvidos pela Argonne e outros equipamentos, 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). A complexidade da planta, que operou por cerca de um ano, ocasionou problemas operacionais e em baixo rendimento de concentrado de plásticos. A separação termoplástica é baseada no aquecimento do concentrado de polímeros utilizando radiação infravermelha, o qual é alimentado 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.*, 2010).

O processo WESA-SLF, ilustrado na Figura 7, inicia pela cominuição do resíduo de shredder, sendo realizada em dois estágios para redução de custo com energia. A fração magnética é removida por separação magnética. Em seguida, realiza-se a secagem do material para menos de 2%, garantindo que esteja desagregado para a classificação a ar (remoção de espuma e SR) e subsequente peneiramento em 3 frações, que são alimentadas em classificadores a ar “zigzag”, resultando nas correntes de cobre, minerais + metais e orgânicos (SATTLER e LAAGE, 2000).

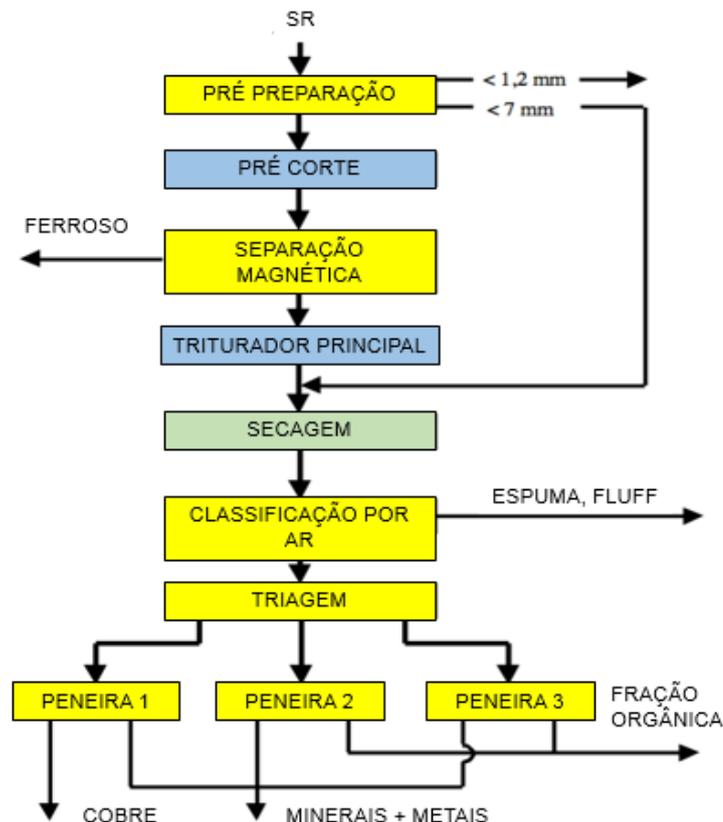


Figura 7: Processo WESA-SLF

Fonte: SATTLER e LAAGE, 2000

De uma maneira geral, observa-se que métodos de separação por gravidade são comuns em plantas de processamento de SR. 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 (JODY *et al.*, 2010).

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 (temperatura de 850-1120°C), seguido de uma câmara de pós combustão com injeção de metano e seguida de um trocador de calor para produção de vapor, sendo alimentada por SR. A relação estequiométrica de oxigênio utilizada no início do forno rotativo foi mantida baixa (menor que 1) para priorizar a gaseificação do sólido, enquanto a segunda câmara foi responsável por completar a reação de combustão. Foram realizadas análises

químicas dos resíduos antes e após a combustão, incluindo análise dos gases emitidos, resultando em parâmetros de emissão abaixo dos limites legais estabelecidos pela Diretiva 2000/76/EC.

Edo *et al.* (2013) realizaram testes em uma amostra de SR 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 (15000 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 (23700 kJ/kg) e baixa emissão de dioxinas e furanos (300 pg i-TEQ/g), sendo a mais adequada para tal fim. É possível calcular o equivalente tóxico internacional (i-TEQ) a partir da multiplicação dos valores dos fatores de equivalência tóxica TEFs pelos respectivos valores das concentrações determinadas para cada congêner. As concentrações ambientais, os limites de emissões e de outros padrões são universalmente expressos em unidades de i-TEQ.

A conversão termoquímica (pirólise) se apresenta como uma forma de destinação para o SR. A pirólise ocorre a temperaturas moderadas e na ausência de oxigênio. A matéria orgânica presente no resíduo (plásticos, borrachas, etc.) é decomposta em três frações (sólido carbonoso/óleo/gás combustível), sendo que o gás combustível produzido é constituído basicamente de gases não-condensáveis ( $H_2/CO/CH_4/CO_2$ ) e gases de maior massa molar ( $C_xH_y$ ). O referido gás pode ser empregado em diversas aplicações, tais como na produção de calor e/ou energia elétrica (PERONDI, 2017).

Alguns problemas conhecidos relacionados à pirólise de plásticos são: (i) maior tempo necessário que outros materiais devido à baixa transferência de calor, (ii) resíduo sólido com alta tendência de se aderir às paredes do reator, e (iii) dificuldade de bombeamento devido à elevada viscosidade de alguns plásticos quando aquecidos (JODY *et al.*, 2010).

Day *et al.* (1996) relataram a pirólise de resíduo automotivo, bem como a análise química dos produtos. Para isso, foi utilizado um forno rotativo comercial com

alimentação de aproximadamente 200 kg/h, correspondendo ao tempo de residência de cerca de 15 minutos. O balanço de massa mostrou que os produtos se dividiram em 26% de gases, 10% de água, 21% de óleo e 43% de sólidos (composição mássica). A corrente gasosa possuía predominantemente CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> (25%, 18%, 18% e 7%, respectivamente) e outros hidrocarbonetos, conferindo um poder calorífico de 45000 kJ/kg. O óleo, composto por uma mistura de hidrocarbonetos aromáticos apresentou poder calorífico de 41000 kJ/kg, porém devido à presença de compostos nitrogenados, sulfurados e clorados, seu uso pode ser limitado, diminuindo seu valor de mercado. Os autores concluíram que embora tenha sido demonstrado o alto poder calorífico dos produtos de pirólise do resíduo do shredder, estudos de recuperação dos metais devem ser realizados para que se possa demonstrar sua viabilidade econômica, uma vez que o custo de aterro nos Estados Unidos (local de realização do estudo) é baixo.

O resíduo do shredder tem um poder calorífico favorável (14000 – 30000 kJ/kg), mas o alto teor de cinzas, as elevadas concentrações de cloro e metais pesados podem limitar a sua utilização como substituto de combustível, se for utilizado como tal. As técnicas avançadas de recuperação secundária são separar o SR, com objetivo de isolar os materiais combustíveis com baixo teor de cinzas e com baixas concentrações de contaminantes (VERMEULEN *et al.*, 2011).

Componentes plásticos clorados como PVC ou borracha são as principais fontes das altas concentrações de cloro frequentemente encontrado no SR. Como o PVC contém cerca de 50% de cloro, a remoção do PVC do resíduo do shredder é uma maneira simples de reduzir a concentração total de cloro. Vários estudos apontaram que separação de densidade, usando uma densidade de banho de 1100 a 1200 kg/m<sup>3</sup>, pode remover a maioria (até 68%) dos plásticos clorados (densidade de cerca de 1400 kg/m<sup>3</sup> ou mais) dos materiais combustíveis do SR (VERMEULEN *et al.*, 2011).

Devido à esta presença de plásticos contendo cloro, como o PVC, a pirólise leva à formação de ácido clorídrico (HCl) como resultado da decomposição térmica, podendo haver corrosão de equipamentos. Tendo isso em vista, Nomura (2014) realizou testes em um forno de coque comercial com adição de 1 a 2% em massa de plásticos, estes contendo 2,5 a 3,2% em massa de cloro, com carvão contendo 450 ppm de cloro. Os resultados mostraram que a adição de plásticos teve mínima influência no conteúdo de cloro no coque e nos gases de coqueria, tendo a maior parte

do HCl sido absorvida pelo spray de licor de amônia através da reação química ácido-base:  $\text{HCl} + \text{NH}_3 \rightarrow \text{NH}_4\text{Cl}$ . O cloro presente nos plásticos se distribuiu em 7% para o coque, 92% para o licor de amônia e 1% para o gás de coqueria, enquanto o cloro presente no carvão se distribuiu em 43% para o coque, 56% para o licor de amônia e 1% para o gás de coqueria. Isso ocorre devido à diferença de ocorrência do cloro em plásticos e no carvão. No PVC, por exemplo, a liberação de HCl devido à carbonização ocorre mais rapidamente que no carvão (NOMURA, 2014).

Boughton & Horvath (2006) realizou um estudo com a fração do resíduo do triturador com granulometria inferior a 2,5 mm. O foco do estudo foi na caracterização e aplicação do material como substituto mineral em cimenteiras. Este estudo apresentou índices de Fe de 22%, Si de 17%, Al de 8% e Ca de 4%. Na maioria dos resultados, os valores de Si são maiores que 10% em massa, principalmente devido à presença de vidro. Elementos nocivos para a produção de cimento, como cloro e enxofre, foram determinados por Boughton & Horvath (2006) em níveis de 1,1% e 0,25%, respectivamente. O estudo mostrou que elementos alcalinos como potássio e sódio, em elevadas quantidades, podem também causar problemas de corrosão nas paredes dos fornos.

Figueiredo (2016) relatou estudos de aplicação de uma fração do resíduo do shredder na fabricação de tijolos. Para os ensaios de análise visual o bloco cerâmico estrutural padrão e os protótipos contendo 10% e 20% de resíduo possuíam aspecto homogêneo, sem quebras ou trincas e continham arestas vivas. Para análise dimensional o bloco cerâmico estrutural padrão e o protótipo contendo 20% de resíduo não atendem nos requisitos da NBR 15.270 (ABNT, 2005) quanto aos parâmetros de altura média, septos e espessura de parede externa. O protótipo contendo 10% de resíduo atende aos requisitos da Norma quanto a todos parâmetros dimensionais analisados, altura, largura, comprimento, espessura de septo e parede externa e desvio máximo em relação ao esquadro e a fecha. Nos ensaios realizados tanto o bloco cerâmico estrutural quanto aos protótipos contendo 10% e 20% de resíduo atendem o limite mínimo de resistência à compressão característica (7,0 MPa). O protótipo contendo 10% de resíduo apresentou resistência à compressão superior aos demais protótipos analisados. Percebe-se que para todos os ensaios realizados para absorção de água, as amostras dos blocos cerâmicos estruturais padrão e dos

protótipos contendo 10% e 20% de resíduo atendem às especificações normativas (entre 8% e 22%).

Fica claro que se a fração menor que 2mm do resíduo do Shredder for utilizada como matéria-prima para indústria cerâmica o material deixará de ser enviado para aterro e haverá a possibilidade de consumir menos argila das jazidas (recurso natural). Além disto, a indústria siderúrgica e a cerâmica teriam possibilidade de redução de seus custos, a primeira pois estaria deixando de pagar para aterrar o material, e a segunda pois evitaria os custos operacionais de retirada de argila das jazidas, desta forma, seria uma oportunidade de tornar ambas as empresas mais competitivas e sustentáveis (FIGUEIREDO, 2016).

Diversos estudos já vem sendo conduzidos com a finalidade de realizar o reaproveitamento de frações segregadas do resíduo do shredder, e este trabalho tem como finalidade contribuir neste sentido.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e os métodos utilizados para realizar a caracterização das frações do resíduo do shredder.

#### 3.1 MATERIAIS

As amostras do resíduo do shredder (SR) utilizadas durante o desenvolvimento deste trabalho são provenientes de uma indústria siderúrgica do Vale dos Sinos, situada no Estado do Rio Grande do Sul. As referidas amostras de resíduo foram geradas no triturador de sucata da siderúrgica.

A Figura 8 mostra um fluxograma geral da planta de processamento de sucatas metálicas da siderúrgica.

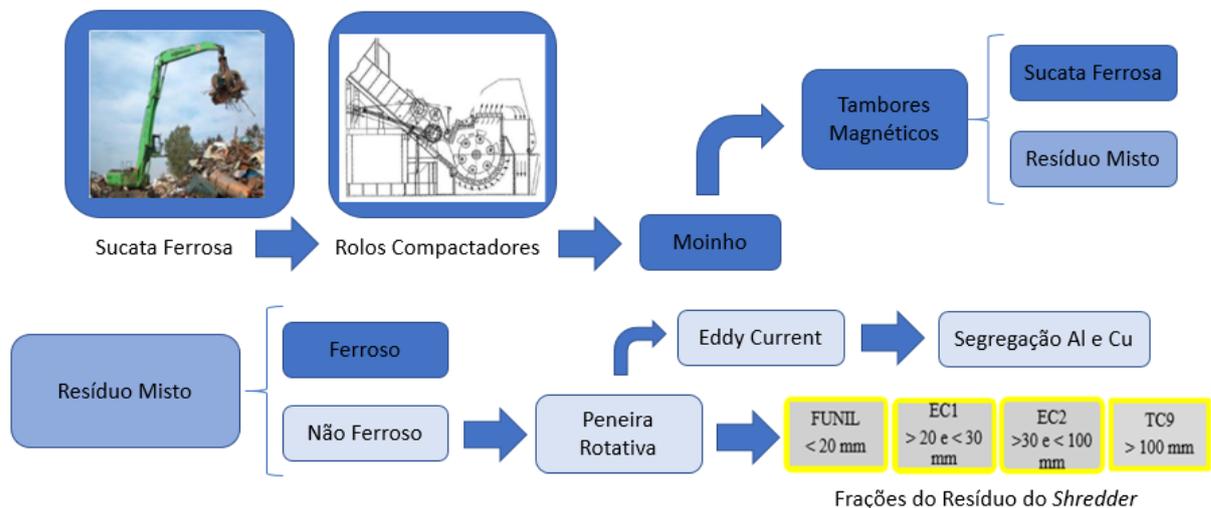


Figura 8: Fluxograma geral da planta de processamento de sucatas metálicas da Siderúrgica

Fonte: O autor.

As caixas destacadas (em amarelo) no fluxograma referem-se aos pontos de coleta de cada uma das amostras que serão caracterizadas. As frações serão referenciadas ao longo deste trabalho como “Funil”, “EC1”, “EC2” e “TC9”, uma vez que esta é a nomenclatura utilizada pela empresa cujo resíduo é objeto deste estudo, sendo que “Funil”, “EC1”, “EC2” e “TC9” são as frações do resíduo do shredder com granulometrias respectivas de < 20 mm, de 20 a 30 mm, de 30 a 100 mm e > 100 mm.

O procedimento de coleta do resíduo em estudo foi realizado durante cinco noites seguidas de operação. Os resíduos gerados no processo de trituração da

sucata foram coletados no início e no final do processo. As amostras foram acondicionadas em sacos (*bags*) com capacidade de até 600 kg. A amostragem (Figura 9), bem como o procedimento de quartejamento (Figura 10), foram realizadas conforme a NBR 10007 (ABNT, 2004b).



Figura 9: Procedimento de amostragem na indústria siderúrgica

Fonte: o autor.

O processo de quartejamento consiste na divisão em quatro partes iguais de uma amostra pré-homogeneizada. Em seguida são tomadas duas partes opostas entre si para constituir uma nova amostra, e descartadas as partes restantes. As partes descartadas são misturadas totalmente, e o processo de quartejamento é repetido até que se obtenha a massa desejada (NBR 10007 (ABNT, 2004b)).



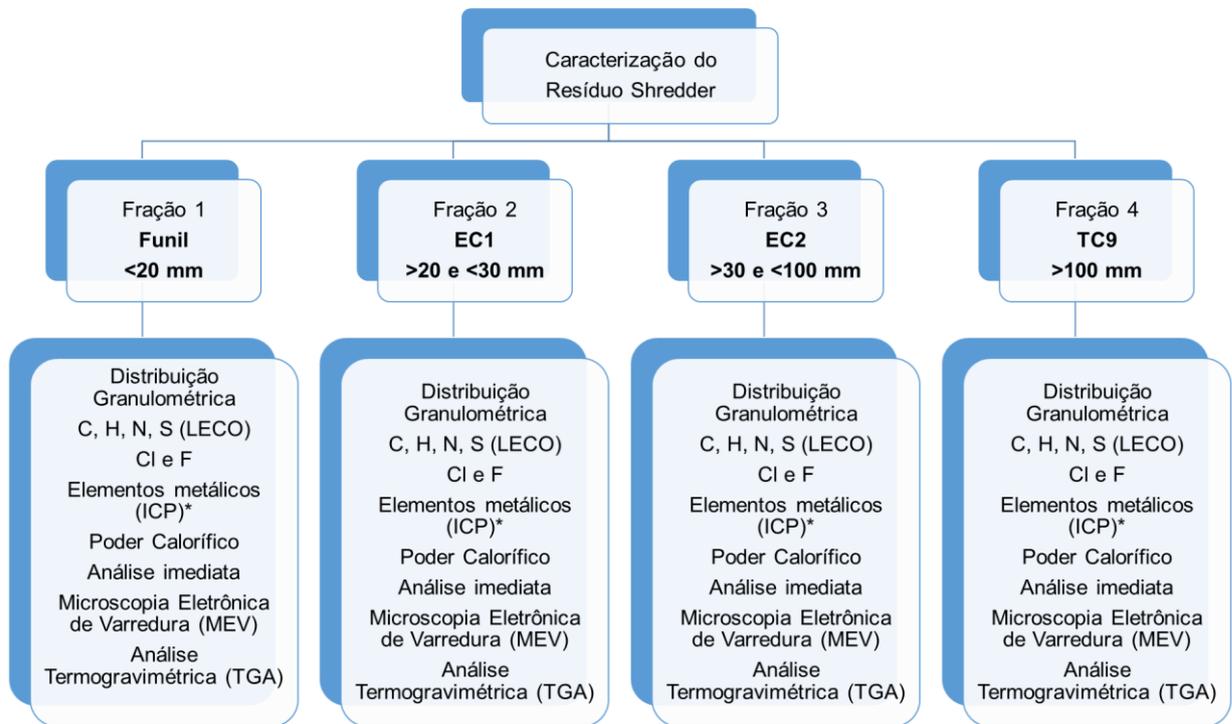
Figura 10: Procedimento de quarteamento das amostras na indústria siderúrgica

Fonte: o autor.

Após o procedimento de quarteamento, as amostras foram compostas da seguinte forma: 900 g relativas ao início do processo e 100g relativas ao final do processo. Este procedimento teve como objetivo a representatividade da amostra, a fim de simular a geração normal deste resíduo na planta e teve orientação da empresa em estudo. A preparação das amostras foi executada no Laboratório de Energia e Bioprocessos da Universidade de Caxias do Sul.

### 3.2 MÉTODOS

Um Fluxograma geral dos métodos utilizados neste trabalho é apresentado na Figura 11.



\* ICP – Espectrometria de emissão ótica com plasma acoplado.

Figura 11: Fluxograma geral dos métodos utilizados neste trabalho

Fonte: o autor.

#### 3.2.1 Distribuição granulométrica

A distribuição granulométrica foi conduzida a partir de 150 g de cada amostra (EC1, EC2 e Funil). Foram consideradas as seguintes etapas: inicial e final do processo, além da mistura das etapas inicial e final, conforme descrito anteriormente no item “Materiais”.

A análise de distribuição granulométrica para a fração TC9 não foi conduzida, considerando que o tamanho de partícula da referida fração é maior do que 100 mm. Se for considerada a maior abertura da série Tyler de peneiras (peneiras 4, 6, 8, 10, 14, 20, 28, 35, 48, 65 150 e 200 *mesh*), tem-se a peneira 4, que possui uma abertura de 4,76 mm. Assim, não se justifica a análise de distribuição, considerando que todas as partículas ficariam retidas nesta peneira.

O ensaio foi realizado por seis minutos, fazendo-se uso de um agitador eletromagnético da marca Tamis.

### **3.2.2 Preparação das amostras de SR**

Após o procedimento de quarteamento e constituição das amostras (900 g relativas ao início do processo e 100g relativas ao final do processo), as mesmas foram cominuídas em dois moinhos de facas. O primeiro moinho da empresa Primotécnica, modelo P1001 e o segundo moinho da marca Marconi, modelo MA 580, série 995724. Esta redução do tamanho de partícula possibilitou a realização das análises posteriores, incluindo as análises térmicas e imediata. Um fluxograma com as etapas deste processo de preparação é apresentado na Figura 12. A preparação das amostras foi executada no Laboratório de Polímeros (LPol) da Universidade de Caxias do Sul.

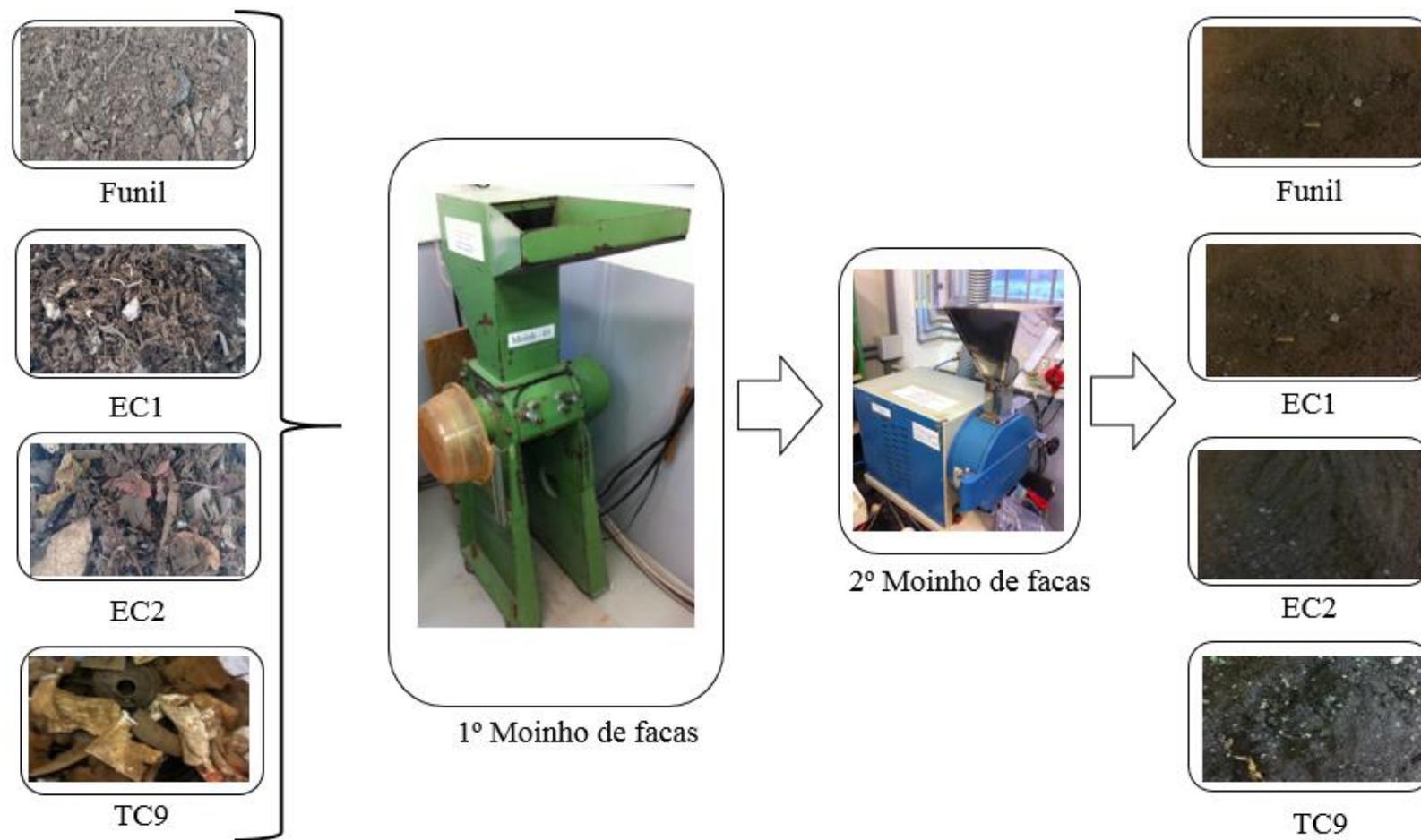


Figura 12: Fluxograma do processo de preparação das amostras

Fonte: o autor.

### 3.2.3 Análise Térmica

Os experimentos termogravimétricos foram conduzidos no Laboratório de Energia e Bioprocessos (LEBIO) da Universidade de Caxias do Sul, com amostras de diâmetro inferior a 0,9 mm e massa inicial de aproximadamente 10 mg. Os ensaios foram realizados em uma balança termogravimétrica STA 449 F3 Jupiter® da marca Netzsch em atmosfera inerte (N<sub>2</sub>) a uma vazão volumétrica de 50 mL.min<sup>-1</sup>. O cadinho utilizado foi de alumina. Uma taxa de aquecimento de 25 °C.min<sup>-1</sup> foi utilizada. As temperaturas dos experimentos variaram desde a temperatura ambiente até a temperatura final de 800 °C.

### 3.2.4 Análise Imediata

Os ensaios para a determinação da análise imediata foram realizados no Laboratório de Energia e Bioprocessos (LEBIO) da Universidade de Caxias do Sul, com as amostras previamente preparadas. As análises foram realizadas tendo como base as normas D 3172-89 (1997) e D 3173-87 (1996) da *American Society for Testing and Materials* (ASTM).

Com relação à determinação do teor de umidade das amostras, foi utilizada uma balança analítica da marca Shimadzu, modelo AUY220 e uma estufa da marca Delio, modelo A3SED. As etapas a seguir apresentam como o ensaio foi conduzido.

- 1) Aquecimento do conjunto (cadinho + cápsula) sob uma temperatura de 105 °C;
- 2) Após 4,5 h o conjunto é disposto no dessecador até o resfriamento, para posterior pesagem;
- 3) Adiciona-se 1g da amostra na cápsula e coloca-se imediatamente a tampa;
- 4) Remove-se a tampa e coloca-se a cápsula na estufa pré-aquecida, renovando o ar a uma taxa de 2 a 4 vezes por minuto;
- 5) O conjunto (cadinho + cápsula + amostra) permanece no interior da estufa por 4 horas na temperatura de 105 °C;
- 6) Decorridas estas 4 horas, coloca-se o conjunto no dessecador até o resfriamento e, finalmente realiza-se a pesagem do conjunto resfriado.

### 3.2.5 Teor de Matéria volátil

A determinação de matéria volátil foi realizada de acordo com a metodologia descrita a seguir, fazendo-se uso de uma mufla da marca Fornitec, modelo 1963 e de

uma balança analítica da marca Shimadzu, modelo AUY220. A Figura 13 mostra o fluxograma com as diferentes etapas da referida análise.

- 1) Calcina-se o conjunto (cadinho + tampa) a uma temperatura de 950 °C por 2h;
- 2) Em seguida o conjunto é disposto no dessecador até o resfriamento, para posterior pesagem;
- 3) Adiciona-se 1g de amostra no cadinho e coloca-se imediatamente a tampa;
- 4) O cadinho com a amostra é disposta na frente da mufla a 950 °C por 2 min e, em seguida é disposta no centro da mufla fechada por 5 min;
- 5) O conjunto (cadinho + amostra + tampa) é disposto no dessecador até o resfriamento e, finalmente realiza-se a pesagem do conjunto resfriado.

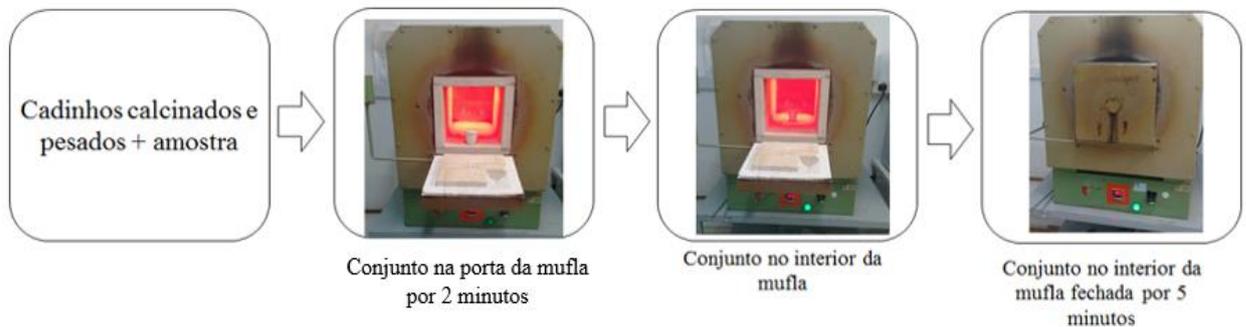


Figura 13: Fluxograma da análise do teor de matéria volátil

Fonte: o autor.

### 3.2.6 Teor de Cinzas

Tradicionalmente, a determinação do teor de cinzas envolve o aquecimento da amostra em condições específicas fazendo-se uso de uma mufla (ASTM D3172-D3189, 1997). Este procedimento exige uma quantidade significativa de amostra. Diferentes trabalhos têm sido conduzidos com o intuito de utilizar análises térmicas como método alternativo à utilização da mufla (WARNE, 1996).

Inicialmente a determinação do teor de cinzas nas amostras foi conduzida segundo as normas ASTM D3172-D3189 (1997), com a utilização de um forno tipo mufla. Os resultados obtidos a partir das referidas normas não foram confiáveis. Desta forma, a determinação do teor de cinzas nas amostras foi realizada a partir de análises térmicas (TGA).

A norma ASTM E1131-E1186 (1987) é utilizada para a determinação de materiais com altas e médias volatilidades, materiais combustíveis, além do teor em

cinzas em alguns compostos a partir de análises térmicas. No entanto, esta norma só dá orientações de taxas (rampas) de aquecimento e/ou temperaturas finais, que devem ser adaptadas ao tipo de amostra a ser analisada (MAYORAL et al. 2001).

Assim, a determinação do teor de cinzas para as amostras deste trabalho foi conduzida fazendo-se uso de uma balança termogravimétrica STA 449 F3 Jupiter ® da marca Netzsch. A análise foi realizada com atmosfera de ar sintético, amostras com diâmetro inferior a 0,9 mm e massa inicial de aproximadamente 10 mg. O cadinho utilizado foi de alumina. A rampa de aquecimento foi conduzida da temperatura ambiente até 500 °C (taxa de 8,33 °C.min<sup>-1</sup>) e da temperatura de 500 °C até 950 °C (taxa de 7,92 °C.min<sup>-1</sup>). As referidas taxas de aquecimento foram utilizadas com o objetivo de atender as recomendações da norma (a temperatura atingida em 1 h deve ser de 500 °C e a temperatura atingida nas 2 h deve ser de 950 °C). Finalmente, as amostras foram deixadas nesta temperatura por mais 2 h.

### 3.2.7 Teor de Carbono Fixo

A determinação do teor de carbono fixo é realizada a partir dos teores de cinza e de matéria volátil, conforme a Equação 1:

$$\%CF = 100 - \%CZ - \%MV \quad (1)$$

Onde,

CF é carbono fixo, CZ cinzas e MV matéria volátil.

### 3.2.8 Análise Elementar

A análise elementar das frações estudadas foi realizada no Laboratório de Processamento Mineral (LAPROM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) segundo as seguintes normas técnicas: ASTM D5373 (2002) (carbono, hidrogênio e nitrogênio) e ASTM D4239-14e2 (2014) (enxofre), utilizando instrumental da ELEMENTAR, modelo Vario Macro.

### 3.2.9 Análise de Halogênios (Cl/F)

As análises dos halogênios (Cl/F) foram conduzidas no Laboratório de Análises Químicas Industriais e Ambientais (LAQIA) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

Primeiramente, as amostras de shredder foram cominuídas (tamanho de partícula de 250  $\mu\text{m}$ ) e posteriormente, a partir das referidas amostras fez-se o preparo de uma pastilha com 200 mg de amostra e 300 mg de celulose. As pastilhas foram submetidas a radiação micro-ondas. Em seguida ocorreu a combustão das pastilhas, fazendo-se uso de  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  como iniciador. O sistema foi pressurizado a 20 bar em atmosfera de oxigênio. Uma solução de  $\text{NH}_4\text{OH}$  (50 mM) foi utilizada para a absorção dos gases exaustos da combustão.

As amostras foram analisadas em um cromatógrafo de íons, modelo Professional IC Ion Analysis 850, da marca Metrohm. O cromatógrafo utilizado nos ensaios possui um detector por condutividade térmica (TCD), uma alça de amostragem de 100  $\mu\text{L}$  e um amostrador automático (modelo 858 *Professional Sample Processor*, da marca Metrohm) com 112 posições. O cromatógrafo possui um sistema de supressão de  $\text{CO}_2$  (modelo 833 Supressor Unit, da marca Metrohm). Foi utilizada uma coluna trocadora de ânions (modelo Metrosep A Supp 5,250 x 4 mm d.i., 5 $\mu\text{m}$  de diâmetro de partícula) com grupos de amônio quaternário suportados em poli (álcool vinílico), e uma coluna-guarda (modelo Metrosep A Supp 15 Guard, 5x4 mm d.i., 5 $\mu\text{m}$  de diâmetro de partícula) com o mesmo material utilizado para o preenchimento da coluna de troca iônica. A vazão da bomba foi ajustada para 0,7  $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ . A fase móvel foi preparada a partir da dissolução de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  e  $\text{NH}_4\text{CO}_3$  em água. A concentração da fase móvel foi de 3,2  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  e 1  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  de  $\text{NH}_4\text{CO}_3$ .

### **3.2.10 Análise do Poder Calorífico**

As análises de poder calorífico das amostras de shredder foram conduzidas no laboratório de Energia e Bioprocessos (LEBIO) da Universidade de Caxias do Sul. O equipamento utilizado foi uma bomba calorimétrica da marca VEB, número 08, modelo 1031. A norma ASTM D5865 (2013) foi adotada. Uma descrição detalhada deste procedimento foi reportada por PERONDI (2017).

### **3.2.11 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

Primeiramente as quatro frações estudadas (FUNIL, EC1, EC2 e TC9) foram submetidas a um procedimento inicial de secagem em estufa da marca Quimis, modelo B252, 1100 W, a 105°C por 24 horas para a remoção de umidade.

Posteriormente, foram maceradas e, seguidamente dispostas em um porta amostra para serem recobertas com uma fina camada de ouro antes de serem analisadas.

As análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram realizadas em um equipamento da marca JEOL, modelo JSM 6060, com uma tensão de aceleração de 10 kV.

### **3.2.12 Elementos Metálicos**

As análises dos teores de metais foram conduzidas no Laboratório Químico da Unidade Aços Especiais Brasil de Charqueadas, e o equipamento utilizado foi um analisador ICP-OES e com tocha em posição axial, modelo Vista-MPX (marca Varian).

Inicialmente, as quatro frações estudadas (FUNIL, EC1, EC2 e TC9) foram preparadas por digestão ácida. Para o referido procedimento, foram utilizadas amostras de 1g para as frações FUNIL e EC1, e de 5 e 10 g para as frações EC2 e TC9, respectivamente. Às amostras foram adicionados 25 mL de HCl 50% (v/v). Posteriormente, a solução foi mantida sob agitação em uma chapa de aquecimento (marca Tecnal TE-038) a 300 °C, até que a solução se tornou límpida e, que fosse finalizada a liberação dos gases (característica da digestão da matéria orgânica). Comumente, para que esta etapa seja totalmente concluída, é necessário um tempo mínimo de 20 minutos. No caso das amostras em questão, um tempo total de 1 hora foi necessário.

Ao término da liberação dos gases, a solução foi retirada da chapa de aquecimento, e foram adicionados mais 25 mL de HCl 50% (v/v). Em seguida a solução foi novamente colocada na chapa por mais 10 minutos (300 °C). Finalmente, foram adicionadas algumas gotas de HNO<sub>3</sub>, e as amostras permaneceram na chapa por mais 5 minutos para posteriormente serem resfriadas a temperatura ambiente. Na Figura 14 são apresentadas as soluções durante o procedimento de digestão ácida.



Figura 14: Soluções durante o procedimento de digestão ácida.

Fonte: o autor.

Em seguida, realizou-se o procedimento de filtração com papel filtro quantitativo JP41 de faixa Preta-Porosidade para finos ( $80 \text{ g/m}^3$ ). Cada amostra foi transferida para um balão volumétrico de 100 mL, sendo este avolumado com água destilada e deionizada, conforme pode ser visualizado através da Figura 15.

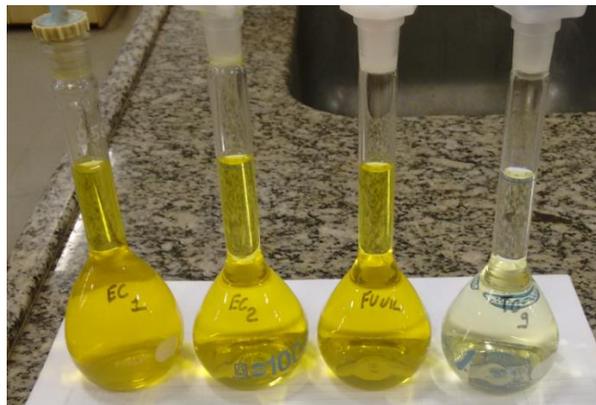


Figura 15: Balões volumétricos contendo as soluções filtradas e avolumadas para análise do teor de metais.

Fonte: o autor.

Tendo em vista a heterogeneidade das frações estudadas (FUNIL, EC1, EC2 e TC9), as análises foram conduzidas em triplicata. A triplicata foi constituída de alíquotas distintas das diferentes frações estudadas. Os resultados da concentração de metais nas diferentes amostras foram obtidos a partir de curvas de calibração com concentrações conhecidas dos elementos metálicos de interesse.

### **3.2.13 Separação Granulométrica para posterior determinação de metais (Fe / Zn / Al /Pb)**

A separação granulométrica foi conduzida a partir de aproximadamente 1 kg de cada amostra (EC1, EC2 e Funil). A separação granulométrica para a fração TC9 não foi conduzida. As amostras foram submetidas as peneiras 4 (4,75 mm), 50 (0,297 mm) e fundo (<0,297 mm).

Após esta separação foi determinada a concentração de metais (Fe / Zn / Al / Pb) para as diferentes faixas granulométricas de cada fração conforme método descrito no item 3.2.12 Elementos Metálicos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados das análises e suas respectivas discussões.

### 4.1 COMPOSIÇÃO DAS AMOSTRAS

A segregação das amostras permitiu a separação em nove categorias distintas: madeira, plástico, metal, espuma, tecido, borracha, solo, vidro e elementos não-identificados e pedras. As Figuras 16 a 19 apresentam a separação das amostras pelas referidas categorias.

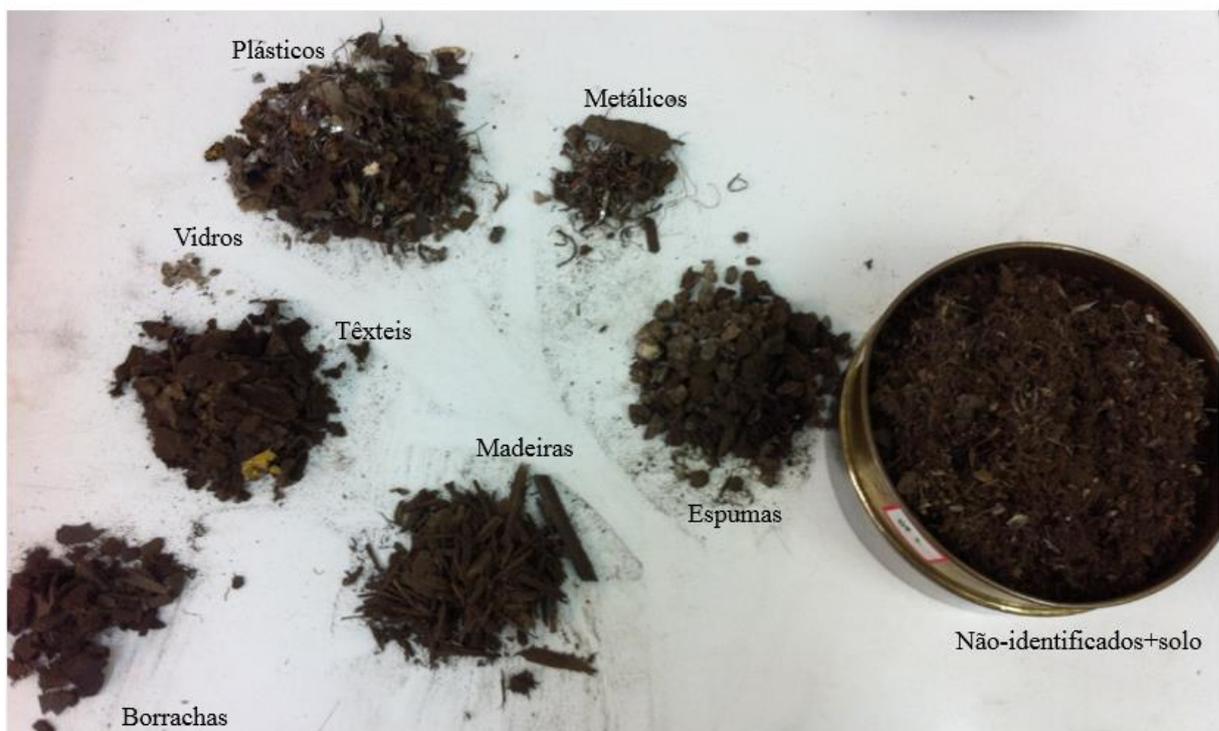


Figura 16: Separação da amostra EC1 por categorias (granulometria  $>20$  e  $<30$  mm).

Fonte: O autor



Figura 17: Separação da amostra EC2 por categorias (granulometria >30 e <100 mm).

Fonte: O autor



Figura 18: Separação da amostra Funil por categorias (granulometria <20 mm).

Fonte: O autor



Figura 19: Separação da amostra TC9 por categorias (granulometria >100 mm).

Fonte: O autor

Através da separação por categorias foi possível determinar a composição das amostras. As Figuras 20 a 23 apresentam a composição por categoria de cada amostra.

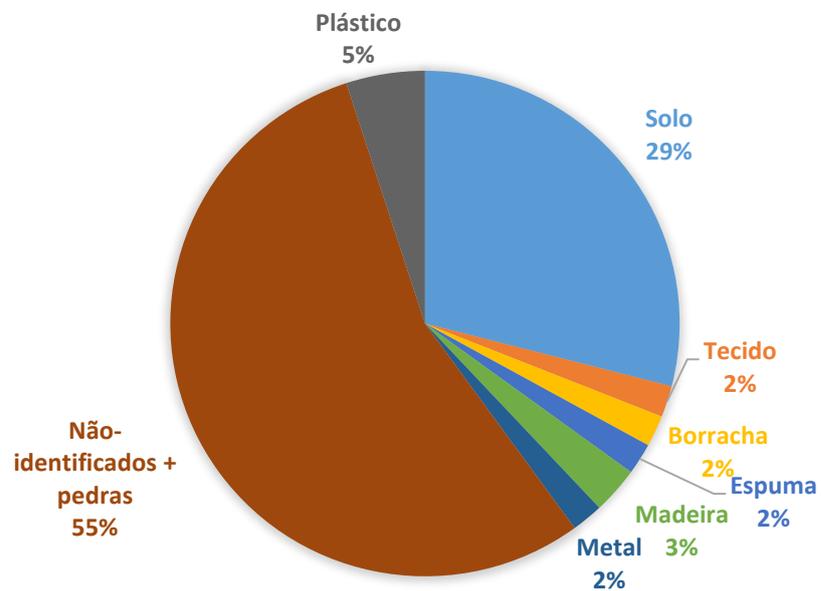


Figura 20: Composição da amostra EC1.

Fonte: O autor

A amostra EC1 é constituída principalmente de elementos não-identificados e solo, representando 84% da composição total da referida amostra.

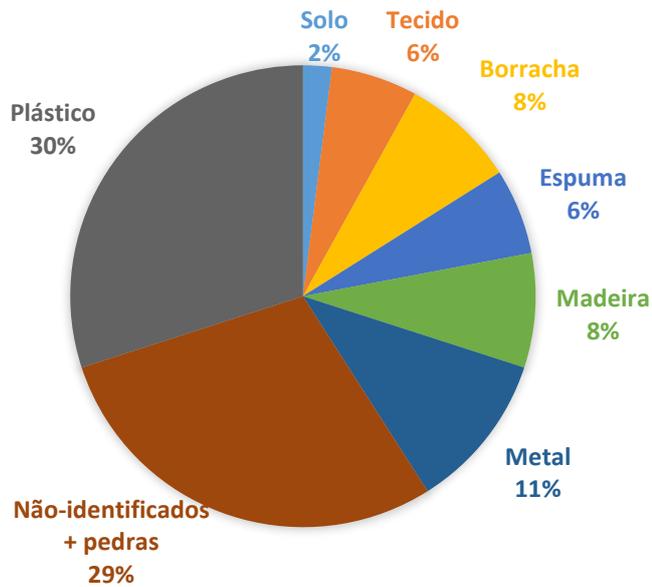


Figura 21: Composição da amostra EC2.

Fonte: O autor

A amostra EC2 é composta principalmente de plásticos, elementos não-identificados e metais, totalizando 70% da amostra. Na amostra EC2 foi observado um aumento da quantidade de madeira, espuma, tecido e borracha em relação à amostra EC1.

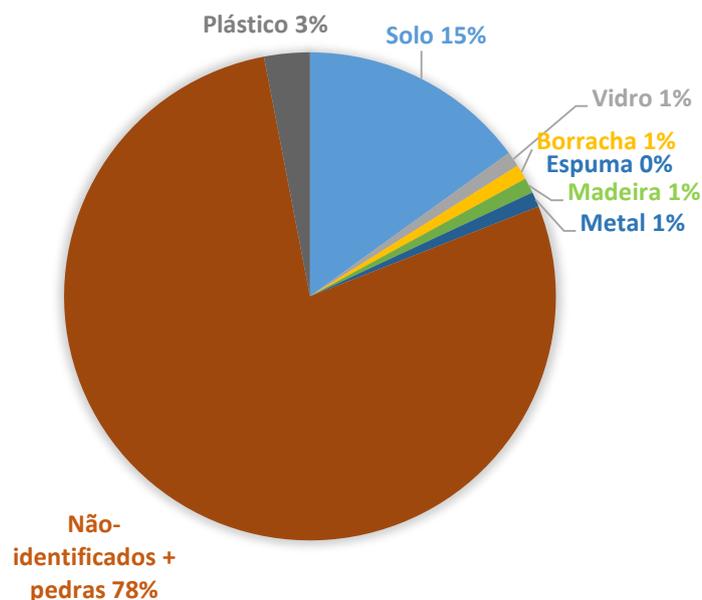


Figura 22: Composição da amostra Funil.

Fonte: O autor

A amostra Funil é constituída basicamente de elementos não-identificados e solo, que representam 93% da amostra.

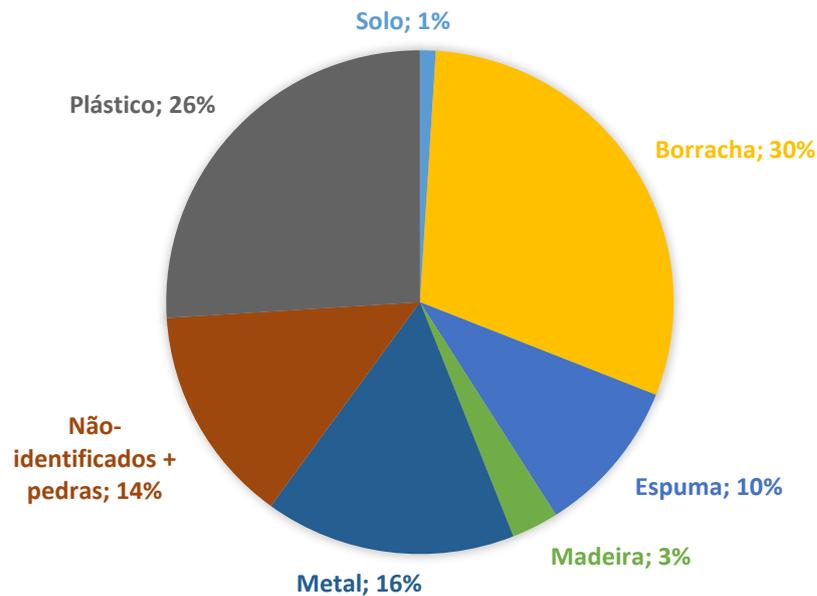
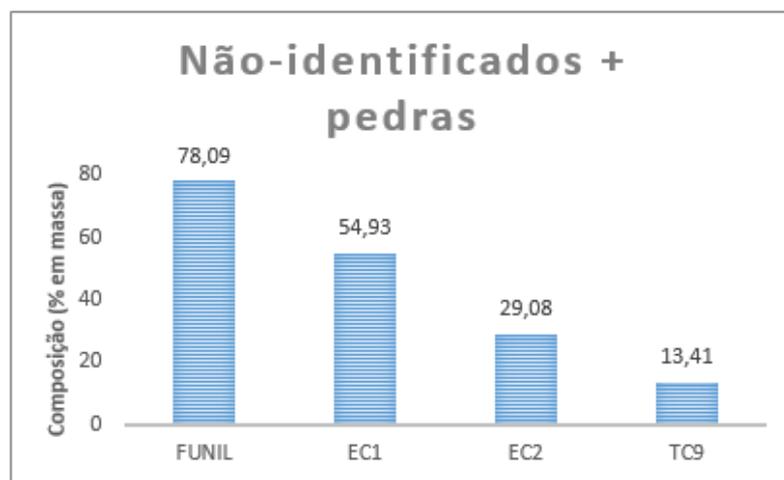


Figura 23: Composição da amostra TC9.

Fonte: O autor

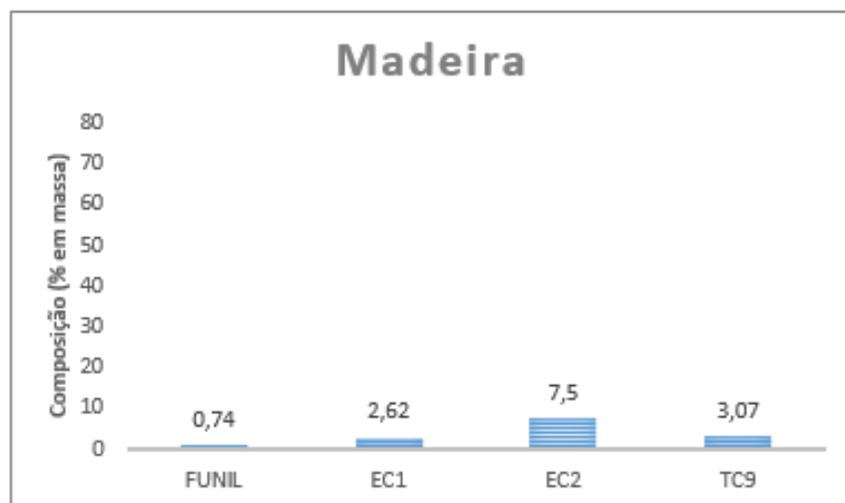
Na amostra TC9 é possível observar uma distribuição mais uniforme dos constituintes. Os constituintes em maior quantidade presentes na amostra são as borrachas, os plásticos e os metais. Os metais presentes na amostra estão associados a peças de grandes dimensões (massa de aproximadamente 390 g).

Na Figura 24 é apresentada a distribuição das categorias nas quatro amostras avaliadas.

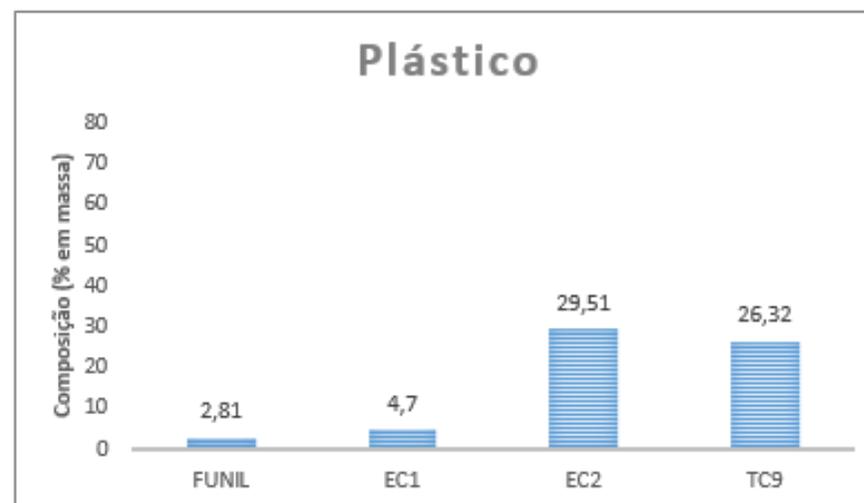


(a)

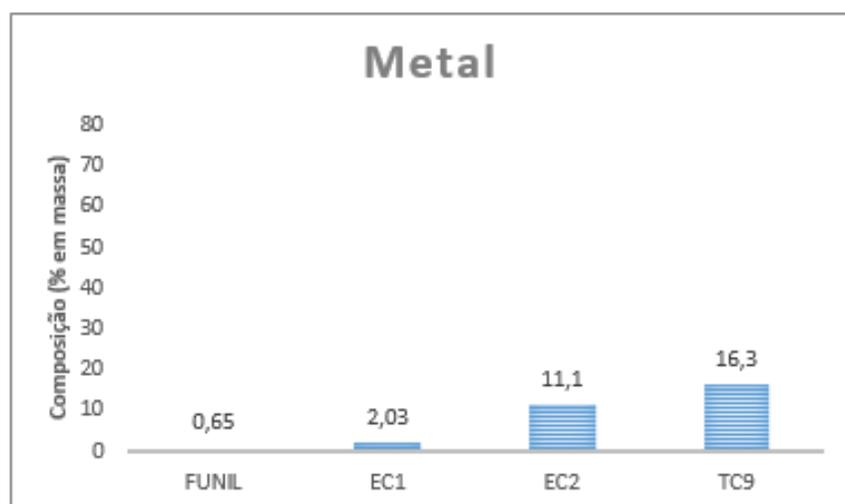
Figura 24: Distribuição das categorias por amostra.



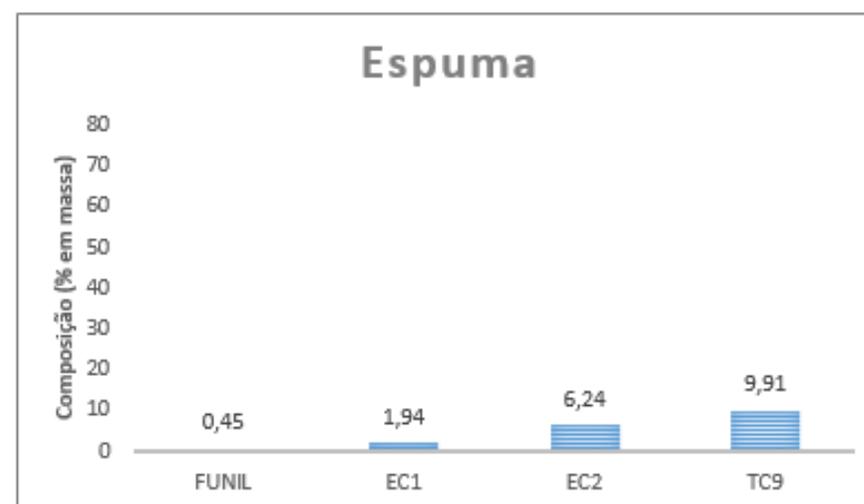
(b)



(c)

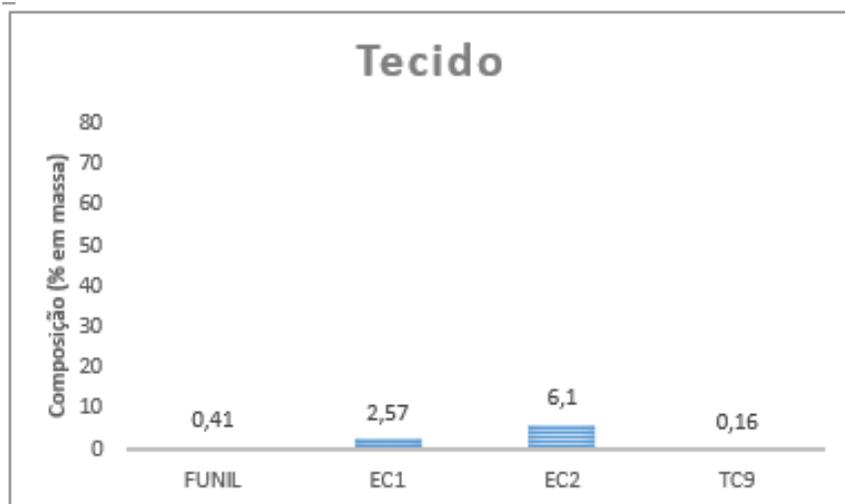


(d)

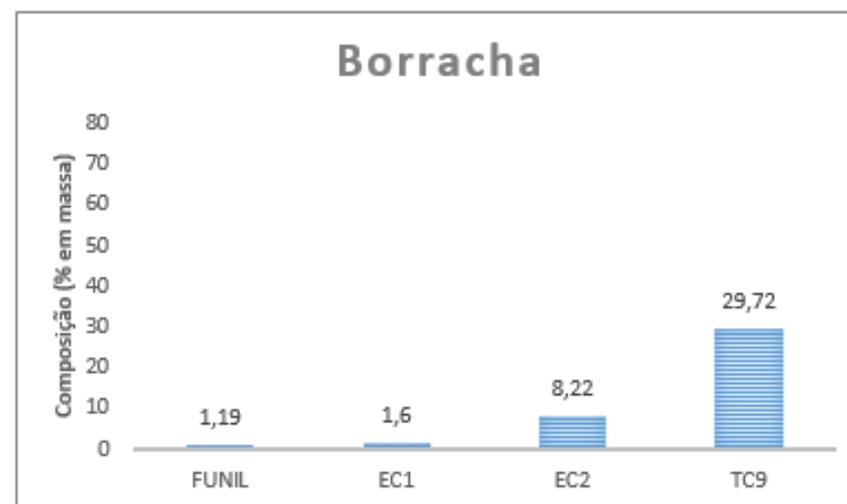


(e)

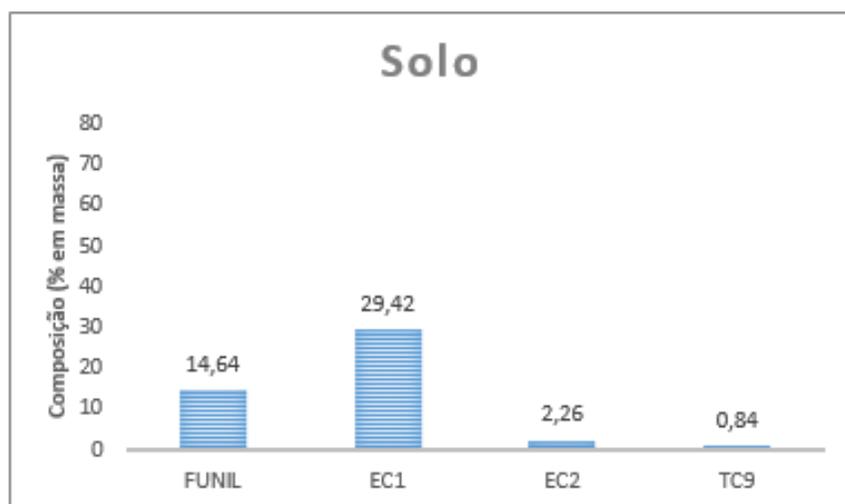
Figura 24: Distribuição das categorias por amostra (continuação).



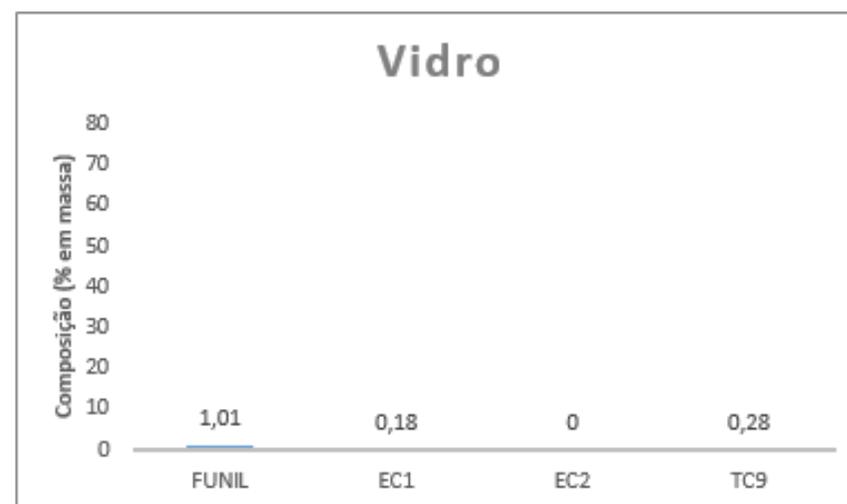
(f)



(g)



(h)



(i)

Figura 24: Distribuição das categorias por amostra (continuação).

A partir da Figura 24 (a) é possível observar que os elementos não identificados + pedras, diminuem ao longo da peneira rotativa, o equipamento é composto por seis setores distribuídos da seguinte forma: 4 setores de peneiras com abertura de 20 mm, seguidos de 1 setor de peneiras com abertura de 30 mm e de 1 setor de peneiras com abertura de 100 mm. A maior quantidade desta categoria foi identificada na amostra Funil (78,09%). Este fato ocorre, pois, se trata de um material fino e grande parte fica retida no início da peneira.

Na Figura 24 (b) verifica-se que a quantidade de madeira aumentou ao longo da peneira rotativa (0,74 – 7,50%), reduzindo somente na última etapa (3%). O maior teor de madeira foi encontrado na amostra EC2 (7,50%).

A maior quantidade de plásticos (Figura 24 (c)) foi observada na amostra EC2 (29,51%). O comportamento desta categoria foi similar à categoria madeira, ou seja, houve um aumento ao longo da peneira e uma redução na última etapa do processo (TC9).

A maior quantidade de metais (Figura 24 (d)) foi verificada na última etapa do processo (TC9). A elevada quantidade nesta etapa está associada à presença de peças de grandes dimensões (massa de aproximadamente 390 g), conforme relatado anteriormente.

A maior quantidade de espumas (Figura 24 (e)) também foi observada na última etapa do processo (TC9). Ao longo do processo foi observado um aumento da quantidade de espuma nas amostras.

A categoria tecido (Figura 24 (f)) apresentou comportamento análogo às categorias madeira e plástico, ou seja, houve um aumento ao longo da peneira, e redução na última etapa do processo (TC9).

A categoria borrachas (Figura 24 (g)) aumentou de 1,19 para 29,72% de forma contínua ao longo da peneira rotativa.

A maior quantidade de solo (Figura 24 (h)) foi observada na amostra EC1 (29,42%), enquanto a menor quantidade foi verificada na amostra TC9 (0,84%).

Finalmente, para a categoria vidro (Figura 24 (i)), a maior quantidade foi observada na amostra Funil (1,01%), enquanto para a amostra EC2 não foi detectada a presença desta categoria.

Na Tabela 5 pode-se comparar os dados das frações estudadas com valores reportados na literatura.

Tabela 5: Comparação da composição das amostras estudadas com valores reportados na literatura.

	Saxena et al., 1995	Mirabile et al., 2002 (>10 e <200 mm)	Reckziegel, 2012 (>2 mm)	Funil <20 mm	EC1 >20 e <30 mm	EC2 >30 e <100 mm	TC9 >100 mm
Metal	6,40	3,00	5,00	0,65	2,03	11,10	16,30
Madeira	4,40	-	5,00	0,74	2,62	7,50	3,07
Plástico	21,90	41,00	5,00	2,81	4,70	29,51	26,32
Borracha	2,70	21,00	21,00	1,19	1,60	8,22	29,72
Vidro	2,00	16,00	-	1,01	0,18	0	0,28
Têxtil	4,10	10,00	4,00	0,41	2,57	6,10	0,16
Não identificados	42,90	9,00	51,00	78,09	54,93	29,08	13,41

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 5 é possível verificar que o percentual de plástico e borracha estão presentes nas frações de maior granulometria, estando de acordo com os valores obtidos por Mirabile *et al.* (2002) e Reckziegel (2012). Para a categoria não identificados é possível verificar que ela diminui de acordo com o aumento da granulometria, Mirabile *et al.* (2002) apresentam valores próximos aos encontrados para a TC9.

Para as categorias metal, madeira e têxtil os percentuais não oscilaram muito, Mirabile *et al.* (2002) obtiveram valores mais elevados para a categoria têxtil. Outro elemento que se destaca é o percentual de vidro obtido por este mesmo referencial, chegando a 16% da composição do resíduo do shredder.

#### 4.2 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS AMOSTRAS

Na Figura 25 é apresentada a distribuição granulométrica acumulada das amostras EC1, EC2 e Funil. Os valores totais estão disponíveis no Apêndice 1.

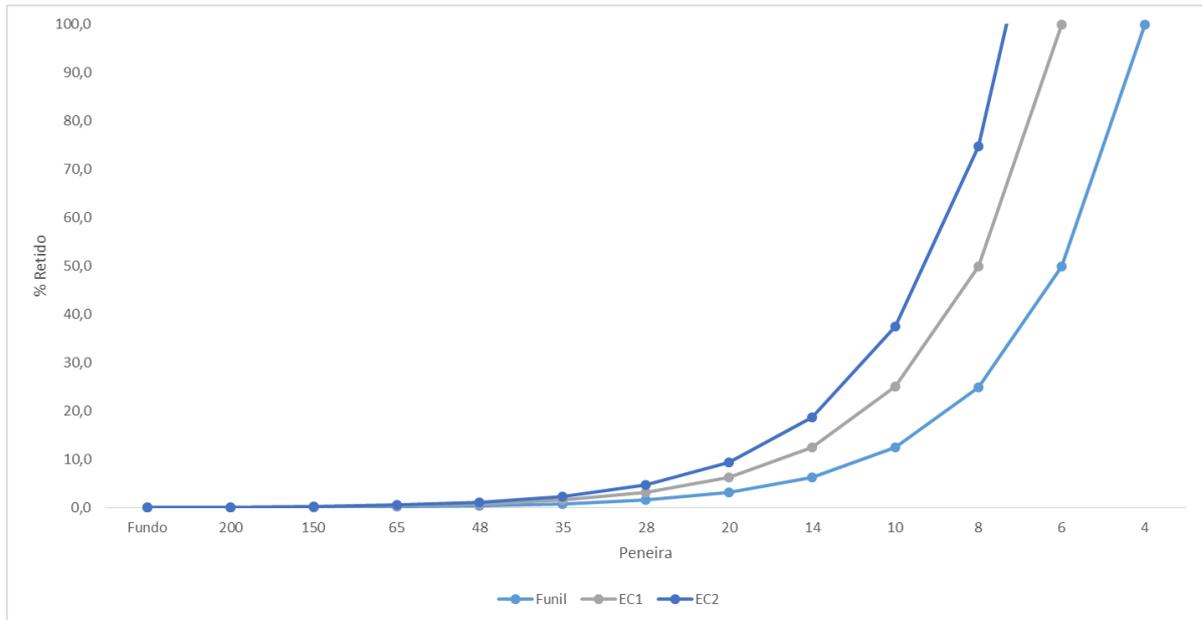


Figura 25: Distribuição granulométrica acumulada das amostras (mistura).

Considerando que a peneira rotativa possui malha entre 20 e 30 mm na região EC1, a expectativa era que as partículas coletadas nesta etapa estivessem inseridas nesta faixa granulométrica, uma vez que a etapa anterior (Funil) possui uma malha com diâmetro menor do que 20 mm. Todavia, 42,80% de finos (partículas de diâmetro inferior a 4,75mm) foram encontrados na amostra EC1 mistura. Além disto, na região EC2 (malha compreendida entre 30 e 100mm), ainda se verificou a presença de finos (25,82 %).

### 4.3 ANÁLISE TÉRMICA

A Figura 26 apresenta os termogramas obtidos para as quatro amostras de shredder testadas fazendo-se uso de uma taxa de aquecimento de  $25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ . Os referidos termogramas fornecem a curva de perda de massa em função da temperatura.

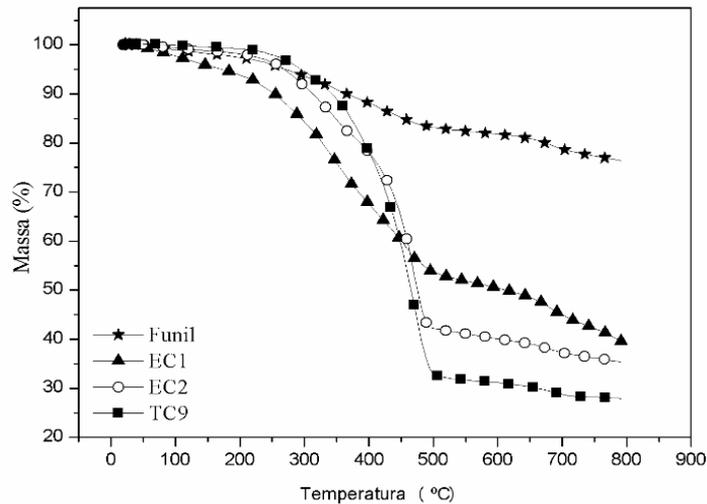


Figura 26: Termogramas obtidos para as quatro frações do shredder.

É possível observar que todas as curvas apresentam valores de perda de massa em temperaturas abaixo de 110 °C, onde acontece a perda de água acumulada. A partir de uma ampliação desta região, é possível verificar que a amostra EC1 possui uma perda de massa mais significativa, o que corrobora com o seu mais elevado teor de umidade (2,70 %). Os teores de umidade para as amostras Funil, EC2 e TC9 foram de 2,15, 1,67 e 0,63%, respectivamente. Estes valores também são confirmados pela análise térmica e podem ser visualizados através da Figura 27.

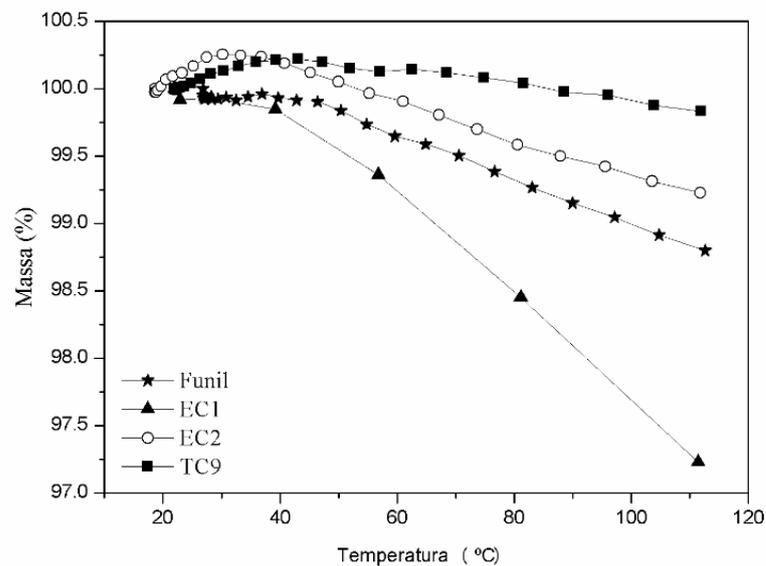


Figura 27: Ampliação da região de temperaturas abaixo de 110 °C.

Observa-se ainda, através da Figura 26, que as amostras possuem diferentes teores de massa residual (massa de amostra remanescente a 800 °C). A massa residual mais elevada foi observada na amostra Funil (76,24%), seguido da amostra

EC1 (39,23%), EC2 (35,25%) e TC9 (27,97%). A elevada massa residual da amostra Funil está associada ao seu alto teor de cinzas observado na análise imediata (aproximadamente 73%).

Altos teores de massa residual (aproximadamente 47% em massa) também foram relatados por Braslaw *et al.* (1991). Os referidos autores realizaram um estudo cinético de shredder automotivo através de análises termogravimétricas. Os experimentos foram conduzidos com aproximadamente 20 mg de amostra, taxas de aquecimento que variaram entre 5 e 20 °C.min<sup>-1</sup>, da temperatura de 25 °C até temperaturas finais entre 500 e 800 °C e atmosfera de argônio. A região de principal perda de massa observada pelos autores ocorreu entre 200 e 500 °C, similarmente às amostras deste estudo.

A Figura 28 apresenta as curvas da derivada primeira (DTG) para todas as amostras.

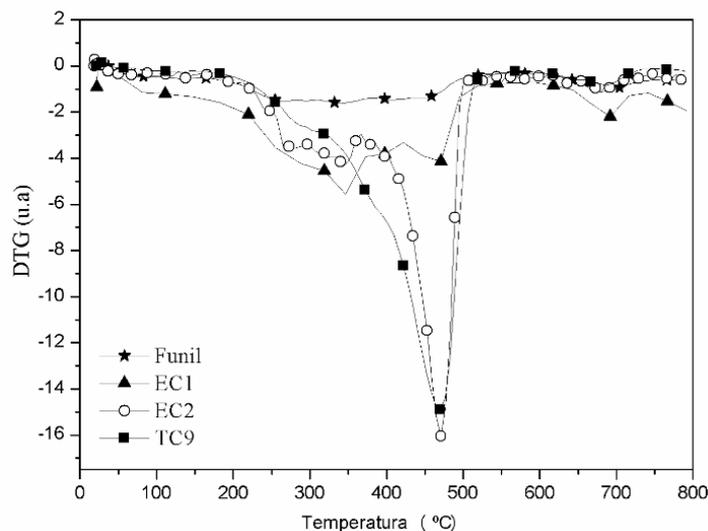


Figura 28: Derivada primeira para as quatro amostras de shredder.

Ni e Chen (2015) também utilizaram um analisador termogravimétrico para obter informações acerca da degradação térmica de resíduos de shredder automotivo. Os autores conduziram os experimentos utilizando taxas de aquecimento de 5, 10 e 15 °C.min<sup>-1</sup>. Dois picos de taxa máxima de reação foram observados pelos pesquisadores, atribuídos ao fato da composição das amostras ser muito complexa. De acordo com outros estudos (Wu e Tai, 2006), o pico da taxa de reação de têxteis, incluindo espumas, é aproximadamente em 330 °C. Além disto, polímeros incluindo

plásticos e borrachas, apresentam dois picos de taxa máxima de reação: um a aproximadamente 510 °C e outro a aproximadamente 661 °C.

Algumas temperaturas onde a taxa de reação é máxima podem ser identificadas através da Figura 28 e são apresentadas na Tabela 6:

Tabela 6: Temperaturas e máxima taxa de reação

<b>Amostra</b>	<b>T<sub>máx</sub> (°C) 1º pico</b>	<b>T<sub>máx</sub> (°C) 2º pico</b>	<b>T<sub>máx</sub> (°C) 3º pico</b>
<b>EC1</b>	346	470	691
<b>EC2</b>	352	471	685
<b>TC9</b>	295	470	691

#### **4.4 ANÁLISE IMEDIATA**

As Figuras 29 (a), (b), (c) e (d) apresentam os teores de umidade, matéria volátil, cinzas e carbono fixo das amostras.

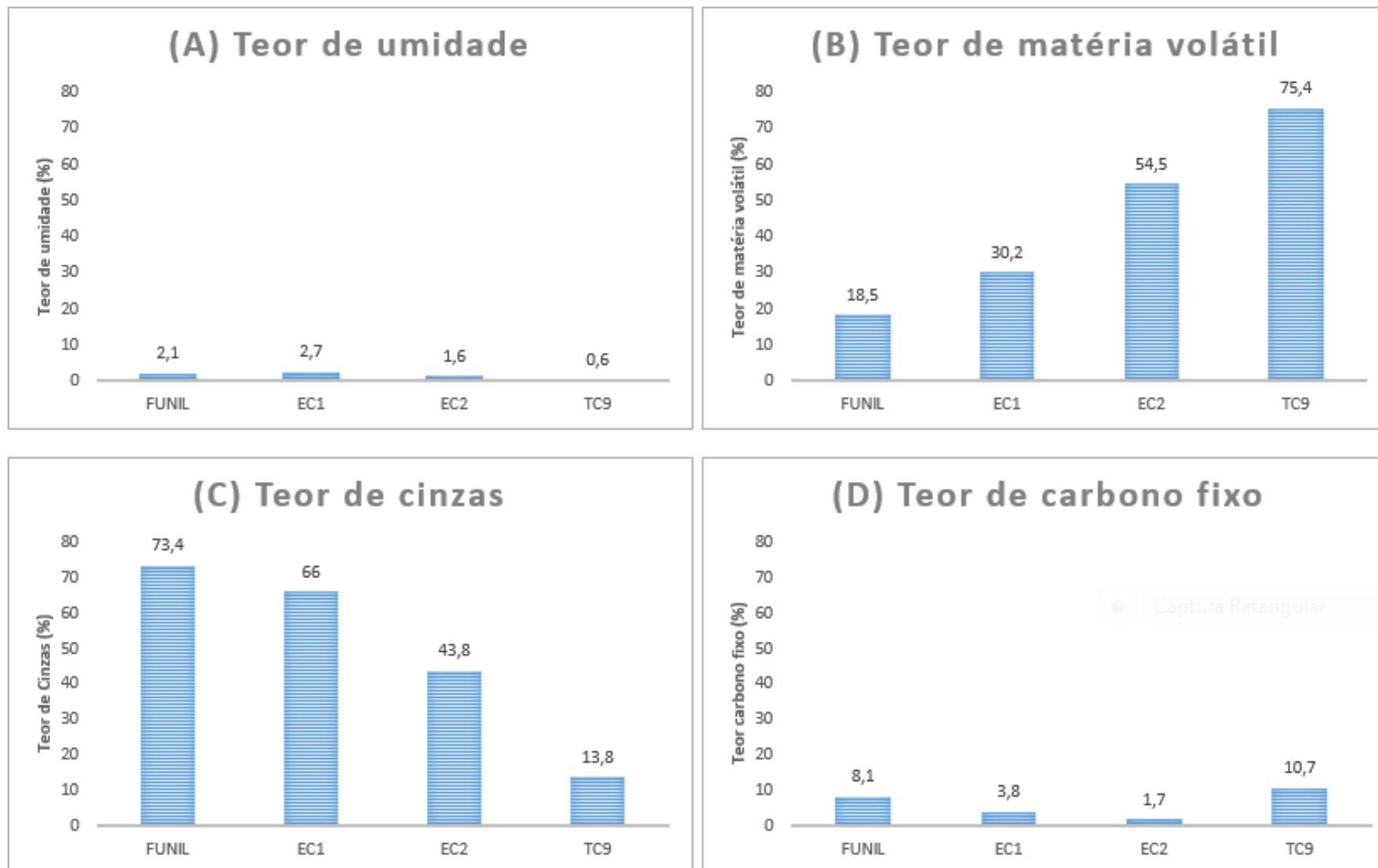


Figura 29: Análise imediata das amostras de shredder.

Através da Figura 29 (a) observa-se que a amostra TC9 apresenta o menor teor de umidade (0,63%), enquanto a amostra EC1 possui o maior teor de umidade (2,70%). A partir da Figura 29 (b) verifica-se que a amostra TC9 apresentou maior teor de matéria volátil (75,44%), enquanto a amostra funil possui o menor teor de matéria volátil (18,48%).

É possível relacionar o teor de matéria volátil com a análise térmica, pois quanto maior o teor de matéria volátil, menor é o teor de massa residual. A amostra TC9 apresentou aproximadamente 30% de massa residual (relacionada ao teor de inorgânicos) e aproximadamente 75% de voláteis. Já a amostra Funil, apresentou um teor de massa residual de 76% e matéria volátil de 18%.

O elevado teor de matéria volátil (maior teor de orgânicos) é atrativo para os processos de conversão termoquímica.

A Tabela 7 apresenta o teor de matéria volátil encontrado por outros autores para resíduos de shredder automotivo.

Tabela 7: Teor de matéria volátil para o shredder automotivo reportado por outros pesquisadores.

Pesquisadores		Matéria Volátil (%)
Mirabile <i>et al.</i> (2002)		54,18
Guinard (2012)		54,20
Saxena <i>et al.</i> (1995)		39,79
	Funil	18,50
	EC1	30,20
Câmara (2017)	EC2	54,50
	TC9	75,40

Os teores encontrados estão próximos a amostra EC2 (54%), corroborando com os resultados encontrados, uma vez que o teor de polímeros encontrados nesta amostra foi de aproximadamente 30%.

A partir da Figura 29 (c) é possível verificar que as amostras Funil e EC1 apresentam os maiores teores de cinzas, 73% e 66%, respectivamente. A amostra TC9 apresenta o menor teor de cinzas (13,8%). A partir da Figura 29 (d) é possível observar que a amostra TC9 apresenta o maior teor de carbono fixo (10,7%).

O teor de cinzas está relacionado com o teor de matéria inorgânica. Os valores encontrados corroboram com a caracterização das amostras já apresentada (a amostra Funil apresentou um percentual de 15% de solo e a amostra EC1 apresentou 29% da referida categoria). Além disto, grande parte dos inorgânicos é proveniente da categoria nomeada como “não-identificados”. Quanto maior o teor de cinzas e maior o teor de umidade, menor é a viabilidade da utilização da amostra para um processo de recuperação energética. E maior a importância de tomar medidas de gestão para reduzi-los.

A amostra TC9 apresentou o maior teor de carbono fixo, o que também está de acordo com a sua composição (26% de plásticos e 30% de borrachas).

#### 4.5 ANÁLISE ELEMENTAR

Os resultados da análise elementar (CHNS) das amostras são apresentados na Tabela 8. Nesta Tabela também foram inseridos os resultados referentes aos halogênios (Cl/F).

Tabela 8: Análise elementar e compostos halogenados nas amostras.

	<b>Funil</b> <b>(%m/m)</b>	<b>EC1</b> <b>(%m/m)</b>	<b>EC2</b> <b>(%m/m)</b>	<b>TC9</b> <b>(%m/m)</b>
Carbono	10,74	14,84	44,08	66,87
Hidrogênio	1,34	2,06	6,45	7,76
Nitrogênio	0,29	0,47	0,90	0,28
Enxofre	0,32	0,35	0,41	1,19
Cloro	0,17	0,23	1,06	0,51
Flúor	0,05	0,06	0,04	0,02

Através dos resultados apresentados na Tabela 8, observa-se que as maiores concentrações de carbono e hidrogênio foram encontradas para a amostra TC9. Possivelmente estes resultados estejam associados à elevada quantidade de plásticos e borrachas que compõem esta amostra (26 e 30%, respectivamente). A amostra EC2 também apresentou uma concentração considerável de carbono e hidrogênio. A referida amostra também possui quantidades significativas de plásticos (30%) e borrachas (8%) em sua composição.

A amostra TC9 apresentou a maior concentração de enxofre (1,19%) em sua composição. A presença de quantidades significativas de borracha (30%) na composição desta amostra deve estar relacionada a este resultado. Alguns

pesquisadores realizaram a análise de enxofre de pneus inservíveis e os teores encontrados por eles variaram de 1,5 a 2,01% (WILLIAMS & CUNLIFFE, 1998, LEUNG *et al.* 2002, LAREGOITI *et al.* 2004, BERRUECO *et al.* 2005, DÍEZ *et al.* 2005, ISLAM *et al.* 2011, FERNÁNDEZ *et al.* 2012). O teor de enxofre está relacionado com a presença de borrachas, uma vez que enxofre é utilizado na formulação do elastômero.

A concentração de cloro foi mais elevada que a concentração de flúor em todas as amostras. A origem do cloro está comumente relacionada com a presença do polímero PVC. Na amostra EC2 é possível ocorrer a presença deste polímero, justificando a mais elevada concentração de cloro (1,06%).

A presença de cloro é muito relevante para processos de tratamento térmico, em especial pela possível formação de dibenzo-para-dioxinas policloradas (PCDD) e dibenzofuranos policlorados (PCDF). O principal mecanismo de formação das PCDD/F é conhecido como "*de novo synthesis*", e envolve a estrutura do carbono residual contido na superfície das cinzas volantes. A formação das PCDD/F está associada à presença de ácido clorídrico (HCl) ou gás cloro (Cl<sub>2</sub>) na fase gás. A formação destes compostos ocorre preferencialmente entre 300 e 400 °C (GODINHO, 2006). A presença de enxofre no combustível minimiza significativamente a formação de PCDD/F. Para combustíveis com baixa razão Cl/S (<0,1) a formação de PCDD/F é inibida (PERONDI, 2017). Desta forma, a elevada concentração de enxofre na amostra TC9 deve inibir a formação de PCDD/F em processos de tratamento térmico, enquanto a elevada concentração de cloro, bem como a baixa concentração de enxofre, na amostra EC2, são indicativos da formação de PCDD/F em processos de tratamento térmico desta amostra.

Diferentes pesquisadores reportaram a análise elementar de SR. Na Tabela 9 são apresentados os resultados obtidos por outros autores, assim como os resultados deste trabalho.

Tabela 9: Resultados de análise elementar para o SR reportados na literatura

	Mirabile <i>et al.</i> (2002) <sup>a</sup>	Roy & Chaala (2001)	Lopes <i>et al.</i> (2009) <sup>b</sup>	Câmara (2017)			
				Funil	EC1	EC2	TC9
C (%)	49,50	32,80	31,10	10,74	14,84	44,08	66,87
H (%)	5,30	4,08	4,10	1,34	2,06	6,45	7,76
N (%)	4,50	0,59	1,00	0,29	0,47	0,90	0,28
S (%)	0,20	0,23	0,43	0,32	0,35	0,41	1,19
Cl (%)	0,50	1,64	0,73	0,17	0,23	1,06	0,51
F (%)	0,05	-	<0,02	0,05	0,06	0,04	0,02

Nota: <sup>a</sup> Partículas menores que 2 mm; <sup>b</sup> Partículas acima de 0,5 mm

A alimentação dos trituradores de sucata instalados em outros países é distinta do equipamento em análise neste estudo. Os equipamentos são alimentados basicamente com automóveis no fim do seu ciclo de vida. Apesar disto, os resultados obtidos para as amostras (Funil/EC1/EC2/TC9) são semelhantes aos reportados na literatura. Mirabile *et al.* (2002) obteve concentrações de C e H similares à fração EC2 deste estudo (Tabela 9). É importante salientar que a amostra estudada pelos pesquisadores possuía tamanho de partícula menor do que 2 mm, ao passo que a fração EC2 deste estudo, está compreendida entre 30 e 100 mm.

As concentrações de enxofre das amostras Funil, EC1 e EC2 são semelhantes aos valores reportados por Mirabile *et al.* (2002), Roy & Chaala (2001) e também por Lopes *et al.* (2009).

Os teores de cloro e flúor das quatro amostras estudadas (Funil, EC1, EC2 e TC9) são similares aos reportados por Mirabile *et al.* (2002) e Lopes *et al.* (2009).

#### 4.6 ANÁLISE DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR

A Tabela 10 apresenta os valores médios obtidos nos ensaios de poder calorífico, bem como o desvio padrão para cada uma das amostras.

Tabela 10: Poder calorífico das amostras.

	Poder Calorífico Superior (MJ/kg)	Desvio Padrão (MJ/kg)
Funil	14,96	0,73
EC1	7,33	0,18
EC2	22,57	2,09
TC9	30,93	2,33

O poder calorífico de um determinado material está relacionado com a quantidade de carbono e hidrogênio presentes neste material (PERONDI, 2017). A

presença de inorgânicos na amostra reduz o seu poder calorífico. A Tabela 11 relaciona os resultados já apresentados na composição das amostras, com os resultados apresentados de teor de cinzas e o poder calorífico para cada amostra estudada.

Tabela 11: Relação dos resultados por fração estudada.

Amostra	Poder Calorífico (MJ/kg)	Cinzas (%)	Composição amostras (%)
Funil	14,9	73,4	15% solo, 78% não identificados + pedras
EC1	7,3	66,0	29% solo, 55% não identificados + pedras
EC2	22,6	43,8	30% plástico, 8% borracha
TC9	30,9	13,8	30% borracha, 26% plástico

Os baixos valores de poder calorífico das amostras Funil e EC1 estão relacionados à elevada presença de cinzas (inorgânicos) presentes nestas amostras, enquanto o poder calorífico mais elevado das amostras EC2 e TC9 está associado a maior presença de plásticos e borrachas nesta amostra, e conseqüentemente à maior concentração de carbono e hidrogênio (Tabela 9) destas amostras.

A amostra TC9 apresentou o maior poder calorífico (30,93 MJ/kg), de forma que o tratamento térmico desta amostra é uma técnica atrativa para a sua destinação final.

Para fins de comparação, a Tabela 12 apresenta os valores de poder calorífico reportados na literatura.

Tabela 12: Poder calorífico para o SR

Poder calorífico (MJ/kg)	Referência
39,9 - 41,1	MARCO <i>et al.</i> 2002
28,3	RAUSA e POLLESEL 1997
26,0	BORJESON <i>et al.</i> 2000
16,7	MIRABILE <i>et al.</i> 2002
4,4 - 18,2	ZOLEZZI <i>et al.</i> 2004
14,9 (Funil)	
7,3 (EC1)	CÂMARA, 2017
22,6 (EC2)	
30,9 (TC9)	

É possível verificar que embora haja um consenso geral dos valores entre 20 e 30 MJ/kg, ainda existem variações significativas. Harder e Forton (2007) atribuíram estas diferenças em função dos diferentes tipos de carros (carros modernos possuem

mais plásticos) e das misturas de sucatas na alimentação do próprio triturador. As amostras EC2 e TC9 deste estudo se assemelham as amostras estudadas pelos demais pesquisadores, devido ao fato de possuírem altos teores de plásticos, que também são encontrados nos trituradores alimentados por automóveis.

## **4.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)**

### **4.7.1 Funil**

Nas Figura 30 e 31 (imagens de microscopia eletrônica, associadas ao espectro químico), é possível verificar a presença de alguns metais, além dos elementos O e C, tais como: Fe, Zn, Si (possivelmente relacionado a presença de solo na amostra sob a forma de SiO<sub>2</sub>), Al, Ti, Ca e Mg.

É importante destacar que os picos relativos ao elemento químico ouro (Au) em todos os espectros apresentados neste trabalho, referem-se à deposição que foi realizada no preparo da amostra para que fosse possível a obtenção das imagens.

Embora a análise de microscopia não seja quantitativa, destaca-se a intensidade do pico relacionado ao elemento químico Fe, presente na amostra Funil, tanto no Ponto de verificação 1, quanto no Ponto de verificação 2.

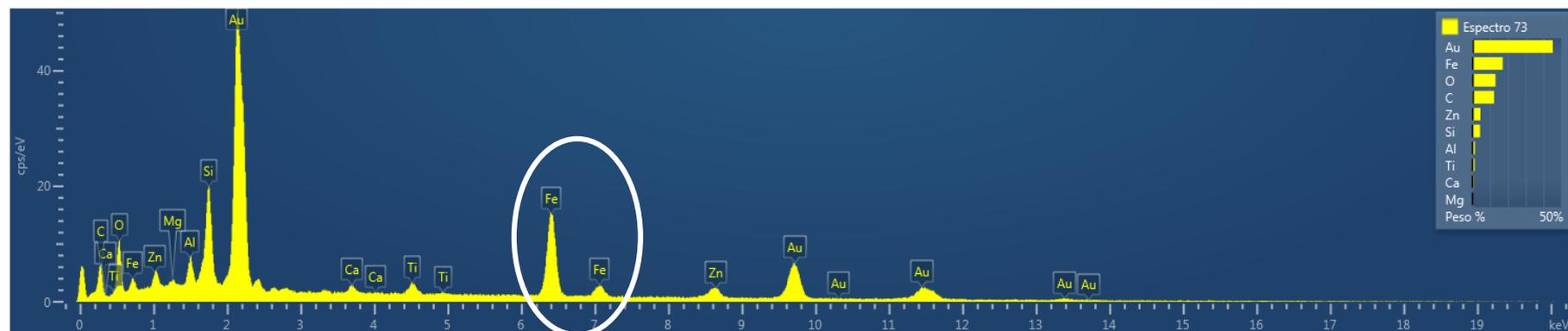


Figura 30: Imagem de microscopia associada ao espectro químico para a amostra Funil (Ponto de verificação 1). Destaque para a intensidade do elemento Fe.

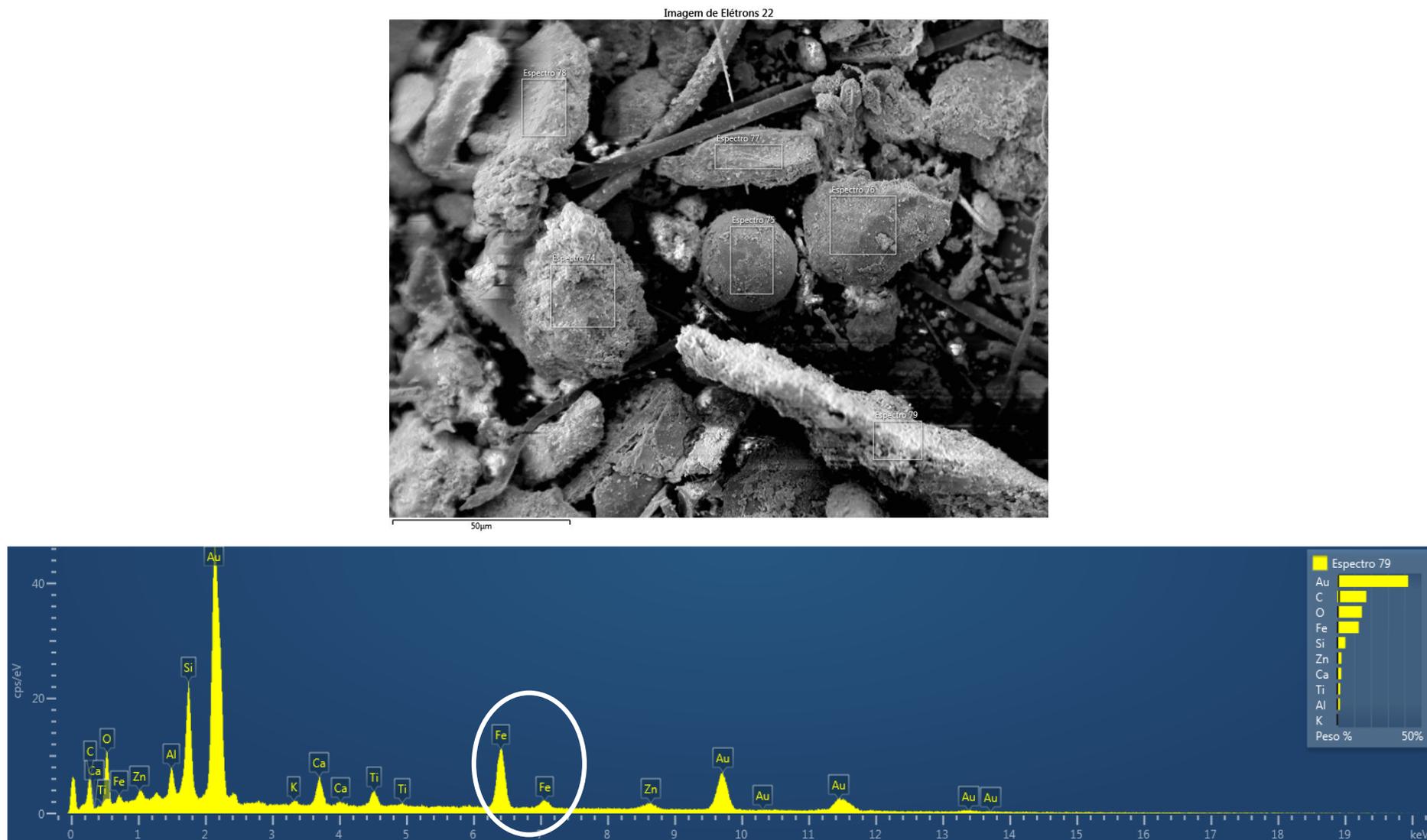


Figura 31: Imagem de microscopia associada ao espectro químico para a amostra Funil (Ponto de verificação 2). Destaque para a intensidade do elemento

Fe.

Além dos Pontos de verificação 1 e 2, outros pontos foram utilizados durante as análises da fração Funil. A partir destes pontos, inúmeros espectros foram gerados. Na Figura 32 é apresentada uma imagem de microscopia eletrônica, associada ao espectro químico, onde além dos elementos encontrados nos Pontos 1 e 2, aparecem os elementos químicos Co e Ni.

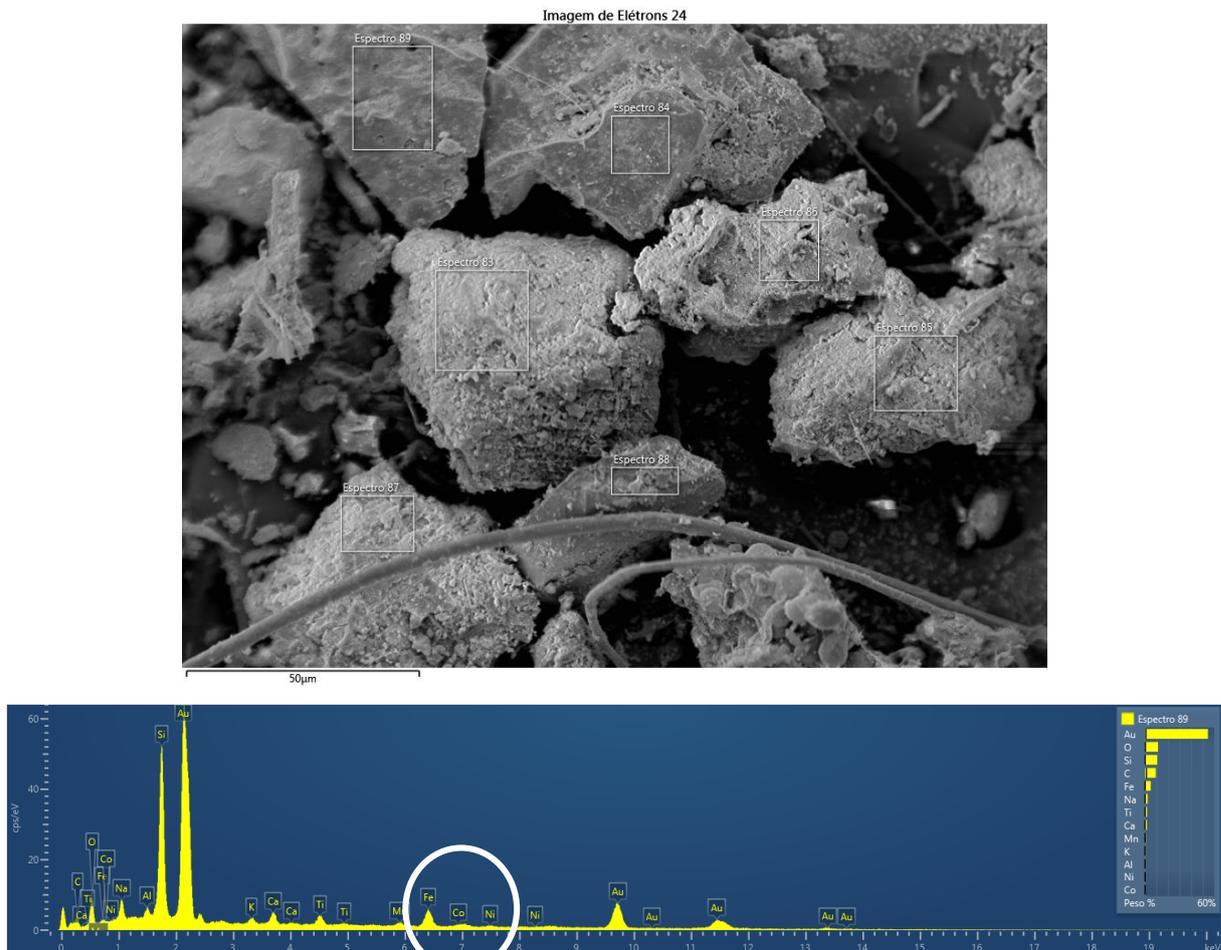


Figura 32: Imagem de microscopia associada ao espectro químico para a amostra Funil (Ponto de verificação 3). Destaque para a presença dos elementos Co e Ni.

#### 4.7.2 EC1

Na Figura 33 (imagem de microscopia eletrônica, associada ao espectro químico) da amostra EC1, é possível verificar a presença dos seguintes metais, além dos elementos O e C: Fe, Ca, Si (possivelmente relacionado a presença de solo na amostra sob a forma de  $\text{SiO}_2$ , da mesma forma que a fração Funil), Al, Zn, Ti e K.

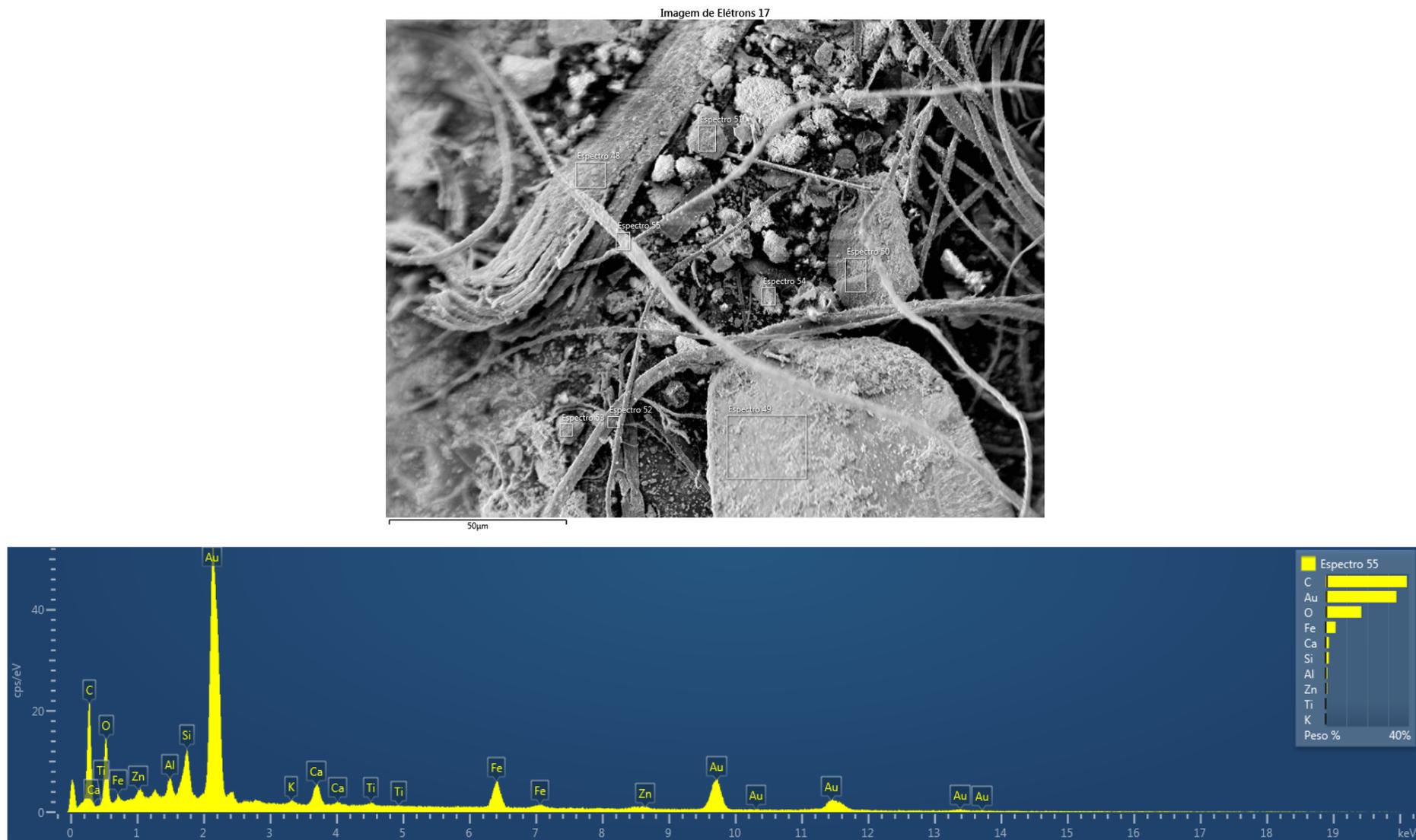


Figura 33: Imagem de microscopia associada ao espectro químico para a amostra EC1 (Ponto de verificação 4).

### 4.7.3 EC2

Similarmente as demais amostras estudadas, através da Figura 34 (imagem de microscopia eletrônica, associada ao espectro químico) é possível verificar que a amostra EC2, também apresenta os metais Fe, Ti, Si (possivelmente relacionado a presença de solo na amostra sob a forma de  $\text{SiO}_2$ , da mesma forma que as amostras Funil e EC1), Ca e Al, além dos elementos O e C.

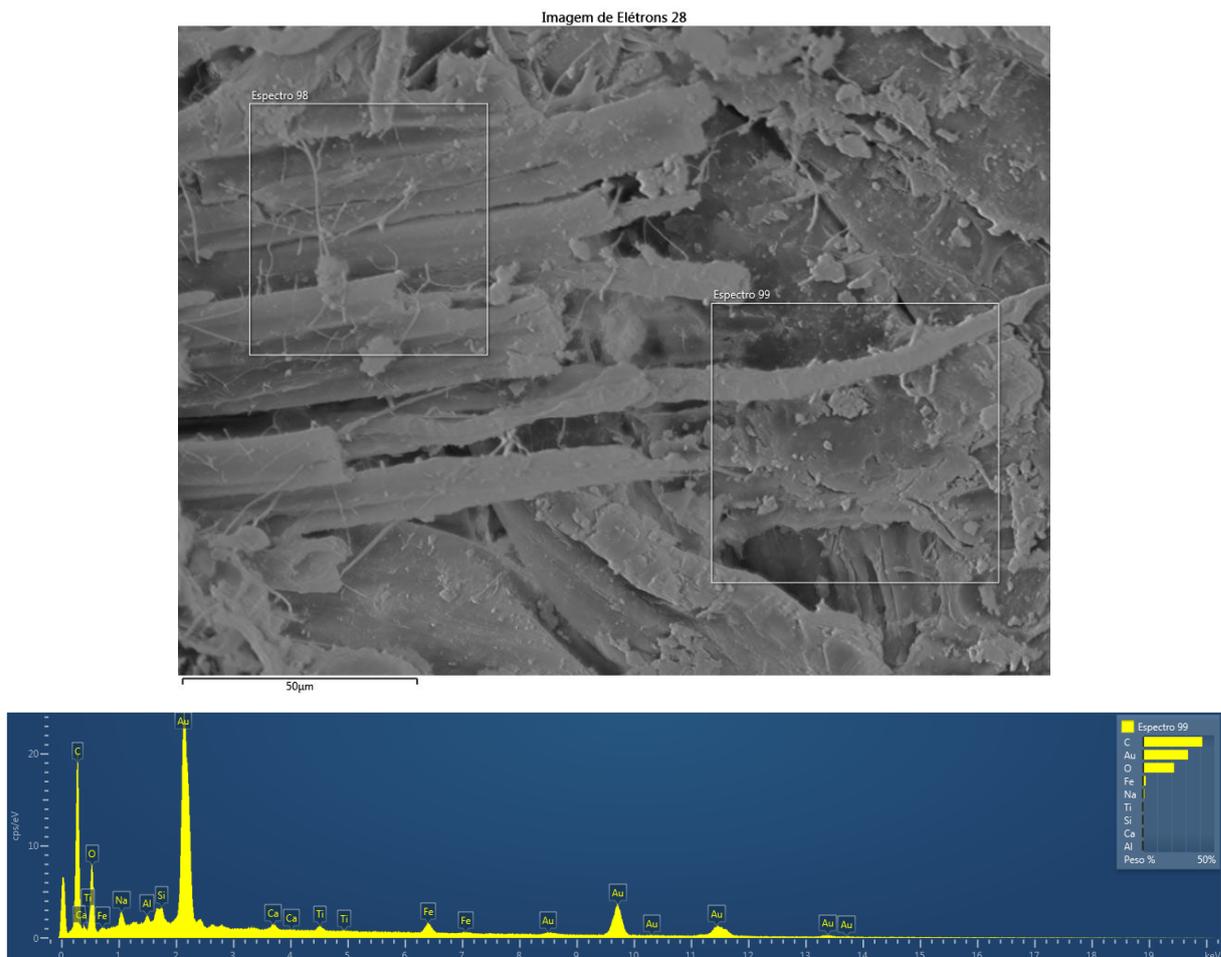


Figura 34: Imagem de microscopia associada ao espectro químico para a amostra EC2 (Ponto de verificação 5).

O elemento químico Cl também foi verificado em um dos pontos de verificação para a amostra EC2, conforme pode ser observado pela Figura 35 (imagem de microscopia eletrônica, associada ao espectro químico). É importante destacar que quando a análise de Cl foi realizada pela técnica de Cromatografia de íons, a concentração mais elevada foi verificada nesta fração (1,06%).

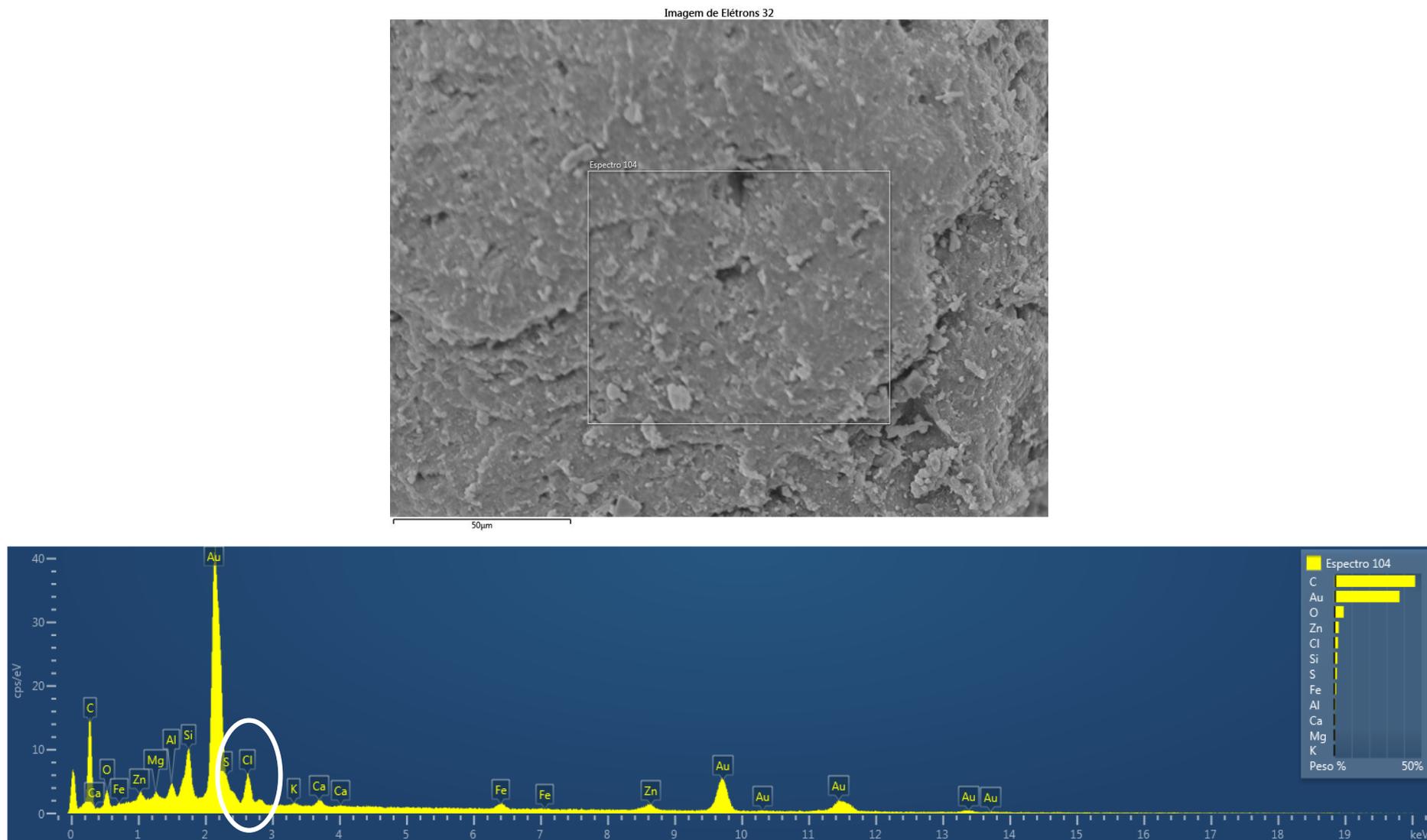


Figura 35: Imagem de microscopia associada ao espectro químico para a amostra EC2 (Ponto de verificação 6). Destaque para a presença do elemento químico Cl.

#### 4.7.4 TC9

Diferentes pontos de verificação foram avaliados através das imagens de microscopia da fração TC9. Como esperado, nesta fração um maior teor de orgânicos pode ser constatado, o que corrobora com a composição da referida fração (30% borracha e 26% plástico). Através da Figura 36 (imagem de microscopia eletrônica, associada ao espectro químico), não se observa a presença do elemento químico Fe (elemento que foi identificado com maior intensidade nas amostras Funil e EC1 e com menor intensidade na amostra EC2).

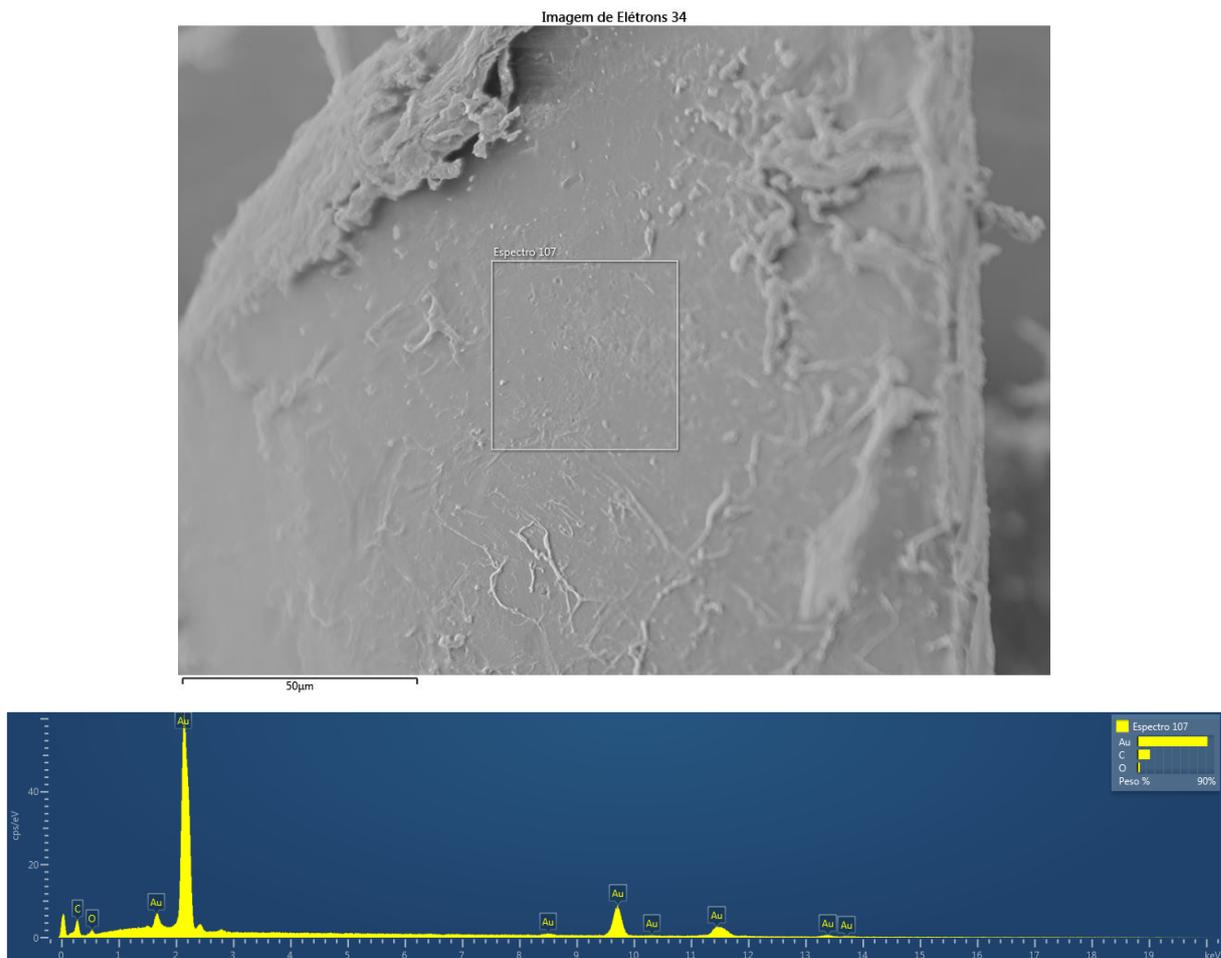


Figura 36: Imagem de microscopia associada ao espectro químico para a amostra TC9 (Ponto de verificação 7). Ausência do elemento químico Fe.

A ausência do elemento químico Fe também pode ser observada na Figura 37 (imagem de microscopia eletrônica, associada ao espectro químico).

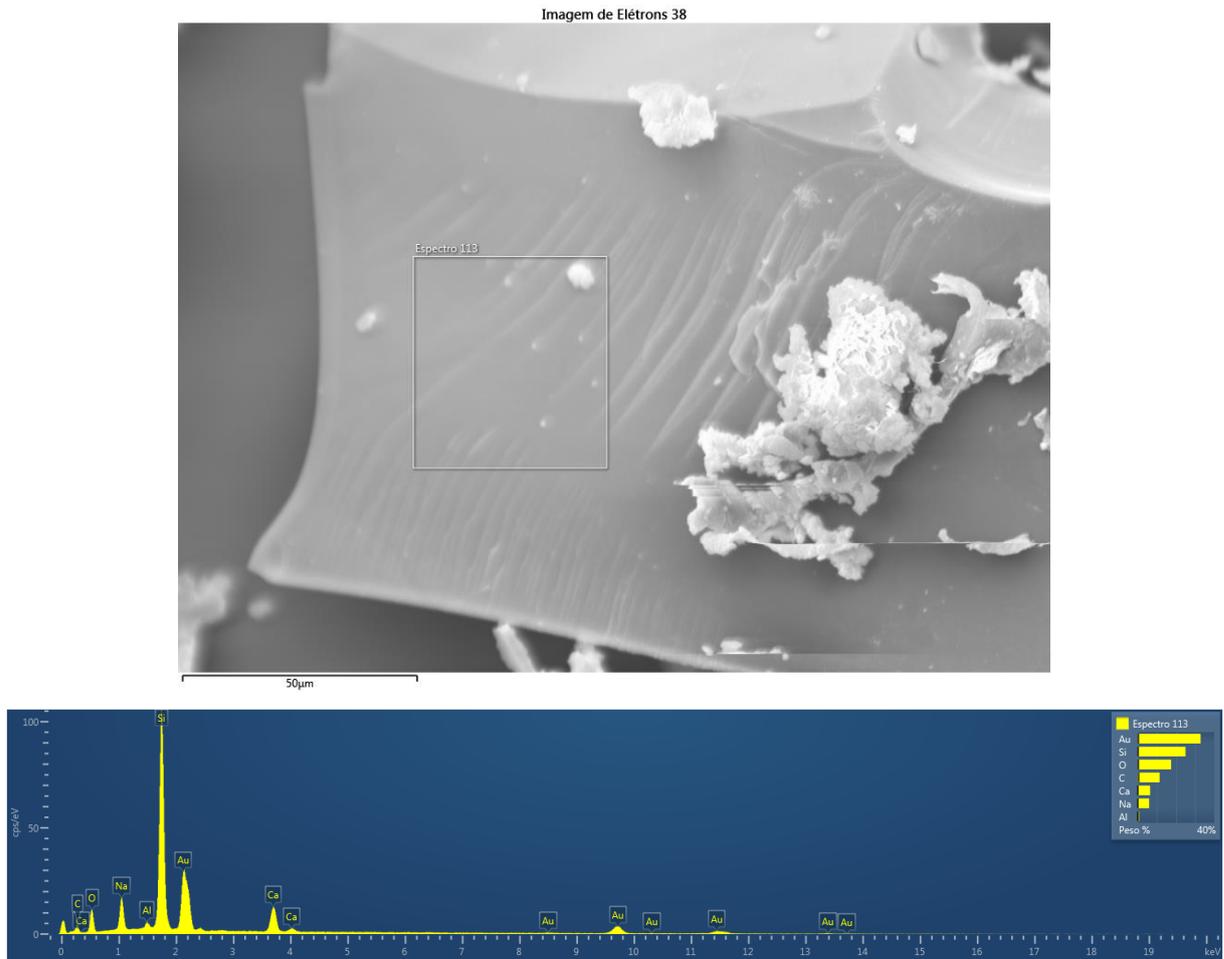


Figura 37: Imagem de microscopia associada ao espectro químico para a amostra TC9 (Ponto de verificação 8). Ausência do elemento químico Fe.

A ausência dos metais Cr, Cu e Pb nos espectros gerados a partir das imagens de microscopia eletrônica não significa que estes metais não estão presentes nas amostras estudadas. Inúmeros pontos de verificação foram utilizados, porém em função da heterogeneidade das amostras, é possível que outros tantos não foram contemplados.

Todos os espectros obtidos serviram como base para a realização das análises de metais que foram posteriormente desenvolvidas. A partir delas, foi possível a quantificação dos metais.

#### 4.8 CONCENTRAÇÃO DE METAIS NAS DIFERENTES AMOSTRAS

As Figuras 38 a 43 apresentam as concentrações dos metais nas diferentes amostras estudadas.



Figura 38: Concentração (% m/m) de Alumínio e Cobre nas amostras estudadas.

A partir da Figura 38 é possível verificar que as concentrações de Alumínio foram semelhantes nas quatro amostras (Funil/EC1/EC2/TC9), variando entre 1,1 e 1,7%. A amostra EC2 apresentou o maior desvio padrão. As concentrações de Cobre foram de 0,39% (FUNIL), 1,93% (EC1), 1,86% (EC2) e 0,04% (TC9).

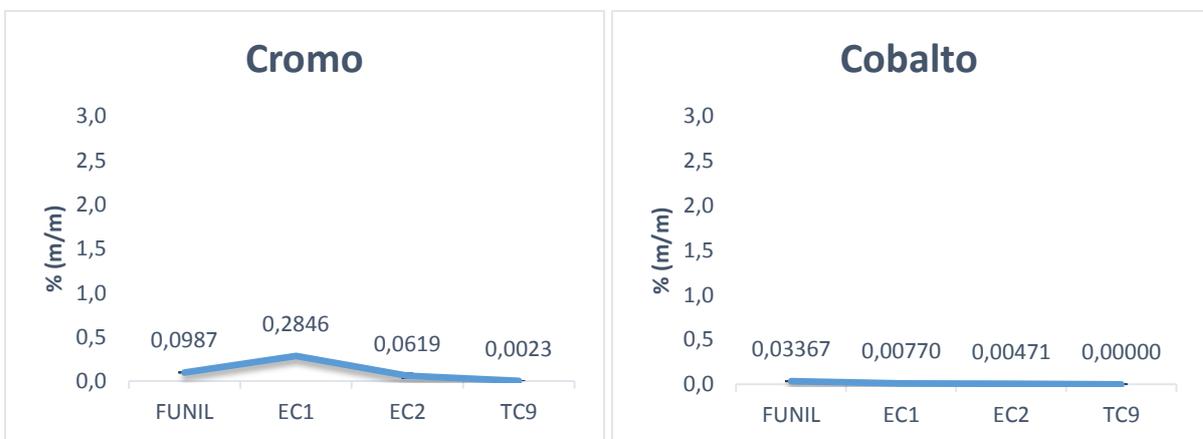


Figura 39: Concentração (% m/m) de Cromo e Cobalto nas amostras estudadas.

Verifica-se através da Figura 39, que a concentração de Cromo nas amostras variou entre 0,0023% (TC9) e 0,28% (EC1). A concentração de Cobalto variou entre 0,0047% (EC2) e 0,0337% (FUNIL). Não foi detectada a presença de Cobalto na amostra TC9.



Figura 40: Concentração (% m/m) de Manganês e Níquel nas amostras estudadas.

Através da Figura 40 observa-se que as concentrações de Manganês variaram entre 0,0043% (TC9) e 0,2340% (EC1), e entre 0,0060% (TC9) e 0,1766% (EC1) para o elemento Níquel. O perfil de distribuição de ambos os metais nas diferentes amostras foi semelhante, ou seja, uma maior concentração na fração EC1 e uma menor concentração na fração TC9.

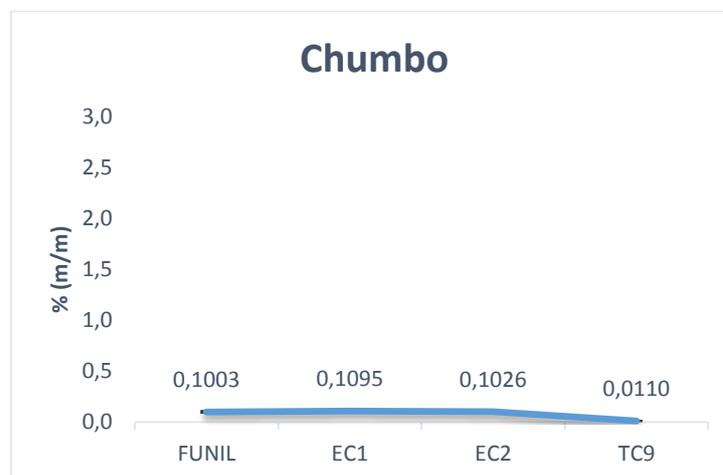


Figura 41: Concentração (% m/m) de Chumbo nas amostras estudadas.

Através da Figura 41, é possível verificar que as concentrações de Chumbo variaram entre 0,0110% (TC9) e 0,1095% (EC1).

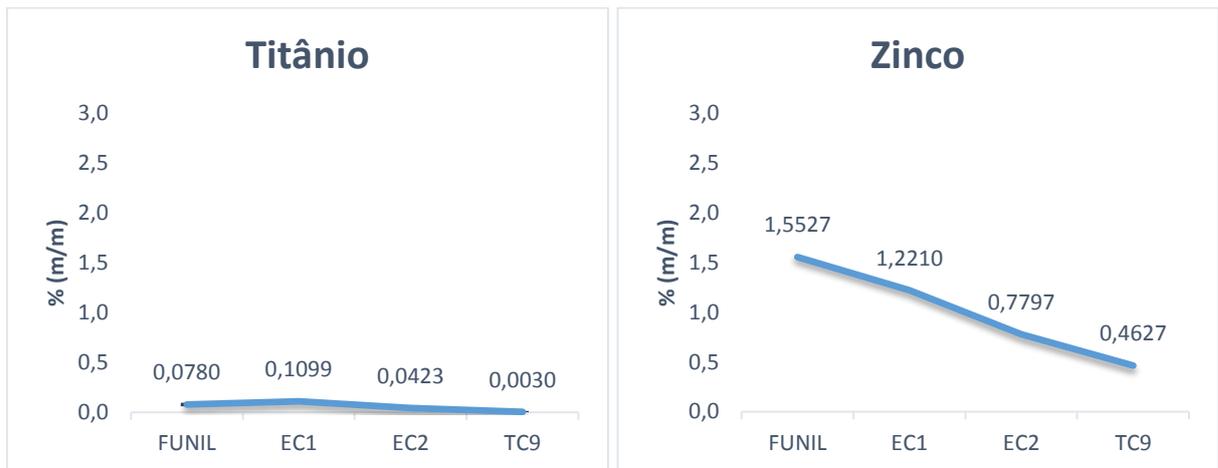


Figura 42: Concentração (% m/m) de Titânio e Zinco nas amostras estudadas.

Através da Figura 42, verifica-se que as concentrações de Titânio variaram entre 0,0030% (TC9) e 0,11% (EC1), enquanto a concentração de Zinco variou entre 0,46% (TC9) e 1,55% (FUNIL). A Figura 43 apresenta a concentração de Ferro nas diferentes amostras de interesse.

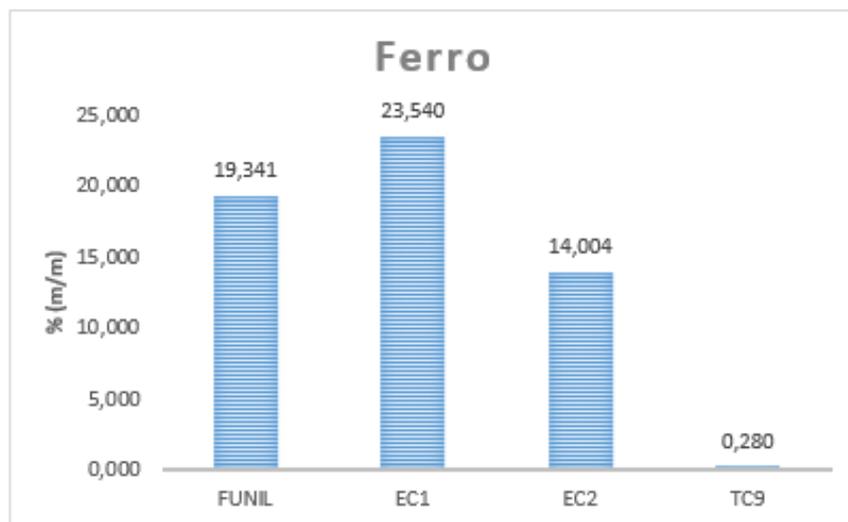


Figura 43: Concentração (% m/m) de Ferro nas amostras estudadas.

Como pode ser observado na Figura 43, as maiores concentrações de Ferro estão presentes nas amostras EC1 (23%) e Funil (19%). Picos de intensidade considerável deste elemento químico já haviam sido reportados nas imagens de microscopia eletrônica de varredura associadas ao espectro químico.

Para fins de comparação, a Tabela 13 apresenta os teores das concentrações de diferentes metais reportados na literatura.

Tabela 13: Concentrações (% m/m) de metais reportadas na literatura (Adaptada de RECKZIEGEL,2012)

	KELLER,2003*	MIRABILE,2002 <2 mm	MARK e FISHER,1999*	CÂMARA, 2017			
				Funil	EC1	EC2	TC9
Alumínio	2,00	-	-	1,12	1,30	1,67	1,49
Cobre	1,10	1,20	1,8	0,39	1,93	1,86	0,04
Ferro	14,0	25,70	13,65	19,34	23,54	14,00	0,28
Manganês	0,10	-	0,11	0,20	0,23	0,12	0,00
Chumbo	0,51	0,20	0,50	0,10	0,11	0,10	0,01
Silício	7,70	9,50	-	0,10	0,16	0,14	0,13
Titânio	-	0,90	-	0,08	0,11	0,04	0,00
Zinco	0,90	1,90	-	1,55	1,22	0,78	0,46

(\*) Não identificado.

As concentrações de metais nas diferentes amostras do presente estudo são semelhantes às reportadas na literatura, embora a alimentação dos trituradores de sucata em outros países seja distinta do equipamento em análise neste estudo.

RECKZIEGEL (2012) determinou a concentração de metais nos resíduos do triturador de sucata, com diâmetros de partícula <2 mm e >2 mm. A concentração de Ferro encontrada para a fração <2 mm (24,67% ± 4,29) é similar às amostras Funil e EC1 deste estudo.

#### 4.9 CONCENTRAÇÃO DE METAIS (Fe / Zn / Al /Pb) EM DIFERENTES FAIXAS GRANULOMÉTRICAS

Neste item serão apresentados os resultados das concentrações de metais (Fe/Zn/Al/Pb) nas diferentes faixas granulométricas.

As Tabelas 14, 15 e 16 apresentam a distribuição granulométrica das amostras Funil, EC1 e EC2, respectivamente.

Tabela 14: Distribuição granulométrica da amostra Funil

Peneira (mesh)	Abertura da peneira (mm)	Funil	
		Massa retida (g)	Retenção (%)
Fundo	<0,297	246,9	24,64
50	0,297	649,8	64,85
4	4,75	105,3	10,51

A partir da distribuição granulométrica apresentada na Tabela 14, é possível inferir que a retenção da amostra Funil nas faixas granulométricas ( $-0,297$  mm) e ( $-4,75$   $+0,297$  mm) é de 89,49%, ou seja, 24,64% das partículas possuem tamanho inferior a 0,297 mm e 64,85% das partículas estão compreendidas entre  $-4,75$  e  $+0,297$  mm, enquanto 10,51% das partículas possuem tamanho maior que 4,75 mm.

Tabela 15: Distribuição granulométrica da amostra EC1

Peneira (mesh)	Abertura da peneira (mm)	EC1	
		Massa retida (g)	Retenção (%)
<b>Fundo</b>	<0,297	321,3	31,92
<b>50</b>	0,297	451,7	44,88
<b>4</b>	4,75	233,5	23,20

Através da Tabela 15 (amostra EC1), pode-se observar que a retenção nas faixas granulométricas ( $-0,297$  mm) e ( $-4,75$   $+0,297$  mm) é de 76,8% (31,92% dos materiais possuem partículas de tamanho menor que 0,297 mm e 44,88% das partículas estão compreendidos na faixa ( $-4,75$   $+0,297$  mm)). No caso da referida amostra, 23,20% das partículas possuem tamanho maior que 4,75mm.

Tabela 16: Distribuição granulométrica da amostra EC2

Peneira (mesh)	Abertura da peneira (mm)	EC2	
		Massa retida (g)	Retenção (%)
<b>Fundo</b>	<0,297	91,6	8,97
<b>50</b>	0,297	106,1	10,39
<b>4</b>	4,75	823,4	80,64

Conforme os dados apresentados na Tabela 16, as faixas granulométricas ( $-0,297$  mm) e ( $-4,75$   $+0,297$  mm) representam 19,36% da amostra EC2 (8,97% das partículas possuem tamanho menor que 0,297 mm e 10,64% estão compreendidos na faixa ( $-4,75$   $+0,297$  mm)). Para a amostra EC2, 80,64% das partículas apresentam tamanho maior que 4,75 mm.

A Figura 44 apresenta as concentrações de Ferro, Zinco e Alumínio na amostra Funil nas diferentes faixas granulométricas avaliadas.

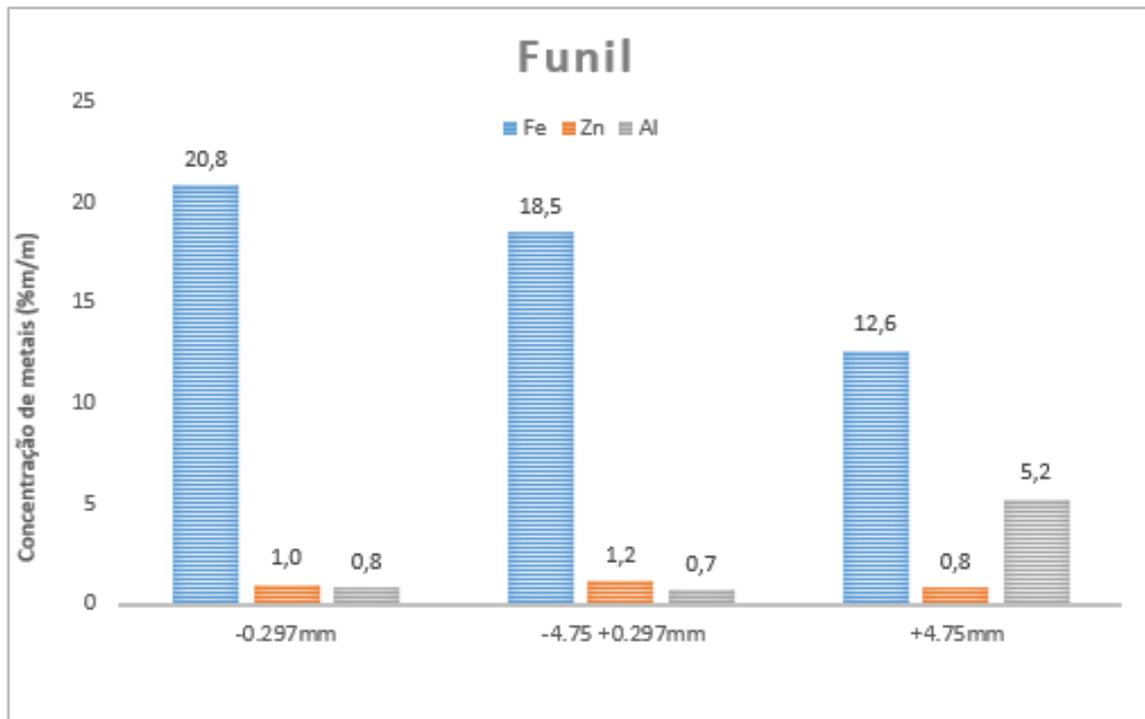


Figura 44: Concentração de metais (% m/m) na amostra Funil em diferentes faixas granulométricas.

A partir da Figura 44 é possível destacar que as faixas granulométricas (-0,297 mm) e (-4,75 +0,297 mm) apresentaram as maiores concentrações de Ferro (20,8% e 18,5%, respectivamente). Tendo em vista a maior presença de partículas nas referidas faixas granulométricas (Tabela 14), as mesmas apresentam potencial para a recuperação de Ferro, enquanto a faixa (+4,75 mm) possui potencial para recuperação do Alumínio (aproximadamente 5%).

A Figura 45 apresenta as concentrações de Ferro, Zinco e Alumínio na amostra EC1 nas três faixas granulométricas avaliadas.

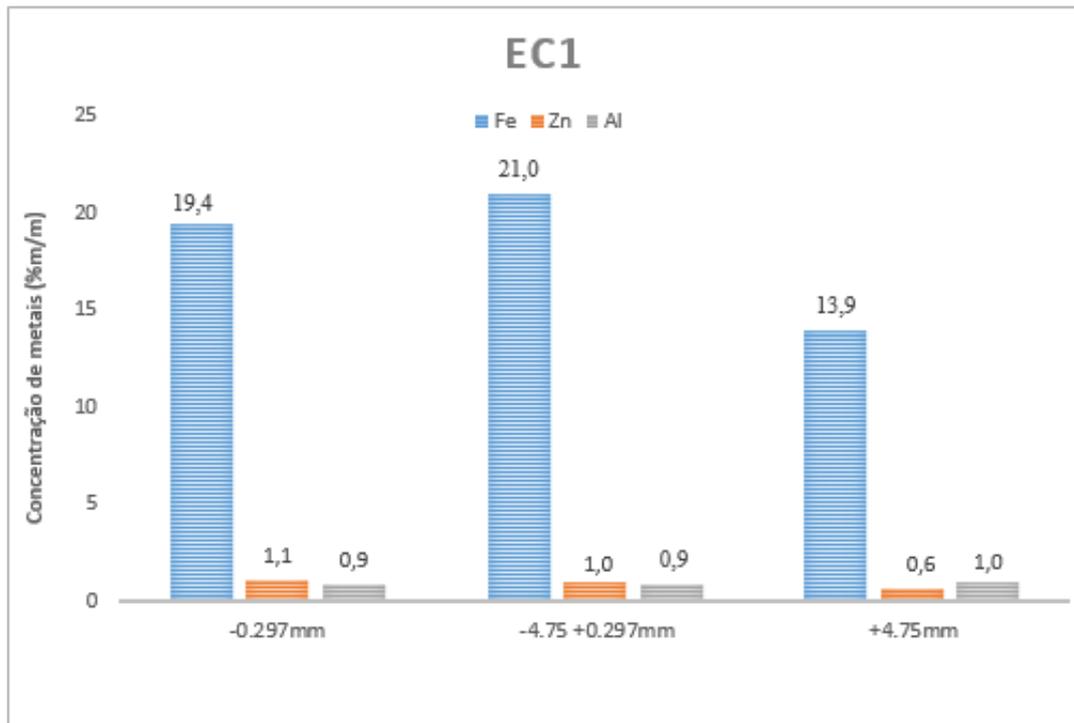


Figura 45: Concentração de metais (% m/m) na amostra EC1 em diferentes faixas granulométricas.

De forma semelhante à amostra Funil, as faixas granulométricas (-0,297 mm) e (-4,75 +0,297 mm) apresentaram as maiores concentrações de Ferro (19,4 e 21,0%, respectivamente). As partículas de maiores dimensões (+4,75 mm) apresentaram concentração de Ferro de 13,9%. Diante da distribuição granulométrica desta fração (Tabela 15), bem como a concentração de Ferro observada nas faixas (-0,297 mm) e (-4,75 +0,297 mm), as referidas faixas granulométricas da fração EC1 apresentam potencial para a recuperação de Ferro.

A Figura 46 apresenta as concentrações de Ferro, Zinco e Alumínio na amostra EC2, distribuídos nas três faixas granulométricas avaliadas.

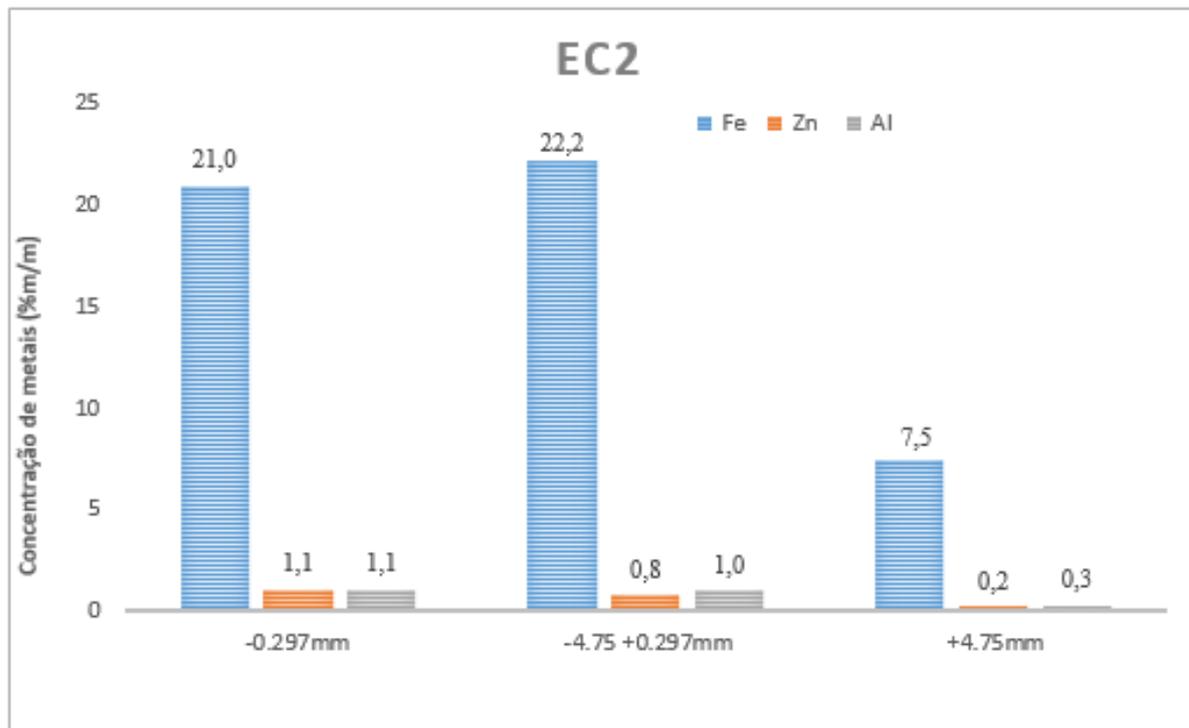


Figura 46: Concentração de metais (% m/m) na amostra EC2 em diferentes faixas granulométricas.

A partir da Figura 46 é possível verificar que as faixas granulométricas (-0,297 mm) e (-4,75 +0,297 mm) apresentaram as maiores concentrações de Ferro (21 e 22,2%, respectivamente). Conforme a Tabela 16, as faixas granulométricas (-0,297 mm) e (-4,75 +0,297 mm) representam 19,36% da fração EC2 (8,97% das partículas possuem partículas de tamanho menor que 0,297 mm e 10,64% estão compreendidos na faixa -4,75 +0,297 mm). A baixa presença de partículas de pequenas dimensões na fração EC2 (19,36%), bem como a baixa concentração de Ferro (7,5%) nas partículas de maiores dimensões, não recomendam métodos de recuperação de Ferro em faixas granulométricas distintas na fração EC2.

Na Figura 47 são apresentadas as concentrações de chumbo (ppm) para as amostras Funil, EC1 e EC2 nas diferentes faixas granulométricas avaliadas.

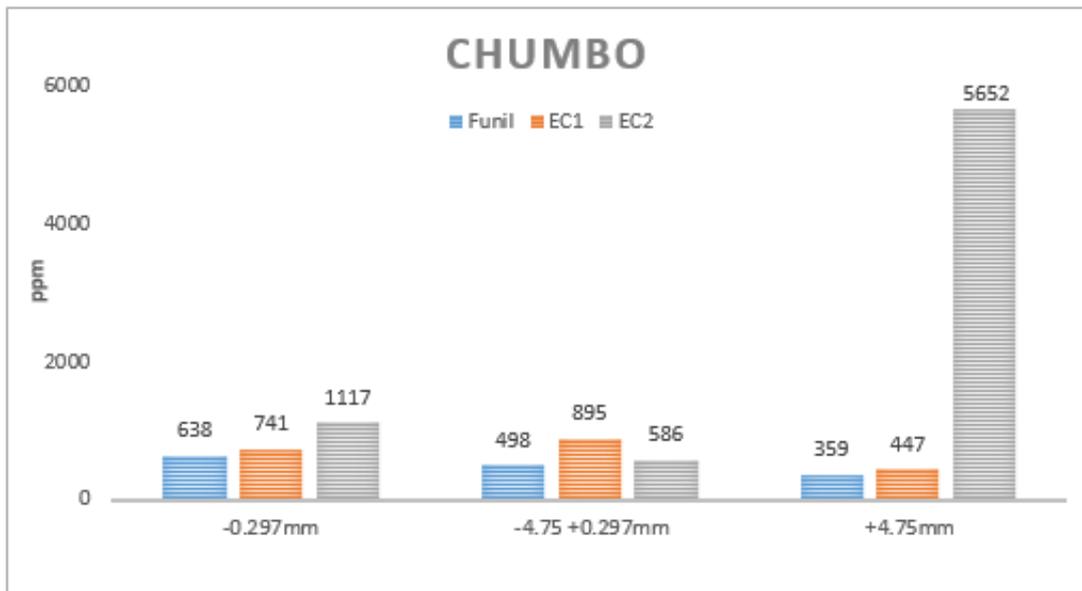


Figura 47: Concentração de chumbo (ppm) para as amostras Funil, EC1 e EC2 em diferentes faixas granulométricas.

A partir da Figura 47 é possível verificar que a amostra Funil apresenta a maior concentração de chumbo na faixa granulométrica (-0,297 mm), enquanto a amostra EC1 apresenta a maior concentração de chumbo na faixa granulométrica (-4,75 +0,297 mm). A amostra EC2 apresentou uma concentração de chumbo extremamente elevada na faixa granulométrica (+4,75 mm), o que recomenda um cuidado especial para qualquer tipo de destinação para esta faixa granulométrica.

#### 4.10 RESUMO DAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS FRAÇÕES ESTUDADAS

Na Tabela 17 encontra-se um quadro resumo das principais características encontradas neste trabalho.

Tabela 17: Resumo das principais características de cada fração estudada.

Amostra/ característica	Funil	EC1	EC2	TC9
Elementos não-identificados e pedras (%)	<b>78</b>	<b>55</b>	29	14
Plásticos (%)	3	5	<b>30</b>	<b>26</b>
Solo (%)	<b>15</b>	<b>29</b>	2	1
Borracha(%)	1	2	8	<b>30</b>
Metal (%)	1	2	<b>11</b>	<b>16</b>
Teor de umidade (%)	2,1	2,7	1,6	0,6

Tabela 17: Resumo das principais características de cada fração estudada. (continuação)

Amostra/ característica	Funil	EC1	EC2	TC9
Matéria volátil (%)	18,5	30,2	54,5	75,4
Teor de cinzas (%)	<b>73,4</b>	66,0	43,8	<b>13,8</b>
Carbono fixo (%)	8,1	3,8	1,7	<b>10,7</b>
Carbono (%)	10,7	14,8	<b>44,1</b>	<b>66,9</b>
Hidrogênio (%)	1,3	2,1	<b>6,5</b>	<b>7,8</b>
Enxofre (%)	0,32	0,35	0,41	<b>1,19</b>
Cloro (%)	0,17	0,23	<b>1,06</b>	0,51
Flúor (%)	0,05	0,06	0,04	0,02
Poder Calorífico (MJ/kg)	14,96	7,33	22,57	<b>30,93</b>
Ferro (%)	<b>19,34</b>	<b>23,54</b>	14,00	0,28
Alumínio (%)	1,12	1,30	1,67	1,49
Cobre (%)	0,39	1,93	1,86	0,04
Manganês (%)	0,20	0,23	0,12	0,00
Chumbo (%)	0,10	0,11	0,10	0,01
Silício (%)	0,10	0,16	0,14	0,13
Titânio (%)	0,08	0,11	0,04	0,00
Zinco (%)	1,55	1,22	0,78	0,46

A amostra EC1 e Funil são constituídas principalmente de elementos não-identificados e solo, representando respectivamente 84% e 93% da composição total das referidas amostras. A amostra EC2 é composta principalmente de plásticos, elementos não-identificados e metais, totalizando 70% da amostra. Na amostra TC9 é possível observar uma distribuição mais uniforme dos constituintes. Os constituintes em maior quantidade presentes na amostra são as borrachas, os plásticos e os metais.

A amostra TC9 apresentou o menor teor de umidade (0,63%), enquanto a amostra EC1 apresentou o maior teor (2,70%). A amostra TC9 apresentou o maior teor de matéria volátil (75,44%), enquanto a amostra funil apresentou o menor (18,48%). É possível relacionar o teor de matéria volátil com a análise térmica, pois quanto maior o teor de matéria volátil, menor é o teor de massa residual. A amostra TC9 apresentou aproximadamente 30% de massa residual e aproximadamente 75% de voláteis. Já a amostra Funil, apresentou um teor de massa residual de 76% e matéria volátil de 18%. O elevado teor de matéria volátil (maior teor de orgânicos) é atrativo para os processos de conversão termoquímica. Os teores de matéria volátil encontrados por outros pesquisadores para o shredder automotivo estão próximos a

amostra EC2 (54%), corroborando com os resultados encontrados, uma vez que o teor de polímeros encontrados nesta amostra foi de aproximadamente 30%.

As amostras Funil e EC1 apresentam os maiores teores de cinzas, 73% e 66%, respectivamente (relacionado com o teor de matéria inorgânica). A amostra TC9 apresenta o menor teor de cinzas (13,8%) e o maior teor de carbono fixo (10,7%). Os valores encontrados corroboram com a caracterização das amostras (a amostra Funil apresentou um percentual de 15% de solo e a amostra EC1 apresentou 29%). Além disto, grande parte dos inorgânicos é proveniente da categoria nomeada como “não-identificados”. Quanto maior o teor de cinzas e maior o teor de umidade, menor é a viabilidade da utilização da amostra para um processo de recuperação energética. A amostra TC9 apresentou o maior teor de carbono fixo, o que também está de acordo com a sua composição (26% de plásticos e 30% de borrachas).

As maiores concentrações de carbono e hidrogênio foram encontradas para a amostra TC9. Esta amostra também apresentou a maior concentração de enxofre (1,19%). Possivelmente estes resultados estejam associados à elevada quantidade de plásticos e borrachas que compõem esta amostra (26 e 30%, respectivamente). A amostra EC2 também apresentou uma concentração considerável de carbono e hidrogênio, sendo composta por 30% de plásticos e 8% de borrachas

A concentração de cloro foi mais elevada que a concentração de flúor em todas as amostras. A amostra EC2 apresentou a mais elevada concentração de cloro (1,06%). As elevadas concentrações de cloro podem limitar a utilização como substituto de combustível, em especial pela possível formação de dibenzo-para-dioxinas policloradas (PCDD) e dibenzofuranos policlorados (PCDF).

Os baixos valores de poder calorífico das amostras Funil e EC1 estão relacionados à elevada presença de cinzas, enquanto o poder calorífico mais elevado das amostras EC2 e TC9 está associado a maior presença de plásticos e borrachas e à maior concentração de carbono e hidrogênio nestas amostras. A amostra TC9 apresentou o maior poder calorífico (30,93 MJ/kg), de forma que o tratamento térmico deste grupo é uma técnica atrativa para a sua destinação final.

As concentrações de metais nas diferentes amostras do presente estudo são semelhantes às reportadas na literatura, embora a alimentação dos trituradores de sucata em outros países seja distinta do equipamento em análise neste estudo. A análise elementar demonstrou que o elemento mais abundante é o Ferro, fração Funil

(19,34%), EC1 (23,54%) e EC2 (14,00%), já para a fração TC9 o valor foi mais inferior (0,28%). Contudo as frações apresentam concentrações elevadas de alguns metais citados na Tabela 17.

As faixas granulométricas da fração Funil e EC1 (-0,297 mm) e (-4,75 +0,297 mm) apresentam potencial para a recuperação de aproximadamente 20% de Ferro, enquanto a faixa (+4,75 mm) da fração Funil possui potencial para recuperação do Alumínio (aproximadamente 5% $m/m$ ). Já a separação da amostra EC2 em diferentes faixas granulométricas para posterior separação do ferro não é uma alternativa interessante, visto que a distribuição das quantidades de Ferro se dá de forma equivalente nestas faixas.

## 5 CONCLUSÃO

Com este trabalho foi possível caracterizar as quatro frações do resíduo do shredder de uma indústria siderúrgica para fins de um posterior reaproveitamento.

As características da fração Funil são ideais para ser utilizada como incorporação da matéria-prima para fabricação de blocos cerâmicos estruturais. Esta fração possui uma grande quantidade de solo na composição, teor de massa residual de 76% e em contraponto baixa quantidade de materiais poliméricos (2,81%), matéria volátil de 18%, porém se faz necessário atender à especificação da faixa granulométrica de <2 mm para atender este mercado, visto que a fração Funil possui a granulometria <20 mm.

As frações Funil e EC1 do resíduo do shredder apresentam características compatíveis para o uso na indústria cimenteira. Os valores de cloro encontrados são de 0,17 e 0,23% respectivamente, inferiores ao limite estabelecido pelo segmento que é de 0,3% (informação fornecida pela cimenteira Votorantim Vidal Ramos) a fim de evitar a corrosão e compostos deletérios, em especial pela possível formação de dibenzo-para-dioxinas policloradas (PCDD) e dibenzofuranos policlorados (PCDF), na composição do cimento.

Pelos resultados das análises de metais, fica claro que se tem oportunidade na recuperação de ferrosos e não ferrosos em todas as frações estudadas. Sendo que as quantidades de metais na composição das amostras EC2 e TC9 foram 11% e 16% respectivamente e a quantidade do elemento Ferro nas amostras Funil e EC1 foram 19% e 24% respectivamente.

Em virtude do elevado poder calorífico que está associado a maior presença de plásticos e borrachas e à maior concentração de carbono e hidrogênio, as amostras EC2 e TC9 apresentam potencial de uso para o reaproveitamento energético. A amostra TC9 apresentou o maior poder calorífico (30,93 MJ/kg). Porém a amostra EC2 apresentou a mais elevada concentração de cloro que pode limitar a sua utilização como substituto de combustível, devido às formações de compostos já mencionados.

O reaproveitamento energético pode ser realizado na própria indústria siderúrgica, o que seria ideal pelo ponto de vista ambiental e financeiro, porém se faz necessário estudo amplo no que tange às emissões tanto atmosféricas quanto aos resíduos gerados no processo de aciaria, bem como análise de viabilidade econômica.

O resíduo do shredder da empresa em estudo é destinado, em sua totalidade, para aterro classe II. Dados reportados na literatura e as considerações deste estudo indicam que para o reaproveitamento do SR é necessário a separação deste em granulometrias diferentes, devido as características destas frações serem bem distintas.

## SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, observa-se a oportunidade dos seguintes trabalhos futuros:

- Realização de estudos para o aproveitamento da fração funil na fabricação de blocos cerâmicos estruturais, considerando a faixa granulométrica.
- Realização de estudos para o aproveitamento das frações Funil e EC1 na produção de cimentos.
- Realização de teste de pirólise em planta piloto com as frações EC2 e TC9 com análise de gases gerados.
- Realização de teste para utilização das frações EC2 e TC9 para reaproveitamento energético no próprio forno da aciaria da empresa siderúrgica.
- Realização de estudos para a remoção do cloro na fração EC2 e TC9.
- Realização de adequação da planta para recuperação de ferrosos e não ferrosos em todas as frações estudadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Annual Book of ASTM Standards, Vol. 05.06, Standard Practice of Proximate Analysis of Coal and Coke, American Society of Testing Materials, West Conshohocken, PA. D3172-89, 1997.

Annual Book of ASTM Standards, Vol. 1987, American Society of Testing Materials, Philadelphia, pp. E1131-E1186.

Annual Book of ASTM Standards, Vol. 05.06, Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke, American Society of Testing Materials, West Conshohocken, PA, D5865, 2013.

Annual Book of ASTM Standards, Vol. 05.06, Standard Test Method for Instrumental Determination of Carbon, Hydrogen and Nitrogen in Laboratory Samples of Coal and Coke, American Society of Testing Materials, West Conshohocken, PA, 2002. D5373-02.

Annual Book of ASTM Standards, Vol. 05.06, Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke, American Society of Testing Materials, West Conshohocken, PA. D3173-87, 1996.

Annual Book of ASTM Standards, Vol. 05.06, Standard Test Method for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using High-Temperature Tube Furnace Combustion, West Conshohocken, PA, 2014. D4239-14e2.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Resíduos Sólidos- Classificação. NBR 10.004. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Resíduos Sólidos- Amostragem de Resíduos Sólidos. NBR 10.007. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Carvão mineral - Determinação do teor de matérias voláteis. NBR8290 (MB1892). Rio de Janeiro, 1983.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Carvão mineral - Determinação do carbono fixo. NBR8299 (MB1899). Rio de Janeiro, 1983.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Carvão mineral - Determinação do teor de cinzas. NBR8289 (MB1891). Rio de Janeiro, 1983.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15.270 - Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação – Terminologia e Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15.270 - Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – Terminologia e Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15.270 - Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2005.

BATISTA, D. C. **Classificação e caracterização dos resíduos do beneficiamento da sucata de ferro e aço utilizada no processo siderúrgico para identificação de viabilidade de aplicações.** Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento da Universidade de São Paulo, 2014.

BERRUECO, C., ESPERANZA, E., MASTRAL, F.J., CEAMANOS, J., GARCÍA-BACAICOA, P. **Pyrolysis of waste tyres in an atmospheric static-bed batch reactor: Analysis of the gases obtained.** J. Anal. Appl. Pyrolysis, 74, 2005, 245–253.

BÖRJESON, L. LÖFVENIUS, G., HJELT, M., JOHANSSON, S., MARKLUND, S. **Characterization of automotive shredder residues from two shredding facilities with different refining processes in Sweden.** Waste Management & Research, 18, 2000, 358-366.

BOUGHTON, B.; HORVATH, A. **Environmental assessment of shredder residue management.** Resources, Conservation and Recycling. V. 47, n. 1, p. 3-25,2006.

BRASLAW, J., MELOTIK, D.J., GEALER, R.L., WINGFIELD, R.C. **Hydrocarbon generation during the inert gas Pyrolysis of automobile shredder waste.** Thermochemica Acta, 186, p. 1-18, 1991.

CAETANO, J. A. **Reaproveitamento do resíduo Terra da Shredder através da técnica de solidificação / estabilização em matrizes de cimento Portland para aplicação na construção civil.** Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento da Universidade de São Paulo, 2016.

CAVALCANTI, P. **Gestão ambiental na indústria siderúrgica – aspectos relacionados às emissões atmosféricas.** Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

CENTRO DE COPRODUTOS AÇO BRASIL. Disponível em: <http://www.ccabrazil.org.br> Acessado em 20 de maio de 2017.

DAY, M., COONEY, J.D., SHEN, Z. **Pyrolysis of automobile shredder residue: an analysis of the products of a commercial screw Kiln process.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 37, 1996, 49–67.

DCI – DIÁRIO COMÉRCIO, INDÚSTRIA & SERVIÇOS. Disponível em: <https://www.dci.com.br/industria> Acessado em 12 de abril de 2018.

DÍEZ, C, SÁNCHEZ, M.E., HAXAIRE, P., MARTÍNEZ, O., MORÁN, A. **Pyrolysis of tyres: A comparison of the results from a fixed-bed laboratory reactor and a pilot plant (rotatory reactor).** J. Anal. Appl. Pyrolysis, 74, 2005, 254–258.

DIRETIVA 2000/76/CE do Parlamento Europeu e o Conselho da União Européia. **Sobre a incineração de resíduos**, de 4 de dezembro de 2000.

EDO, M., ARACIL, I., FONT, R., ANZANO, M., FULLANA, A., COLLINA, E. **Viability study of automobile shredder residue as fuel**. Journal of Hazardous Materials, 2013, 260, 819-824.

FERNÁNDEZ, A.M., BARRIOCANAL. C., ALVAREZ, R. A.M. **Pyrolysis of a waste from the grinding of scrap tyres**. Journal of Hazardous Materials, 203– 204, 2012, 236– 243.

FIGUEIREDO, J. **Aplicação de uma fração do resíduo do shredder na fabricação de blocos cerâmicos estruturais**. Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

FIORE, S.; RUFFINO, B., ZANETTI, M.C. **Automobile Shredder Residues in Italy: Characterization and valorization opportunities**. Waste Management, v 32, p. 1548-1559, 2012.

GODINHO, M. **Gaseificação e combustão de resíduos sólidos da indústria calçadista**. Tese de Doutorado. Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

GUINARD, K. **Pirólise de Resíduos de Desmantelamento de Veículos**. 2012. 72 f. Dissertação Mestrado (Pós-Graduação em Energia e Bioengenharia) - Faculdade de Ciência e Tecnologia – Lisboa, Portugal, 2012.

HARDER, M.K. e FORTON, O.T. **A critical review of developments in the pyrolysis of automotive shredder residue**. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 79, 2007, 387–394.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br>. Acessado em: 22 mai. 2017.

Instituto Brasileiro de Siderurgia. **Siderurgia Brasileira: Relatório de Sustentabilidade 2014**. IBS: 2014. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br>. Acessado em 15 de maio de 2017.

ISLAM, M.R., JOARDDER, M.U.H., HASAN, S.M., TAKAI, K., HANIU, H. **Feasibility study for thermal treatment of solid tire wastes in Bangladesh by using pyrolysis technology**. Waste Management, 31, 2011, 2142–2149.

JODY, B.J., DANIELS, E.J., DURANCEAU, C.M., POMYKALA, J.A., SPANGENBERGER, J.S. **End of-life vehicle recycling: the state of the art of resource recovery from shredder residue**. Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, ANL/ ESD/10-8, 2010.

LAREGOITI, M.F., CABALLERO, B.M., DE MARCO, I., TORRES, A., CABRERO, M.A., CHOMÓN, M.J. **Characterization of the liquid products obtained in tyre pyrolysis.** J. Anal. Appl. Pyrolysis, 71, 2004, 917–934.

LEUNG, D.Y.C., YIN, X.L., ZHAO, Z.L., XU, B.Y., CHEN, Y. **Pyrolysis of tire powder: influence of operation variables on the composition and yields of gaseous product.** Fuel Processing Technology, 79, 2002, 141–155.

LOPES, M.H., FREIRE, M., GALHETAS, M., GULYURTLU, I., CABRITA, I. **Leachability of automotive shredder residues burned in a fluidized bed system.** Waste Management, 29, 2009, 1760–1765.

KELLER, C. **Optimized disposal of automotive shredder residue. In: municipal solid waste management- Strategies and technologies for sustainable solutions.** LUDWIG, C., HELLWEG, S., STUCKI, S., (Eds), Springer-Verlag, Heidelberg (Germany), 294-307 (2003).

MANCINI, G.; TAMMA, R, VIOTTI, P. **Thermal process of fluff: Preliminary tests on a full-scale treatment plant.** Waste Management, v. 30, p. 1670-1682, 2010.

MARCO, I.D., CABALERRO, B., TORRES, A., LAREGOITI, M.F., CHOMÓN, M.J., CABRERO, M.A. **Recycling polymeric wastes by means of pyrolysis.** Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 77 (7), 2002, 817-823.

MARK, F.E.; FISHER, M.M. **Energy recovery from automotive shredder residue through co-combustion with municipal solid waste.** In: R'99 Recovery Recycling Re-integration. Proceedings of R'99 Recovery Recycling Re-integration. Geneva (Switzerland): 1999.

MAYORAL, M.C., IZQUIERDO, M.T., ANDRÉS, J.M., RUBIO, B. **Different approaches to proximate analysis by thermogravimetry analysis.** Thermochemica Acta, 370, 91-97, 2001.

MIRABILE, D., PISTELLI, M.I., MARCHESINI, M., FALCIANI, R., CHIAPELLI, L. **Thermal valorisation of automobile shredder residue: injection in blast furnace.** Waste Management, 22 (8), p.841-851, 2002.

MOURÃO, M. **Introdução à siderurgia.** Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2011.

NI, F., CHEN, M. **Research on ASR in China and its energy recycling with Pyrolysis method.** Journal of Material Cycles and Waste Management, 17 p. 107-117, 2015.

NOMURA, S. **Behavior of chlorine during co-carbonization of coal and chloride compounds in cokemaking process.** International Journal of Coal Geology, 2014, 130, 27-32.

NOURREDDINE, M. **Recycling of auto shredder residue.** Journal of Hazardous Materials, A139, 2007, 481-490.

RAUSA, R. & POLLESEL, P. **Pyrolysis of automotive shredder residue (ASR)– influence of temperature on the distribution of products.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 40/41, 1997, 383-401.

RECKZIEGEL, V.N. **Caracterização para o aproveitamento do resíduo de um triturador de sucata em uma usina siderúrgica.** Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

PERONDI, D. **Conversão Termoquímica do resíduo do triturador de sucata (RTS) de uma siderúrgica.** Tese de doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2017, 245 páginas.

ROY, C. & CHAALA, A. **Vacuum pyrolysis of automobile shredder residues.** Resources, Conservation and Recycling, 32, 2001, 1–27.

SATTLER, H.P., LAAGE, B. **ASR – From waste to products.** Proc. of the R'2000 Recovery, Recycling, Reintegration Conference, Toronto, Canada, June, 2000.

SAXENA, N.S., RAO, T.A., REHMAT A. AND MESINGERS, M.C. **Combustion and Co-combustion of Auto Fluff.** Energy, 20, 877-887, 1995.

VERMEULEN, I., VAN CANEGHEM, J., BLOCK, C., BAEYENS, J., VANDECASTEELE, C. **Automotive shredder residue (ASR): Reviewing its production from end-of-life vehicles (ELVs) and its recycling, energy or chemicals' valorization.** Journal of Hazardous Materials, 190, 8 – 27, 2011.

VIGANO, F., CONSONNI, S., GROSSO, M., RIGAMONTI, L. **Material and energy recovery from Automotive Shredded Residues (ASR) via sequential gasification and combustion.** Waste Management, 30, 2010, 145-153.

WARNE, S.St.J. **Thermal analysis and coal assessment: an overview with new developments.** Thermochim. Acta, 272, 1-9, 1996.

WILLIAMS, P.T., CUNLIFFE, A.M. **Composition of oils derived from the batch pyrolysis of Tyres.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 44, 1998, 131–152.

WU, Y.J, TAI, H.S. (2006). **Pyrolysis kinetic study of auto shredder residue using thermal gravimetric analysis.** Dissertation, National Kaohsiung First University of Science and Technology, Kaohsiung City

ZOLEZZI, M., NICOLELLA, C., FERRARA, S., IACOBUCCI, C., ROVATTI, M. **Conventional and fast pyrolysis of automotive shredder residues (ASR).** Waste Management, 24, 2004, 691-699.

### Apêndice 1 – Distribuição granulométrica das amostras

EC1 INICIAL			
(150g)			
Tempo (min)		Vibração	
15		6	

Peneira (mesh)	Abertura da peneira (mm)	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Retenção (g)	Retenção (%)
Fundo	<0,075	299,04	300,01	0,97	0,65
200	0,075	319,81	322,39	2,58	1,72
150	0,106	338,42	350,10	11,68	7,79
65	0,212	255,63	268,70	13,07	8,72
48	0,300	356,98	361,81	4,83	3,22
35	0,425	416,47	427,15	10,68	7,13
28	0,600	358,85	368,79	9,94	6,63
20	0,850	501,37	507,98	6,61	4,41
14	1,180	412,03	418,45	6,42	4,28
10	1,700	482,38	487,80	5,42	3,62
8	2,360	465,44	469,30	3,86	2,58
6	3,350	461,20	464,50	3,30	2,20
4	4,750	436,30	506,81	70,51	47,05

Total 149,87

EC1 Mistura (Inicial+Final)			
(150g)			
Tempo (min)		Vibração	
15		6	

Peneira (mesh)	Abertura da peneira (mm)	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Retenção (g)	Retenção (%)
Fundo	<0,075	299,04	300,18	1,14	0,76
200	0,075	319,78	321,08	1,30	0,87
150	0,106	338,46	348,09	9,63	6,44
65	0,212	355,57	365,88	10,31	6,90
48	0,300	357,02	360,99	3,97	2,66
35	0,425	416,66	425,73	9,07	6,07
28	0,600	358,89	366,07	7,18	4,80
20	0,850	501,51	507,43	5,92	3,96
14	1,180	412,05	417,26	5,21	3,49
10	1,700	482,35	487,26	4,91	3,29
8	2,360	465,44	468,28	2,84	1,90
6	3,350	461,20	463,68	2,48	1,66
4	4,750	436,07	521,55	85,48	57,20

Total 149,44

EC1 FINAL			
(150g)			
Tempo (min)		Vibração	
15		6	

Peneira (mesh)	Abertura da peneira (mm)	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Retenção (g)	Retenção (%)
Fundo	<0,075	349,39	351,17	1,78	1,19
200	0,075	319,75	320,82	1,07	0,71
150	0,106	338,44	346,75	8,31	5,54
65	0,212	355,53	368,50	12,97	8,65
48	0,300	356,96	361,45	4,49	2,99
35	0,425	416,61	428,61	12,00	8,00
28	0,600	358,87	369,11	10,24	6,83
20	0,850	501,34	508,83	7,49	4,99
14	1,180	411,98	420,20	8,22	5,48
10	1,700	482,38	490,70	8,32	5,55
8	2,360	465,38	471,15	5,77	3,85
6	3,350	461,16	467,16	6,00	4,00
4	4,750	436,18	499,52	63,34	42,23

Total 150

(a)

EC2 INICIAL					
(150g)					
		Tempo (min)	Vibração		
		15	6		

Peneira (mesh)	Abertura da peneira (mm)	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Retenção (g)	Retenção (%)
Fundo	<0,075	299,04	299,49	0,45	0,30
200	0,075	319,72	320,17	0,45	0,30
150	0,106	338,46	339,77	1,31	0,87
65	0,212	355,48	356,51	1,03	0,69
48	0,300	357,00	357,28	0,28	0,19
35	0,425	416,58	417,09	0,51	0,34
28	0,600	358,81	359,60	0,79	0,53
20	0,850	501,37	501,66	0,29	0,19
14	1,180	411,98	412,45	0,47	0,31
10	1,700	482,35	482,88	0,53	0,35
8	2,360	465,40	465,75	0,35	0,23
6	3,350	461,18	461,84	0,66	0,44
4	4,750	436,27	579,32	143,05	95,26
Total				150,17	

EC2 FINAL					
(150g)					
		Tempo (min)	Vibração		
		15	6		

Peneira (mesh)	Abertura da peneira (mm)	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Retenção (g)	Retenção (%)
Fundo	<0,075	299,04	299,76	0,72	0,48
200	0,075	319,71	320,46	0,75	0,50
150	0,106	338,57	340,94	2,37	1,58
65	0,212	355,45	357,81	2,36	1,58
48	0,300	356,97	357,59	0,62	0,41
35	0,425	416,57	417,60	1,03	0,69
28	0,600	358,87	359,96	1,09	0,73
20	0,850	501,39	501,64	0,25	0,17
14	1,180	411,98	412,36	0,38	0,25
10	1,700	482,32	482,77	0,45	0,30
8	2,360	465,39	465,82	0,43	0,29
6	3,350	461,16	461,72	0,56	0,37
4	4,750	436,20	574,89	138,69	92,65
Total				149,7	

EC2 Mistura (Inicial+Final)					
(150g)					
		Tempo (min)	Vibração		
		15	6		

Peneira (mesh)	Abertura da peneira (mm)	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Retenção (g)	Retenção (%)
Fundo	<0,075	299,04	300,80	1,76	1,18
200	0,075	319,78	321,67	1,89	1,27
150	0,106	338,43	344,82	6,39	4,29
65	0,212	355,56	362,27	6,71	4,51
48	0,300	357,02	358,92	1,90	1,28
35	0,425	416,63	420,66	4,03	2,71
28	0,600	358,90	362,35	3,45	2,32
20	0,850	501,47	504,12	2,65	1,78
14	1,180	412,11	414,52	2,41	1,62
10	1,700	482,40	484,83	2,43	1,63
8	2,360	465,51	467,36	1,85	1,24
6	3,350	461,25	464,24	2,99	2,01
4	4,750	436,27	546,74	110,47	74,18
Total				148,93	

(b)

FUNIL INICIAL					
(150g)					
Tempo (min)		Vibração			
15		6			

Peneira (mesh)	Abertura da peneira (mm)	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Retenção (g)	Retenção (%)
Fundo	<0,075	299,02	301,40	2,38	1,59
200	0,075	319,72	323,51	3,79	2,53
150	0,106	338,41	351,03	12,62	8,42
65	0,212	355,47	370,11	14,64	9,76
48	0,300	356,97	361,92	4,95	3,30
35	0,425	416,58	430,23	13,65	9,10
28	0,600	358,84	374,66	15,82	10,55
20	0,850	501,32	511,15	9,83	6,55
14	1,180	411,96	424,17	12,21	8,14
10	1,700	482,32	495,83	13,51	9,01
8	2,360	465,36	476,74	11,38	7,59
6	3,350	461,13	475,08	13,95	9,30
4	4,750	436,16	457,40	21,24	14,16

Total 149,97

FUNIL Mistura (Inicial+Final)					
(150g)					
Tempo (min)		Vibração			
15		6			

Peneira (mesh)	Abertura da peneira (mm)	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Retenção (g)	Retenção (%)
Fundo	<0,075	298,98	299,62	0,64	0,43
200	0,075	319,71	321,00	1,29	0,86
150	0,106	338,49	350,03	11,54	7,69
65	0,212	355,57	368,25	12,68	8,45
48	0,300	356,96	365,12	8,16	5,44
35	0,425	416,65	431,44	14,79	9,86
28	0,600	358,82	374,27	15,45	10,30
20	0,850	501,35	513,93	12,58	8,39
14	1,180	411,94	425,15	13,21	8,81
10	1,700	482,29	495,36	13,07	8,71
8	2,360	465,34	476,87	11,53	7,69
6	3,350	461,09	469,41	8,32	5,55
4	4,750	436,14	462,86	26,72	17,82

Total 149,98

FUNIL FINAL					
(150g)					
Tempo (min)		Vibração			
15		6			

Peneira (mesh)	Abertura da peneira (mm)	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Retenção (g)	Retenção (%)
Fundo	<0,075	299,00	299,56	0,56	0,38
200	0,075	319,72	320,92	1,20	0,81
150	0,106	338,39	347,85	9,46	6,35
65	0,212	355,53	367,07	11,54	7,75
48	0,300	356,94	361,78	4,84	3,25
35	0,425	416,60	429,10	12,50	8,39
28	0,600	358,82	371,83	13,01	8,73
20	0,850	501,39	514,60	13,21	8,87
14	1,180	411,94	424,97	13,03	8,75
10	1,700	482,29	498,40	16,11	10,81
8	2,360	465,35	478,30	12,95	8,69
6	3,350	461,11	475,59	14,48	9,72
4	4,750	436,14	462,21	26,07	17,50

Total 148,96

(c)