

PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

1 Introdução

Atualmente grande parte da população mundial vive em áreas urbanas, causando enormes problemas ao meio ambiente local, particularmente nos grandes aglomerados de países desenvolvidos ou em desenvolvimento. Diferentes estratégias têm sido empregadas a fim de solucionar ou ao menos minimizar esses problemas, como o uso de avançadas tecnologias ambientais e o aumento da reciclagem e o reuso.

Quando um material usado, como um carro, um jornal ou um computador, alcança o fim do seu ciclo de vida, ele perde valor econômico e torna-se um resíduo.

Em muitos países, inclusive no Brasil, os resíduos comumente vão ser dispostos em aterros sanitários, queimados ou mesmo depositados a céu aberto sem qualquer controle ou cuidado com o meio ambiente, provocando a poluição do solo, água e ar e causando doenças na população próxima destes locais. Quando isso acontece, além de poluir o meio ambiente, os componentes ou materiais que compõem esses resíduos estão deixando de se tornar reusáveis, recicláveis ou reaproveitáveis.

Enquanto isso, novas fontes de energia e materiais são cada vez mais escassas e difíceis de serem encontradas, assim como locais que possam ser usados para dispor resíduos a um baixo custo. Como resultado, a sociedade se interessa cada vez mais por meios de reuso, reciclagem e reaproveitamento de materiais.

Neste projeto pretende-se trabalhar com os mais variados tipos de resíduos, incluindo resíduos sólidos industriais, sucatas dos mais variados tipos de equipamentos eletro-eletrônicos, resíduos da indústria siderúrgica, materiais poliméricos e biomassa.

Desta forma o objetivo principal do projeto é estudar os materiais presentes nos resíduos sólidos e verificar a melhor destinação para estes resíduos, seja ela o reuso, reaproveitamento ou reciclagem, a fim de aumentar a vida útil dos materiais ou então recolocá-los novamente no ciclo de produção, diminuindo assim a exploração de reservas naturais de matérias-primas.

2 Objetivos

2.1 1 Objetivos gerais do projeto

Os objetivos do presente projeto são:

- Produção de conhecimento científico e tecnológico expresso na forma de publicações e patentes,
- Valorização intelectual e aplicação sócio-econômica dos conhecimentos desenvolvidos,
- Formação de recursos humanos através do aperfeiçoamento dos estudantes envolvidos, e
- Consolidação de um espírito de trabalho cooperativo.

2.2 Objetivos específicos

Neste projeto pretende-se caracterizar resíduos e sucatas, bem como estabelecer as possibilidades de reuso, reaproveitamento e reciclagem destes através de técnicas de processamento mecânico. Os principais objetivos são:

- ✓ Caracterizar resíduos e sucatas geradas em processos industriais e também pós-consumo incluído biomassa;
- ✓ Caracterizar a toxicidade de resíduos através de ensaios de lixiviação;
- ✓ Caracterizar resíduos e sucatas geradas no pós-consumo (Latas, placas de circuito impresso, baterias, pilhas, entulhos da construção civil, resíduos de biomassa, etc.);
- ✓ Estudar possibilidades de reuso direto de resíduos e sucatas, sem necessidade de processos de transformação;
- ✓ Estudar possibilidades de reaproveitamento dos resíduos e sucatas como matéria-prima para outros processos industriais;
- ✓ Estudar possibilidades de reciclagem dos resíduos e sucatas através de processamento mecânico (processos de cominuição, separação granulométrica, por densidade, separação hidráulica em leito fluidizado, magnética e eletrostática, processos de flotação, líquidos densos, pirólise e gaseificação);
- ✓ Caracterizar a compatibilidade ambiental dos produtos gerados com utilização de resíduos como matéria-prima;
- ✓ Caracterizar a toxicidade de resíduos gerados em processos de reciclagem através de ensaios de lixiviação;
- ✓ Avaliar os processos de produção que utilizam resíduos e os processos de reciclagem de materiais em termos de compatibilidade ambiental.

3 Justificativa

Este projeto pretende ampliar e difundir conceitos de sustentabilidade no sentido de fortalecer a engenharia sustentável, direcionada para a caracterização, reuso, reaproveitamento e reciclagem de resíduos sólidos junto a sociedade e principalmente aos acadêmicos do Curso de Engenharia Química da UFSM.

A área de resíduos sólidos necessita cada vez mais estudos, pois a quantidade e a velocidade de geração aumentam a cada ano. Desta forma é necessário estudar alternativas tanto para a reciclagem quanto para o reaproveitamento e reuso de resíduos sólidos, aumentando assim o ciclo de utilização dos materiais, diminuindo a velocidade de extração de recursos naturais para suprir a demanda industrial.

Um dos exemplos é a indústria de bens de consumo, pois o rápido desenvolvimento desta cadeia produtiva aliado ao aumento do consumo de bens pela população gera um número cada vez maior de equipamentos defeituosos e obsoletos, os quais precisam ser reaproveitados, reciclados ou então dispostos de maneira correta.

A disposição de sucatas e resíduos em aterros implica na perda de materiais metálicos valiosos e no aumento de riscos de poluição por contaminação de áreas com compostos metálicos. O conceito de não-geração de resíduos e de um sistema de gerenciamento que busque a minimização, reutilização, reciclagem, tratamento e destinação deveria estar inserido em todas as políticas públicas e privadas.

A instalação de processos que reduzam e reutilizem em circuito fechado os resíduos gerados é interesse de todos. Assim as bases de um processo, orientado para a aceitação ambiental, são:

- a) Medidas Primárias: Diminuir ou evitar a geração de resíduos;

- b) Medidas Secundárias: Reutilizar os resíduos;
- c) Medidas Terciárias: Dispor de maneira compatível ao meio ambiente, ou seja, resíduos que não podem reutilizados devem estar de tal forma inertes, que possam ser depositados sem impacto às zonas adjacentes.

Desta forma, permanecem duas alternativas para o futuro da indústria de bens de consumo:

- a) A instalação de processos que reduzam e reutilizem em circuito fechado os resíduos gerados;
- b) A produção de um resíduo que possa ser facilmente vendido para reciclagem.

A reciclagem de materiais obsoletos e/ou defeituosos é importante, pois representa um ganho econômico, próprio do material, sendo este ganho significativo em resíduos contendo metais como alumínio, chumbo, cobre e, particularmente, os metais nobres: ouro, prata e platina. Outra vantagem da reutilização está na economia de energia. No processo primário de produção de metais, o metal é obtido através da redução do minério com elevado consumo de energia. No processo secundário o metal é obtido basicamente da fusão da sucata, já em estado metálico, e o consumo de energia é muito menor.

Uma caracterização de resíduos e sucatas consiste de várias etapas e tem como objetivo principal a determinação das propriedades físico-químicas dos materiais e a avaliação da periculosidade destes. Desta forma, para que as possibilidades de reciclagem fiquem estabelecidas é importante conhecer a composição química e as propriedades físicas do material, estabelecendo-se as características deste como matéria-prima secundária para diferentes indústrias. Para a avaliação da compatibilidade ambiental de resíduos e sucatas que serão utilizados como matéria-prima ou dispostos em aterros, diferentes características devem ser avaliadas, de acordo com as Normas NBR 10004, 10005 e 10006 [1, 2, 3]. Em geral, pode-se estabelecer que uma caracterização de resíduos e sucatas inclua, entre outros aspectos, os itens citados abaixo:

- ⇒ Heterogeneidade
- ⇒ Composição Química, considerando-se a composição elementar total, concentração de sais, conteúdo de óleos e graxas, pH, potencial redox, etc..
- ⇒ Características físicas: densidade, tamanho de partícula, permeabilidade, porosidade, umidade, etc..
- ⇒ Periculosidade: corrosividade, reatividade, radioatividade, toxicidade, etc. Com relação à toxicidade, ensaios de lixiviação e solubilização indicam uma caracterização de resíduos em três diferentes classes: Classe I (Perigosos), Classe II (Não-Inertes) e Classe III (Inertes).

Após a caracterização dos resíduos e sucatas pode-se estabelecer as condições de reciclagem dos materiais. A Figura 1 apresenta as diferentes possibilidades de destinação de resíduos e sucatas.

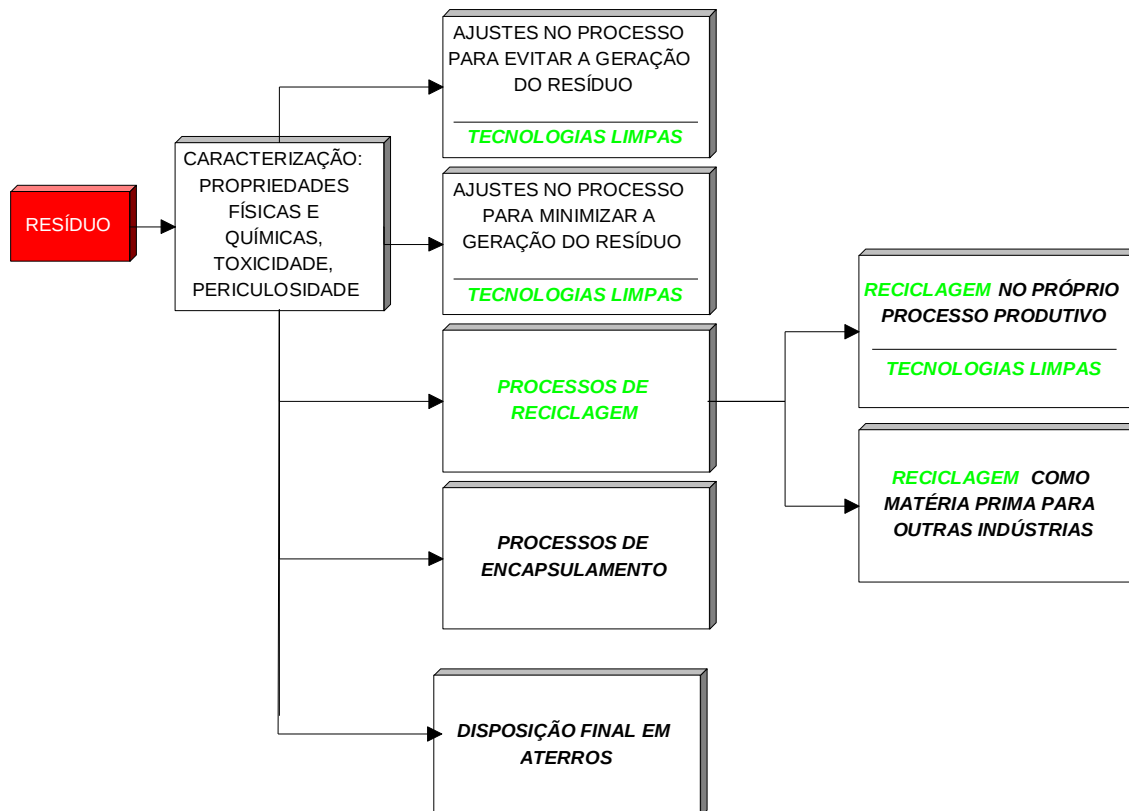


Figura 1: Possibilidades de Destinação Final de Resíduos

Tecnologias utilizadas para a reciclagem de sucatas metálicas incluem processos mecânicos, químicos e térmicos. Destes processos resultam ligas metálicas e/ou soluções que podem ser reutilizadas. E muitas vezes resíduos, os quais devem ser novamente caracterizados em termos de compatibilidade ambiental.

4 Revisão bibliográfica

Considerando-se a pesquisa atualmente em andamento, pode-se considerar que as principais linhas de pesquisa estão associadas a diferentes segmentos, conforme especificado a seguir:

- Caracterização e reciclagem de diferentes sucatas da Indústria Eletro/Eletrônica (Placas de Circuito Impresso e Baterias) com o objetivo de reciclagem de metais.
- Caracterização de resíduos contendo metais com o objetivo de estabelecer condições adequadas de reciclagem. Entre outros resíduos têm-se estudado resíduos da produção de couro, lodo galvânicos e diferentes resíduos industriais.

4.1 Reciclagem de Baterias e Sucatas Eletrônicas

A indústria de equipamentos eletrônicos tem gerado em quantidade cada vez maior sucatas e baterias que devem ser descartadas. Atualmente muita sucata de equipamentos elétricos/eletrônicos e muitas baterias/pilhas são dispostas junto com o lixo doméstico [4], com exceção dos grandes aparelhos (geladeiras, fogões, etc) e das baterias automobilísticas, cujos materiais são reutilizados pela indústria de produção

secundária de metais. Assim, os equipamentos menores e obsoletos e pilhas de consumo doméstico são depositados em lixões ou queimados sem tratamento prévio [5, 6].

Equipamentos utilizados na indústria de processamento de dados ou de entretenimento podem conter mais de 30% de placas de circuito impresso. Estas placas são formadas por unidades isoladas e integrais e sua sucata contém cobre, chumbo, zinco estanho, bem como os metais preciosos ouro, prata e platina [7]. As sucatas representam, então, uma matéria prima interessante e valiosa. Além de metais e ligas metálicas, as placas de circuito impresso contêm vários compostos orgânicos e inorgânicos [8, 9]. Como linha geral pode-se dizer que estas placas estão formadas por 49% de materiais cerâmicos, vidros e óxidos, 19% de plásticos, 4% de bromo e 28% de metais [10]. A composição real depende da origem do circuito impresso [11], assim como do tipo e idade do equipamento. Angerer, Bättcher e Bars [8] relatam um exemplo sobre as diferenças de composição entre placas de circuito impresso provenientes de computadores antigos, novos e equipamentos de vídeo. A concentração média de cobre, por exemplo, é 29.800 ppm em computadores antigos, 37.000 ppm em novos e 44.900 ppm em equipamentos de vídeo. Outro exemplo é dado com a concentração de ouro: 1.050 ppm em computadores antigos, 750 ppm em novos e 870 ppm em equipamentos de vídeo. Dos materiais presentes na composição das placas, os metais são a parte mais valiosa e justificam sua reciclagem, tornando-a economicamente viável [12, 13].

Com relação às pilhas e baterias atualmente utilizadas, a Resolução CONAMA N.º 257, de 30/06/1999, estabelece limites de concentração de poluentes, proibindo que determinados tipos de baterias sejam enviados a aterros sanitários [14, 15, 16]. As tabelas a seguir apresentam as limitações de composição impostas pelo CONAMA, os tipos de baterias atualmente em uso e a destinação final proposta a estas sucatas.

Tabela 1: Limites na Concentração de Elementos em Baterias estabelecidos pelo CONAMA

A partir de 01/01/2000,	A partir de 01/01/2001
A fabricação, importação e comercialização de pilhas deverão atender os seguintes limites:	
I. com até 0,025% em peso de mercúrio, quando forem do tipo zinco-manganês e alcalina-manganês	I. com até 0,010% em peso de mercúrio, quando forem do tipo zinco-manganês e alcalina-manganês
II. com até 0,025% em peso de cádmio, quando forem do tipo zinco-manganês e alcalina-manganês	II. com até 0,015% em peso de cádmio, quando forem do tipo zinco-manganês e alcalina-manganês
III. com até 0,400% em peso de chumbo, quando forem do tipo zinco-manganês e alcalina-manganês	III. com até 0,200% em peso de chumbo, quando forem do tipo zinco-manganês e alcalina-manganês
IV. com até 25 mg de mercúrio por elemento, quando forem do tipo pilhas miniaturas e botão	IV. com até 25 mg de mercúrio por elemento, quando forem do tipo pilhas miniaturas e botão

Tabela 2: Tipos de Baterias Primária Comercializadas

Baterias Primárias	Características	Eletrólito	Principais Componentes	Usos	Voltagem
Zinco-Carbono	- Baixa Capacidade de Armazenamento de Energia - Baixo Custo	Cloreto de Amônia, Cloreto de Zinco	Zinco, Carbono	Lanternas, Brinquedos, Controles remotos	1,5V
Manganês Alcalina	- Maior Capacidade de Armazenamento de Energia que as de Zn-C - Moderada taxa de descarga - Maior Custo que as de Zn-C	Hidróxido de Potássio	Zinco, Dióxido de Manganês	Rádios, Detectores de Fumaça, Brinquedos	1,5V
Lítio	- Grande Capacidade de Armazenamento de Energia - Alto Custo	Solventes Orgânicos	Dióxido de Lítio e Manganês	Câmaras, pagers	3,0V
Zinco-Ar	- Grande Capacidade de Armazenamento de Energia - Baixa taxa de descarga - Baixo Custo	Hidróxido de Potássio	Zinco, Carbono	Aparelhos Auditivos, pagers	1,4V
Prata	- Grande Capacidade de Armazenamento de Energia - Baixa taxa de descarga - Alto Custo	Hidróxido de Potássio	Zinco, Óxido de Prata	Relógios, Calculadoras, Aparelhos Auditivos	1,55V
Óxido de Mercúrio	Estão proibidas	Hidróxido de Potássio	Zinco, Óxido de Mercúrio	Equipamentos especializados médicos, militares e de emergência	1,35V

Tabela 3: Tipos de Baterias Secundárias Comercializadas

Baterias Secundárias	Características	Eletrólito	Principais Componentes	Usos	Voltagem
Níquel-Cádmio	- Alta taxa de Descarga - Moderada Capacidade de Armazenamento de Energia - Custo Relativamente Baixo	Hidróxido de Potássio	Níquel, Cádmio	Telefones sem fio, rádios profissionais	1,2V
Níquel Metal Hidreto	- Moderada taxa de descarga - Alta Capacidade de Armazenamento de Energia - Custo Relativamente Alto	Hidróxido de Potássio	Níquel, Vários Metais terras raras	Computadores, Telefones celulares	1,2V
Lítio	- Moderada taxa de descarga - Alta Capacidade de Armazenamento de Energia - Custo Alto	Solventes Orgânicos	Lítio , Grafite e Óxido de Cobalto	Computadores, Telefones celulares	3,0V
Zinco-Ar	- Moderada taxa de descarga - Moderada Capacidade de Armazenamento de Energia - Custo Alto	Hidróxido de Potássio	Zinco, Carbono	Computadores	1,4V
Alcalinas recarregáveis	- Moderada taxa de descarga - Custo maior que alcalinas primárias	Hidróxido de Potássio	Zinco, Óxido de Manganês	Rádios, Brinquedos, Walkmans	1,5V
Chumbo-Ácido	- Alta taxa de descarga - Moderada Capacidade de Armazenamento de Energia - Custo Baixo	Ácido Sulfúrico	Chumbo	Automóveis	2,0V

Tabela 4: Disposição Final Indicada para Baterias

Baterias	Usos mais comuns	Disposição Final Indicada
Pilhas comuns(Zn-C) e alcalinas Produção no Brasil: 800 milhões de unidades/ano	Lanternas, rádios, brinquedos, aparelhos de controle remoto, equipamentos fotográficos, pagers e walkman	Dispostas junto com os resíduos domiciliares
Pilhas e baterias especiais compostas pelos sistemas níquel-metal-hidreto, íons de lítio, lítio, zinco-ar, tipo botão ou miniatura	Aplicações específicas de caráter científico, médico, militar ou como parte integrante de circuitos eletro-eletrônicos, pagers, cameras, relógios	Dispostas junto com os resíduos domiciliares
Pilhas e baterias que contenham em suas composições chumbo, cádmio, mercúrio e seus compostos	Produtos Eletro-Eletrônicos Baterias Industriais: Telecomunicações, Usinas Elétricas, Sistemas ininterruptos de energia, alarme, segurança, etc..	Elas devem ser entregues, após seu esgotamento energético, pelos usuários aos estabelecimentos que as comercializam ou à rede de assistência técnica autorizada pelas indústrias. A obrigatoriedade entra em vigor a partir de 22 de julho de 2000.
Níquel-cádmio	Telefones sem fio, radios, etc.	
Baterias de chumbo ácido	Uso industrial e veicular	Já possuem um esquema de coleta e reciclagem funcionando

Uma das possibilidades de processamento de placas de circuito impresso e de baterias inclui etapas de processamento mecânico que podem ser adaptadas de técnicas já existentes de processamento mineral. O processamento mecânico de resíduos é visto, em geral, como um pré-tratamento para o real reaproveitamento dos materiais, e associa diferentes estágios de separação de compostos e componentes do resíduo. Assim, fazem parte deste processo a cominuição, classificação e separação (por diferença de densidade, peso, granulometria, propriedades magnéticas, etc...) dos diferentes componentes do rejeito [13].

A etapa inicial do processamento consta de diferentes etapas de cominuição. Após cada etapa a fração resultante já está, em geral, enriquecida em certos materiais, os quais podem ser separados do fluxo principal. Em placas de circuito impresso, por exemplo, existem compósitos finamente estruturados de plásticos e metais, os quais podem ser separados apenas por cominuição fina. Ferro pode ser retirado por separação magnética, metais não ferrosos são removidos por diferenças de densidade, peso e propriedades magnéticas ("eddy-current"). E após a última etapa de concentração alcançada por cominuição, concentrados e resíduos podem ser limpos por classificação hidráulica e separação por densidade [9, 12, 17, 18].

Os processos hidrometalúrgicos de processamento de sucatas de circuito impresso e baterias representam diversas etapas de processo e são utilizados apenas para a fração contendo metais. Os substratos não metálicos geram resíduos que devem ser, então, tratados termicamente ou dispostos. Uma grande desvantagem dos processos hidrometalúrgicos é a geração de efluentes que deverão ser tratados na sequência do processo.

Os processos pirometalúrgicos geram uma liga metálica, óxidos metálicos na forma de pó retidos do sistema de filtração do ar, bem como uma escória inerte. O problema associado a processos pirometalúrgicos é a geração de dioxinas, formadas pela incineração dos plásticos, além do consumo elevado de energia.

Desta forma, um pré-tratamento da sucata por meios mecânicos, oriundos do processamento mineral, pode ser interessante. Assim poder-se-á obter uma separação prévia dos metais e só então encaminhá-los a processos hidrometalúrgicos, eletrometalúrgicos ou a produção secundária de metais, tornando o reprocessamento destes metais uma tecnologia limpa. Estudos na área de tratamento mecânico destas sucatas ainda são deficitários e dados sobre a separação por diferença de densidade, massa ou granulometria ainda não estão bem definidos.

4.2 Caracterização e Reciclagem de Resíduos contendo Metais

A indústria de materiais gera resíduos contendo metais, os quais devem ser estudados para que seja estabelecida uma possibilidade de reciclagem de metais. Processos siderúrgicos geram resíduos, como escórias, poeiras e carepas. Atualmente a indústria internacional tem desenvolvido esforços contínuos para aumentar mercados existentes e para encontrar novas aplicações para estes resíduos, a fim de limitar a quantidade deste material que necessita ser disposta [19 -28].

As escórias originadas na produção de ferro gusa via alto forno têm sido recicladas, transformando-se em matéria prima como, por exemplo, na fabricação de cimento e de materiais para construção de estradas. Por outro lado, as escórias de aciaria não têm sido efetivamente utilizadas, devido à presença de CaO livre - que empobrece as suas propriedades hidráulicas [29, 30]. Devido às crescentes preocupações quanto à proteção ambiental, as indústrias siderúrgicas têm sido compelidas a repensar a situação das escórias da aciaria para sua utilização como subprodutos [31] e eventual reutilização no próprio sistema de produção de ferro e aço [32]. Um dos grandes problemas das escórias de aciaria é a presença de alto teor de fósforo (de 1 a 3% de P_2O_5), o qual é muito elevado para a sua reutilização em processos de sinterização, alto-forno e processo de pré-desfosforação, mas, por outro lado, é muito baixo para sua utilização como fertilizante fosfatado. Quanto a reutilização ou recirculação das escórias de aciaria, Svyazhin [32] também expõe que algumas escórias são inviáveis para a reutilização devido a seu alto conteúdo de sílica. Assim, antes da reutilização, estas escórias devem ser regeneradas (isto é: passar por um refino e sofrer um ajuste na composição química). Dados específicos para escórias da produção de aço inoxidável não são disponíveis na bibliografia existente [19]. Como estas escórias contêm cromo, estudos de utilização mais nobre, estabelecendo-se maior valor agregado a este subproduto, deverão ser realizados.

Pós de aciaria são gerados em todos os processos de produção de aço em fornos elétricos a arco. São considerados resíduos perigosos e contém zinco, chumbo, cádmio, além de ferro e cromo. A composição do material depende do tipo de aço produzido. Estudos de reciclagem deste material têm sido realizados, tanto para reciclagem dos metais, quanto como matéria prima para outras indústrias de materiais de construção [25-28, 33- 36].

Para a efetiva reciclagem e/ou utilização de resíduos siderúrgicos para a produção de novos materiais, estes devem ser caracterizados. Além disso, os materiais produzidos com a utilização de pós de aciaria ou escórias da produção de aço inoxidável devem ser avaliados em termos de compatibilidade ambiental [37-40]. O processo de produção dos materiais também deve ser avaliado em termos de emissões atmosféricas [41].

Com relação à Indústria do Couro, os maiores centros produtores de couro no mundo encontram-se no México, Brasil, Japão, Coréia do Sul, China, Índia, e Paquistão. A Coréia, o Japão e a Itália importam peles de países com grande produção de carne (USA, Austrália, e outros países europeus), enquanto os países da América do Sul, como Argentina e Brasil, geralmente processam as suas próprias peles. A indústria do couro

está muito presente no Sul do país, especialmente no Rio Grande do Sul, aonde mais de 50% do couro brasileiro é produzido.

Sais de cromo, especialmente sulfatos, são agentes tanantes de largo uso atualmente. As peles que foram produzidas com cromo apresentam boa resistência mecânica e melhores propriedades hidrotérmicas que as peles produzidas com agentes vegetais. Nem toda a quantidade de sais de cromo usados no processo de curtimento reage com as peles. Parte dos sais de cromo permanecem no banho que é enviado a uma planta de tratamento e acaba permanecendo num lodo residual [42]. Este lodo consiste basicamente de óleos e graxas, magnésio, cálcio e hidróxidos de cromo, além de material sólido inerte e restos de peles [43, 44].

No Rio Grande do Sul está estimado que cada pele gera 7,5kg de lodo [45]. Apenas no Rio Grande do Sul são tratadas 14 milhões de peles por ano [46]. Considerando-se a quantidade de cromo presente, este lodo é geralmente considerado como um resíduo perigoso. A legislação americana [47] e a brasileira [1] consideram que cromo e seus compostos conferem periculosidade a resíduos. A legislação alemã [48] lista o lodo como um resíduo perigoso com o código 14402. O lodo também está incluído no European Waste Catalogue [44] com o código 04 01 06.

Estudos para minimizar/tratar a quantidade de resíduos de curtimento são muito importantes [64]. Para evitar altos custos de disposição, o lodo pode ser reprocessado por métodos hidrometalúrgicos para a recuperação de cromo, ou pode ser tratado termicamente para diminuir o volume a ser disposto. Estes processos acabam gerando outros problemas, como a geração de efluentes ou emissões atmosféricas [42, 44, 49].

O processo de solidificação tem sido considerado como solução alternativa para diversos resíduos contendo metais. Neste processo o resíduo é misturado a ligantes para produção de um novo material. Trabalhos atuais relatam o uso de processos de solidificação, estabilização e vitrificação para a reciclagem de diversos resíduos como entulho [50], resíduos radioativos [51], lodo vermelho da produção de alumínio [52] e de zinco [53], cinzas de incineração [54- 56], pó de aciaria [55, 57], cinza de carvão [58, 59], lodo galvanico [60] e escória de cobre [61].

Destes estudos pode-se verificar que tecnologias envolvendo a transformação de resíduos em aglomerados, cerâmicos, vidros e vidrados tem adquirido importância econômica. Diferentes autores [62, 63] têm estudado processos de solidificação de lodos de curtimento com cimento. Tecnologias de produção de materiais cerâmicos e vidrados também têm sido avaliadas [53, 64].

Para a produção de materiais cerâmicos é importante novamente que o lodo seja caracterizado antes da sua utilização para avaliação dos possíveis problemas ambientais envolvidos na produção do novo material. O processo de produção deve ser avaliado em termos de emissões atmosféricas. Além disso o produto gerado deve ser avaliado em termos de imobilidade de cromo.

Já os processos de galvanoplastia geram efluentes tóxicos contendo concentrações de poluentes como cianeto, cromo, ferro, níquel, cobre, entre outros metais pesados, bem acima dos limites de lançamento em corpos receptores. O sistema convencional de tratamento de efluentes separa as águas residuais em quatro grupos: águas contendo cianeto, águas com cromo hexavalente, águas ácidas e águas alcalinas. No tratamento é realizada a redução de Cr^{+6} a Cr^{+3} e a oxidação de cianeto a cianato, com posterior reunião dos efluentes para neutralização e sedimentação. Após a etapa de sedimentação gera-se um lodo de hidróxidos metálicos, cuja composição depende das linhas de galvanoplastia instaladas na empresa. Este lodo é classificado como resíduo perigoso na norma brasileira de classificação de resíduos (NBR 10004), com o código F006. Existe atualmente no país um passivo ambiental importante em termos de lodo

galvânico armazenado nas empresas. Desta forma, processos de reciclagem dos metais contidos no lodo devem ser avaliados.

4.3 Metodologia

A fim de realizar um trabalho que cubra as muitas variáveis que podem influenciar no estudo dos resíduos sólidos, a partir da caracterização dos materiais e posteriormente dos estudos de reuso, reaproveitamento e reciclagem, será necessária a realização de várias etapas, até que se chegue à otimização de processos e procedimentos.

A caracterização de resíduos e sucatas utilizados como matéria-prima secundária e resultantes dos processos de reciclagem deverá incluir também uma avaliação ambiental das técnicas de reciclagem a serem estudadas. Assim, no caso, por exemplo, de utilização de matérias-primas secundárias (resíduos e subprodutos da indústria) como materiais de construção, deve-se avaliar também os efeitos secundários da utilização de novas matérias-primas nos processos já estabelecidos. Esta prática é estimulada por muitos países do ponto de vista da reciclagem, conservação de recursos naturais e economia de energia. A reciclagem de resíduos deve ser prioritária à disposição em aterros, mas a proteção do meio ambiente (qualidade do ar, água e solo) e da saúde humana deve ser o objetivo maior. Isso exige uma avaliação dos efeitos ambientais. Além das características desejáveis de composição dos resíduos, com conseqüências em propriedades de interesse no processo de fabricação e nas propriedades do produto final, a compatibilidade ambiental de produtos e processos que utilizam resíduos como matéria-prima deve ser avaliada.

Para caracterização de resíduos e produtos de reciclagem deverão ser realizados ensaios de lixiviação. Até o presente momento não existem métodos de lixiviação uniformes e aceitáveis para avaliação da solubilização de compostos de materiais de construção com e sem a aplicação de matérias-primas secundárias. Assim, não existe um procedimento ou método de lixiviação uniforme que possa ser aplicado para toda a gama de materiais de construção. Para materiais granulados os testes de lixiviação mais comumente aplicados são os testes de lixiviação em batelada utilizados também para resíduos (no Brasil, NBR 10005 e NBR 10006). O teste mais comumente aceito e aplicado internacionalmente para materiais monolíticos é a norma holandesa NEN 7345/9. Estes testes indicam quando o material produzido com adição de resíduos como matéria-prima é considerado inerte e pode ser utilizado sem riscos ao meio ambiente.

Além da avaliação do produto gerado, o processo de reciclagem também deve ser avaliado. Desta forma, para processos realizados a altas temperaturas, é importante uma avaliação de possíveis contaminações atmosféricas. A alteração na matéria-prima, com a adição de outros compostos presentes no resíduo, pode trazer modificações nas emissões atmosféricas, o que implicaria em outros equipamentos de controle da poluição.

Em linhas gerais, as etapas de trabalho a serem realizadas serão:

- ✓ Caracterização de resíduos em termos de toxicidade através de ensaios de lixiviação.
- ✓ Caracterização de resíduos e sucatas em termos de propriedades físicas e químicas: composição, densidade, granulometria, etc.
- ✓ Estudar as possibilidades de reuso direto de resíduos e sucatas, sem a necessidade de etapas de processamento;
- ✓ Estudar as possibilidades de reaproveitamento de resíduos como matéria prima e/ou insumos para outros processos produtivos;
- ✓ Estudar possibilidades de reciclagem dos resíduos e sucatas através da adaptação de técnicas de processamento mineral: investigação do grau adequado de cominuição para separação do maior número possível de frações; avaliação das possibilidades de separação em função das diferentes propriedades dos materiais (diferenças de

densidade, de granulometria, de propriedades magnéticas, elétricas, etc.), aplicação de outras técnicas de processamento mineral como flotação, jigues, líquidos densos, etc.

- ✓ Verificar a possibilidade de reciclagem de metais a partir de frações separadas por processamento mineral através de técnicas hidrometalúrgicas ou eletrometalúrgicas.
- ✓ Estudar possibilidades de reciclagem dos resíduos e sucatas como matéria-prima para outros processos industriais
- ✓ Caracterizar a compatibilidade ambiental dos produtos gerados com utilização de resíduos como matéria-prima através de diferentes técnicas de lixiviação.
- ✓ Caracterizar a toxicidade de resíduos gerados em processos de reciclagem através de ensaios de lixiviação.
- ✓ Avaliar os processos de produção que utilizam resíduos e os processos de reciclagem de materiais em termos de compatibilidade ambiental, verificando-se possibilidades de geração de poluentes atmosféricos.

5 Atividades

Através do desenvolvimento deste projeto pretende-se estabelecer uma discussão contínua em torno do desenvolvimento de processos de reciclagem de materiais.

Atualmente diferentes processos estão sendo desenvolvidos com a participação de um grupo de estudantes. Este grupo, que é formado por estudantes de graduação em Engenharia Química de diferentes semestres, vem desenvolvendo diferentes atividades visando à recuperação de materiais valiosos presentes em diferentes tipos de resíduos entre os quais:

- Reciclagem de baterias de Íons de Lítio,
- Recuperação de cobre de placas de circuito impresso,
- Recuperação de zinco presente em resíduo industrial,
- Recuperação de Índio de telas de LCD,
- Reciclagem de monitores e televisores.

5.1 Cronograma

As diferentes etapas para o desenvolvimento deste projeto serão realizadas de acordo com o cronograma abaixo.

1. Revisão Bibliográfica
2. Caracterização de resíduos em termos de toxicidade, propriedades físicas e químicas.
3. Cominuição dos diferentes resíduos seguido da caracterização das diferentes frações obtidas.
4. Processamento Mecânico dos diferentes resíduos para obtenção de fração concentrada em metais (separação por diferença de tamanho e densidade das partículas, separação magnética, separação eletrostática de materiais, transporte pneumático e hidráulico em leito fluidizado).
5. Solubilização da fração concentrada em metais obtida a partir do processamento mecânico.
6. Avaliação da eficiência de remoção de contaminantes por precipitação seletiva.
7. Ensaios de eletro-obtenção para recuperação de metais valiosos como cobalto, cobre, metais nobres, etc.
8. Avaliação da recuperação de hidróxido de lítio por precipitação seletiva.

9. Análise e comparação dos resultados: Estão previstas diferentes etapas de discussão dos resultados,
10. Relatório Final

6 Orçamento

Este projeto conta com o financiamento do CNPq e da Fapergs. Os seguintes projetos foram aprovados junto a estes órgãos de fomento:

Edital CNPq Universal R\$ 30.000,00

Edital PqG Fapergs R\$ 30.000,00.

Além de materiais de consumo diversos para atender os objetivos da proposta, está prevista ainda a compra de equipamento e produtos químicos via importação direta:

→Espectrofotômetro UV Visível - UV/VIS

→Mxene (material a ser utilizado nos processos de separação e purificação dos produtos).

7 Bibliografia

1 - Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR 10.004, Resíduos Sólidos - Classificação, 2004.

2 - Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR 10.005, Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, 2004.

3 - Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR 10.006, Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, 2004.

4 - Bernardes, A. M.; Tenório, J A S; Espinosa, D. C. R.. Collection and Recycling of portablebatteries: a worldwide overview compared to the brazilian situation. Journal of Power Sources, n. 124, p. 586-592, 2003.

5 - Bertuol, D ; Veit, H. ; Espinosa, D. C. R.; Bernardes, A. M. ; Tenório, J A S . Resíduos Urbanos Tecnológicos. M & M - Metalurgia e Materiais, v. Abril, 2005.

6 - Skerlos, S. J., Basdere, B. Environmental and economic view on cellular telephone remanufacturing. In: Proceedings Colloquium e-ecological manufacturing. Uni-Edition, Berlim, p. 143-148, 2003

7 - Sheng, P. P., Rebinsky, R. D., Etsell, T. H. Recovery of Silver from Computer Circuit Board Scrap. Journal of Solid Waste Technology & Management, v. 31, ed. 2, p. 78-83, 2005.

8 - Angerer, G.; Bättcher, K.; Bars, P.: Verwertung von Elektronikschrott. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 59, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1993.

- 9 - Zhang, S., Forssberg, E. Intelligent liberation and classification of electronic scrap. Powder Technology, v.105, p. 295-301, 1999.
- 10 - Bernardes, A. M. ; Veit, H. ; Diehl, T ; Salami, A ; Rodrigues, J S ; Tenório, J A S . Utilization of magnetic and electrostatic separation in the recycling of printed circuit board scrap. Waste Management, v. 25, p. 67-74, 2005.
- 11 - Schlögl, M.: recycling von Elektro- und Elektronikschrott, Vogel Fachbuch, Würzburg, 1995.
- 12 - Veit, H. M., Pereira, C. C., Bernardes, A. M.. Using mechanical processing in recycling printed wiring boards. JOM, p. 45- 47. June 2002
- 13 - Veit, H. M., et al. Recovery of copper from printed circuit boards scraps by mechanical processing and electrometallurgy. Journal of Hazardous Materials, B137, p. 1704 – 1709, 2006
- 14 - Bernardes, A. M. ; Espinosa, D. C. R. ; Tenório, J A S . Recycling of batteries: a review of current processes and technologies. Journal of Power Sources, v. 130, n. 2, p. 291-298, 2004.
- 15 - Bernardes, A. M. ; Espinosa, D. C. R.; Tenório, J A S . An Overview on the current processes for the recycling of batteries. Journal of Power Sources, Elsevier, v. 135, p. 311-319, 2004.
- 16 - Bernardes, A. M.; Espinosa, D. C. R. ; Tenório, J A S . Brazilian Policy on Battery Disposal and its Practical Effects on Battery Recycling. Journal of Power Sources, Elsevier, v. 137, p. 134-139, 2004.
- 17 - Felix, N.; Riet, C.: Recycling of Electronic scrap. Proceedings: Precious Metals Conference. 1994, Vancouver, Canada, p. 159-169.
- 18 - Saito, I.: Recovery of Valuable Metals from Printed Wiring Board Wastes. Trans. Mat. Res. Soc. Jpn., Volume 18A, 1994, Elsevier, p. 207-210.
- 19 International Iron and Steel Institute (IISI); United Nations Environment Programme (UNEP): Steel Industry and the Environment. Technical Report 38. 1997.
- 20 Rosa, M.; Mafaldo, I.; Bergmann, C.P.; Moraes, C.A.M; Vilela, A.C.; Bernardes, A.M.: Evaluation of the chromium mobility on stainless steel slag used as raw material for ceramic products. TMS Fall Extraction and Processing Meeting on Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal Processing. Lulea, Suécia, 2002, p. 431-440. VI
21. Makikyro, M.: Slag-based binders in road stabilization. TMS Fall Extraction and Processing Meeting on Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal Processing. Lulea, Suécia, 2002, p. 441-450. VI
22. Levonmaki, M.; Hartikainen, H.: Agriculture use of slag. TMS Fall Extraction and Processing Meeting on Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal Processing. Lulea, Suécia, 2002, p. 451-458. VI
23. Tossavainen, M.: The potential leaching of road-making material and potential influences on the leaching behavior. TMS Fall Extraction and Processing Meeting on Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal Processing. Lulea, Suécia, 2002, p. 459-466. VI

24. Vaittinen, I.: The product status of slag. TMS Fall Extraction and Processing Meeting on Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal Processing. Lulea, Suécia, 2002, p. 467-474. V I.
25. Kuehn, M.; Drissen, P.: Recycling of EAF Dust improving the performance of EAF steelmaking. TMS Fall Extraction and Processing Meeting on Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal Processing. Lulea, Suécia, 2002, p. 203-210. VII
26. Sobrinho, P.J.; Espinosa, D.; Tenório, J.: Study of chromium oxides reduction using a bench scale equipment. TMS Fall Extraction and Processing Meeting on Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal Processing. Lulea, Suécia, 2002, p. 211-220. VII
27. Kanari, N.; Mishra, D.; Gaballah, I.; Arteché, A.; Solozabal, R.; Sandström, A.; Björkamn, B.: New process for the treatment of EAF Dust. TMS Fall Extraction and Processing Meeting on Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal Processing. Lulea, Suécia, 2002, p. 221-230. VII
28. Jandová, J.; Dvorak, P.; Vu, H.: Recovery of magnetite and zinc from steelmaking dust by H₂SO₄ leaching. TMS Fall Extraction and Processing Meeting on Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal Processing. Lulea, Suécia, 2002, p. 251-260. VII
29. Li, H. J. et al.: Thermodynamics analysis of slag recycling using a slag regenerator. ISIJ International, Vol. 35, (9), 1995, p.1079 -1088.
30. Geiseler, J.; Kuhn, M.: Volume stability of steel slags. TMS Fall Extraction and Processing Meeting on Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal Processing. Lulea, Suécia, 2002, p. 421-430. VI
31. Okumura, H.: Recycling of iron and steelmaking slags in Japan. Anais, First Conference Processing Materials for Properties, TMS, Havaí, 1993, p.803 – 806
32. Svyazhin, A.G. e Shakhpasov, E.K.H. Steelmaking slag recirculation within technological process. 21st Century Steel Industry in Russia and CIS Conference, 6-14 de junho, Moscou, Rússia, 1994, p.175- 178
33. Southwick, L.M.: Commercializing EAF Dust Treatment Technologies. In: REWAS 1999. TMS. p. 311-451.
34. Zunkel, A. D.: EAFD Treatment Technologies and Processes. In: REWAS 1999. TMS. p. 1453-1461.
35. Youcai, Z.; Stanforth, R.: Integrated Hydrometallurgical process for production of zinc from electric arc furnace dust in alkaline medium. Journal of hazardous Material, B80, 2000, p. 223-240.
36. Pereira, C.F.; Pinero, M.R.; Vale, J.: Solidification/Stabilization of electric arc furnace dust using coal fly ash. Analysis of the stabilization process. Journal of hazardous Material, B82, 2001, p. 183-195.
37. Wiebush, B.; Ozaki, M.; Watanabe, H.; Seyfried, C.F.: Assessment of leaching tests on construction material made of incinerator ash: investigations in Japan and Germany. Water Science and technology. 38(7), 1998, p. 195-205.
38. Yang, B.S.: Industrial processes and waste characterization. Resources, conservation and recycling. 16(1996), p.93-112.

39. Pereira, d.a. et al: Mechanical Behaviour of portland cement mortars with incorporation of Al-containing salt slags. *Cement and Concrete research* 30(2000), p. 1131-1138.
40. Sloot, H.D.: Developments in Evaluating environmental impact from utilization of bulk inert wastes using laboratory leaching tests and field verification. *Waste Management* 16(1996), p. 65-81.
41. Almeida, M.; Frade, P.; Campante, H.; Marques, J.C.; Correia, A.M.S.: Redução do teor de fluor nos efluentes gasosos da indústria cerâmica. *Cerâmica Industrial*, 6(3), 2001, p.7-13.
42. Cassano, A., Drioli, E. & Molinari, R., Bertolutti, C., Quality improvement of recycled chromium in the tanning operation by membrane processes. *Desalination*, 1996, 108, 193-203.
43. Chang, G.R., LIU, J.C. & Lee, D.J., Co-conditioning and dewatering of chemical sludge and waste activated sludge. *Wat. Res.*, 2001, 3, 786-794.
44. European Commission, DIRECTORATE-GENERAL JRC, JOINT RESEARCH CENTRE, Institute for Prospective Technological Studies (Seville), Technologies for Sustainable Development, European IPPC Bureau, Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), Reference Document on Best Available Techniques for the Tanning of Hides and Skins, Final Draft / March 2001, <http://eippcb.jrc.es>
45. Castilhos, D.D., Alterações químicas e biológicas devidas à adição de resíduos de curtume e de cromo hexavalente no solo. Dissertação de Mestrado. UFRGS. 1998.
46. Ferreira, S.A., Efeitos da adição de resíduos de curtume e carbonífero nas plantas e no solo. Dissertação de Me. UFRGS. 1998.
47. Environmental Protection Agency. USA. 40CFR. Ch I. Part 261 – Identification and Listing of Hazardous Waste. App VIII. 1998.
48. Bundesrat: Zweite allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA-Abfall). GMDI 170, 1990, Germany.
49. Hikmet, T, Comparison of efficiencies and costs of chromium recovery methods. *Journal of the American Leather Chemists Association*, 1994, 89, 11, 339-351.
50. Singh, D., Wagh, A. S., Tlustochowicz, M. & Jeong, S.Y., Phosphate ceramic for macroencapsulation and stabilisation of low-level debris wastes. *Waste Management.*, 1998, 18, 135-143.
51. Lin, J. S., Shen, P., Fabrication of $\text{CaO-ZrO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glasses and glass-ceramics. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1996, 204, 135-140.
52. Yalçın, N. & Sevinç, V., Utilisation of bauxite waste in ceramic glazes. *Ceramics International*, 2000, 26, 485-493.
53. Pelino, M., Recycling of zinc-hydrometallurgy wastes in glass and glass ceramic materials. *Waste Management*, 2000, 20, 561-568.
54. Kim, I.T., Kim, J.H., Lee, K.S., Seo, Y.C. & Koo, J.K., Leaching characteristics of glassy waste forms containing two different incineration ashes. *Waste Management*, 2000, 20, 409-416.

55. Barbieri, L.; Bonamartini, A. C., Lancellotti, I., Alkaline and alkaline-earth silicate glasses and glas-ceramics from municipal and industrial wastes. *Journal of the European Ceramic Society*, 2000, 20, 2477-2483.
56. Romero, M., Rawlings, R.D. & Rincón, J.Ma., Development of a new glass-ceramic by means of controlled vitrification and crystallisation of inorganic wastes from urban incineration. *Journal of the European ceramic Society*, 1999, 19, 2049-2058.
57. Piscicella, P., Crisucci, S., Karamonov, A., Pelino, M., Chemical durability of Glasses obtained by vitrification of industrial wastes. *Waste Management*, 2001, 21, 1-9.
58. Cimdins, R., Rozenstrauha, A. Berzina, L. Bossert, J. & Bücken, M., Glassceramics obtained from industrial waste. *Resources Conservation & Recycling*, 2000, 29, 285-290.
59. Kurama, H.; Kara, A.: Utilization of coal combustion fly ash in traditional ceramic applications. *TMS Fall Extraction and Processing Meeting on Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal Processing*. Lulea, Suécia, 2002, p. 341-350. VII
60. Gheorghe, M.; Voinitchi, D.; Teodorescu, R.: Solidification/Stabilization of some electroplating wastes into hydraulic matrix and ceramic matrix. *TMS Fall Extraction and Processing Meeting on Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal Processing*. Lulea, Suécia, 2002, p. 331-340. VII
61. Herman, D., Glass and glass-ceramic binder obtained from waste material for binding alundum abrasive grains into grinding wheels. *Ceramics International*, 1998, 24, 515-520.
62. Dweck, J., Buchler, P.M., Coelho, A.C.V., Cartledge, F.K., Solidification/stabilisation of a tannery waste with blended cement and wyoming bentonite. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2000, 35, 715-740.
63. Filibeli, A., Buyukkamaci, N., Senol, H., Solidification of tannery wastes. *Resources, Conservation and Recycling*, 2000, 29, 251-261.
64. Fernández-Sempere, J., Barrueso-Martinez, M.L., Font-Montesinos, R., Sabater-Lillo, M.C., Characterisation of tannery wastes – comparison of three leachability tests. *Journal of Hazardous Materials*, 1997, 54, 31-45.