

SÉRIE ESTUDOS E DOCUMENTOS

Tópicos sobre a reciclagem de metais e sustentabilidade

PROVISÓRIA

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA

Dilma Vana Rousseff

Presidente

Michel Miguel Elias Temer Lulia

Vice-Presidente

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

Clelio Campolina Diniz

Ministro de Estado da Ciência, Tecnologia e Inovação

Alvaro Toubes Prata

Secretário-Executivo

Kayo Julio Cesar Pereira

Coordenação-Geral das Unidades de Pesquisa

CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL

Fernando Antonio Freitas Lins

Diretor

Arnaldo Alcover Neto

Coordenador de Análises Minerais

Claudio Luiz Schneider

Coordenador de Processos Minerais

Cosme Antônio de Moraes Regly

Coordenador de Administração

Francisco Hilson Hollanda Vidal

Coordenador de Apoio Tecnológico às Micro e Pequenas Empresas

Jackson de Figueiredo Neto

Coordenador de Planejamento, Gestão e Inovação

Ronaldo Luiz Corrêa dos Santos

Coordenador de Processos Metalúrgicos e Ambientais

SÉRIE ESTUDOS E DOCUMENTOS

ISSN 0103-6319

ISBN 978-85-8261-014-5

SED - 83

Tópicos sobre a Reciclagem de Metais e Sustentabilidade

Ronaldo Luiz Corrêa dos Santos

Eng. Químico , MSc, Eng. Metalúrgica e Materiais, Pesquisador do CETEM/MCTI.

CETEM/MCTI

2014

SÉRIE ESTUDOS E DOCUMENTOS

Carlos César Peiter

Editor

Zuleica Castilhos

Subeditora

CONSELHO EDITORIAL

Francisco R. C. Fernandes (CETEM), Gilson Ezequiel Ferreira (CETEM), Alfredo Ruy Barbosa (consultor), Gilberto Dias Calaes (ConDet), José Mário Coelho (CPRM), Rupen Adamian (UFRJ).

A Série Estudos e Documentos publica trabalhos na área minerometalúrgica. Tem como objetivo principal difundir os resultados das investigações técnico-científicas decorrentes dos projetos desenvolvidos no CETEM.

O conteúdo desse trabalho é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es).

Valéria Cristina de Souza

Coordenação Editorial

Fatima Engel Caldeira

Editoração Eletrônica

Andrezza Milheiro

Revisão

Santos, Ronaldo Luiz Corrêa

Tópicos sobre a reciclagem de metais e sustentabilidade / Ronaldo Luiz C. dos Santos. — Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014.

51p. (Série Estudos e Documentos, 83)

1. Reciclagem. 2. Metais não-ferrosos. 3. Sustentabilidade. I. Centro de Tecnologia Mineral. II. Santos, Ronaldo Luiz Corrêa. III. Título. IV. Série.

CDD – 628.4

SUMÁRIO

RESUMO _____	7
ABSTRACT _____	8
1 INTRODUÇÃO _____	9
2 INTERRELAÇÕES ENTRE PRODUÇÃO, MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL _____	12
3 FATORES INCENTIVADORES DAS PRÁTICAS DE RECICLAGEM NAS INDÚSTRIAS _____	16
3.1 Valorização das Práticas de Produção Limpa ____	17
3.2 Métodos de Produção Mais Limpa (P+L) _____	18
3.3 Método ZERI (Zeri Emission Reserch Initiative) _	20
4 TÓPICOS SOBRE OS PROCESSOS DE RECICLAGEM DE METAIS (ALUMÍNIO, COBRE, CHUMBO E ZINCO) ____	22
4.1 Alumínio _____	22
4.2 Cobre _____	24
4.3 Chumbo _____	26
4.4 Zinco _____	29
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS _____	31
5.1 Quanto aos Aspectos de Reciclagem de Resíduos Industriais e o Desenvolvimento Sustentável _____	31
5.2 Quanto as Tecnologias de Reciclagem Disponíveis e as Implicações de Seu Uso _____	33
5.3 Quanto ao Cenário Atual de Desafios para o Aumento da Reciclagem de Metais a Nível Mundial ____	39
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____	44

RESUMO

É sabido que é possível reduzir a geração de resíduos, a partir de algumas ações, quais sejam: otimização de processos e operações unitárias ou, ainda, modificando os projetos originais, que não levam em conta os preceitos de sustentabilidade. Por outro lado, em casos extremos é possível eliminar a geração desses resíduos, por meio da prevenção, bem como pela modificação de etapas dos processos, mas também, adotando tecnologias limpas, substituindo matérias-primas ou insumos, além do que reciclando os resíduos que foram gerados.

Esse texto relata, de uma forma resumida, alguns dos desdobramentos e recomendações emanadas dos eventos internacionais mais significativos, a partir do Clube de Roma, que alavancaram as questões de sustentabilidade e de reciclagem no mundo moderno. Aborda, ainda, aspectos relacionados ao estado da arte das tecnologias de reciclagem de alumínio, cobre, chumbo e zinco, tendo em vista a sua relevância para a reciclagem de alguns dos metais usados mais intensivamente no cotidiano.

Aponta, ao encerrar, com base em estudos recentes realizados por especialistas no tema, alguns dos desafios a serem vencidos, para que a atividade de reciclagem seja ampliada de modo a se inserir mais incisivamente no contexto da sustentabilidade, tal como preconizou o Relatório Brundtland, em 1987, o qual foi referendado pelas ECO 92 e Rio +20.

Palavras-chave

Reciclagem, metais não ferrosos, sustentabilidade

ABSTRACT

It is known that it is possible to reduce the generation of waste carrying on some actions, such as: optimization of processes and unit operations or even modifying the original designs, which do not take into account the precepts of sustainability. Moreover, in extreme cases it is possible to eliminate generation of wastes by preventing as well as by modifying the process steps, but also by adopting clean technologies and substituting raw materials or inputs, in addition to recycling waste generated.

This paper reports, in summary form, some of the most significant events since the Club of Rome meeting, which spined out the issues of sustainability and recycling in the modern world.

Also alludes related aspects concerning state of art of recycling technologies of aluminium, copper, lead and zinc, with a view to their relevance in the context of their recycling techniques.

Also points out, based on recent studies conducted by experts some of the challenges to be overcome, aiming the recycling activity to be increased in order to enter more deeply in the context of sustainability, as advocated by the Brundtland Report in 1987 , which was endorsed by the ECO 92 and Rio + 20.

Keywords

Recycle, non ferrous metals, sustainability

1 | INTRODUÇÃO

É reconhecido que os metais estão entre os poucos materiais que não perdem suas características e propriedades intrínsecas quando reciclados. A princípio os metais podem ser reciclados por ciclos incontáveis. O fato é que a reciclagem de metais tem sido uma atividade praticada mundialmente, desde tempos remotos na antiguidade (LUND,1993).

Entretanto, essa atividade ainda enfrenta desafios para se inserir fortemente na economia global, embora haja continentes onde essas atividades têm destaque, a exemplo do Europeu e da Ásia (RECK, GRAEDEL, 2012).

É também fato demonstrado por vários estudos que ainda há muito a ser praticado em escala global para que a reciclagem de metais seja inserida no bojo dos negócios sustentáveis (UNEP, 2002 e 2009).

Nos tempos modernos a grande alavancagem no sentido de ampliar as atividades industriais de reciclagem, aconteceu a partir dos anos 1970, por meio da publicação do livro “Os limites do crescimento” pelo Instituto de Tecnologia de Massachussets (MIT), com o apoio do Clube de Roma. Na ocasião, foi constatado cientificamente que havia uma acelerada diminuição dos estoques dos recursos naturais, bem como o aumento significativo e, em muitos casos, desordenados, da produção industrial acarretando, conseqüentemente, em aumento da poluição (ORTEGA, 2004).

Há cerca de 15 anos a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (MATOS, 2002) estabeleceu que a redução de resíduos consiste na “diminuição tanto quanto possível de resíduos gerados, tratados, estocados ou dispostos. Inclui qualquer atividade de redução na fonte ou na reciclagem, nas

quais o resíduo é submetido a operações que reduzam seu volume total ou sua toxicidade”.

Essas ações são, pois, de responsabilidade direta das indústrias, as quais são apontadas como as maiores responsáveis pela deterioração das águas, do ar e do solo. Atualmente não há divergências sobre a necessidade de rever a influência do homem sobre o meio ambiente. Entretanto, os problemas ambientais decorrentes das atividades antrópicas somente começaram a ser discutidos seriamente, a nível mundial, nos anos 1970.

Essas discussões provocaram vários encontros entre as nações, durante os quais se debateu sobre a gravidade do problema e a busca por soluções. Nesta linha, foram eventos importantes, entre outros, a conferência de Estocolmo em 1972, na qual Maurice Strong introduziu o conceito de eco-desenvolvimento, bem como foi criada a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (CMMAD) pela Assembléia Geral das Nações Unidas em 1983. Destacam-se, ainda, a divulgação do relatório de Brundtland em 1987, que trouxe os conceitos de desenvolvimento sustentável e, ainda, a Conferência das Nações Unidas para o meio ambiente (ECO 92) realizada no Brasil (BARBIERI, 2003).

Foi, portanto, lentamente, ao longo das 4 décadas mais recente, que ocorreu a percepção, agora praticamente generalizada pela sociedade, de que os recursos naturais da Terra não são infinitamente renováveis e que a alternativa saudável para o planeta reside no seu desenvolvimento auto sustentado. Esse desenvolvimento pode ser definido, dentre muitas outras definições como: aquele que atende às necessidades do presente, sem comprometer as gerações futuras de atenderem às próprias necessidades.

2 | INTERRELAÇÕES ENTRE PRODUÇÃO, MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

A conferência realizada em Estocolmo no ano de 1972 representou um avanço na negociação entre os países, constituindo um marco para a percepção dos problemas relacionados à produção industrial, ao desenvolvimento das nações e ao meio ambiente. Esse fato ocorreu apesar de haver sérias divergências entre os países não desenvolvidos e os desenvolvidos. Os países desenvolvidos estavam pressionados pelos problemas decorrentes das atividades industriais em seu território, sendo fortemente influenciados pelas pressões da sociedade no sentido de mitigar os efeitos da poluição industrial.

Por outro lado os países não desenvolvidos buscavam diminuir a sua pobreza. Esses viam a possibilidade de se desenvolverem nos moldes que desconheciam, até então, mostrando, porém, preocupação quanto às sanções e obrigações que lhes seriam impostas face à defasagem do avanço tecnológico existente entre os dois blocos (BARBIERI, 2003).

Em 1983 foi criada pela Assembléia Geral da ONU, a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD), que foi presidida pela Primeira Ministra da Noruega Gro Harlem Brundtland (BELLO, 1998). Do relatório “Nosso Futuro Comum” ou “Relatório de Brundtland” em 1987, emergiu um dos grandes paradigmas contemporâneos, o Desenvolvimento Sustentável.

Do Relatório Brundlandt, segundo BOFF (2004) projetou-se “o ideal do desenvolvimento sustentado”, o qual foi definido como: “um processo de mudança no qual a exploração de recursos, a orientação dos investimentos, os rumos do desenvolvimento tecnológico e a mudança institucional estão de acordo com as necessidades atuais e futuras”.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004) “Meio Ambiente é a circunvizinhança em que uma organização opera, incluindo-se ar, água, solo, recursos naturais, flora, fauna, seres humanos e suas interrelações”.

GROTT (2003) preconiza que meio ambiente tem um conceito “vasto e amplo de interação dos elementos naturais, artificiais e culturais que deve proporcionar condições saudáveis de vida em todas as suas formas”.

Se pode perceber, então, que existem várias definições sobre meio ambiente. A Política Nacional do Meio Ambiente (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 1981) define pela Lei 6.938/82 o meio ambiente como: “o conjunto de condições, leis, influências e intervenções de ordem física, química e biológica que permite, abriga e rege a vida em todas as suas formas”.

Essa mesma Lei que “Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação e dá outras providências” classifica em seu anexo VIII (acrescentado pela Lei 10.165 de 27.12.2000. DOU 28.12.2000) que “a atividade de produção de produtos acabados, metálicos e/ou aço como sendo potencialmente poluidora”.

Durante a ECO-92 e a definição da Agenda 21, foi dado destaque à necessidade urgente de se implementar um sistema adequado de gestão ambiental para os resíduos sólidos. Nesse contexto, há autores que preconizam que a indústria deve tentar fechar seu ciclo produtivo de tal forma que minimize a saída de resíduos e a entrada de matéria-prima não renovável. (GÜNTHER, 2000; UNEP, 2003; LUND, 1973; UNEP, 2002).

Embora a redução da geração de resíduos pelas indústrias seja sempre uma ação necessária, ela apresenta limitações, uma vez que existem impurezas nas matérias-primas, implicando na necessidade de se fazer investimentos novos, assim como de avaliar os diferentes patamares de desenvolvimento tecnológico e de escala de produção (LUKEM, NAVRATIL, 2004; WORREL, REUTER, 2014).

Por outro lado, a reciclagem de resíduos pode gerar inúmeros benefícios, sendo alguns deles citados a seguir:

- i) redução no consumo de recursos naturais não-renováveis, quando substituídos por resíduos que são reciclados (UNEP, 2003; VAN DER DINK ET AL. 1995, RECK, GRAEDEL, 2012, LUKEN, NAAVRATIL, 2004; WORREL, REUTER, 2014);
- ii) redução de áreas necessárias para aterro, pela minimização da geração do volume de resíduos, a partir das atividades de reciclagem;
- iii) redução do consumo de energia durante o processo de produção, destacando, como caso particular, a indústria do cimento que usa resíduos com poder calorífico adequado para a obtenção de sua matéria-prima (co-

incineração / co-processamento) ou, ainda, utiliza a escória de alto forno, para a produção de cimento (UNEP, 2003; VAN DER DINK ET AL. 1995, RECK, GRAEDEL, 2012, LUKEN, xxxx, 2004;WORREL, REUTER, 2014) e

- iv) redução da poluição; tal como na indústria cimenteira, que reduz a emissão de gás carbônico, utilizando resíduos e escória de alto forno para a produção de um tipo de cimento Portland (UNEP, 2003; VAN DER DINK ET AL. 1995, RECK, GRAEDEL, 2012, LUKEN, NAVRATIL, 2004;WORREL, REUTER, 2014).

3 | FATORES INCENTIVADORES DAS PRÁTICAS DE RECICLAGEM NAS INDÚSTRIAS

Nos países desenvolvidos, a constante pressão dos consumidores fez com que as empresas fossem compelidas a implementar programas de reciclagem como uma solução para a rotatividade de matérias-primas. Dessa forma, diminuiria o risco do esgotamento acelerado dos recursos não-renováveis, resultando, ainda em economia de energia. A reciclagem proporciona cerca de 74% a menos de poluição do ar, cerca de 35% a menos de poluição da água e um ganho de energia da ordem de 64% (WANG et al., 2009; LUKEN, NAVRATIL, 2004; WORREL, REUTER, 2014).

Uma gestão coerente com a redução de resíduos possui uma estrutura de ação na reciclagem, sendo indispensável que não ocorra a transferência do poluente de um meio para o outro e que haja um estrito atendimento às legislações ambientais (UNEP, 2002 e 2009, SIBLEY et al.1995).

A matéria-prima, portanto, pode ser reaproveitada tanto para um tipo de produto quanto para outro diferente. Alguns autores classificam essas possibilidades como; reciclagem primária (reciclagem interna) e reciclagem secundária, respectivamente.

A reciclagem resulta em economia de matéria-prima. Essa prática exige, geralmente, o uso de volumes de insumos menores, quando se compara com o processamento original. Assim é reduzida a necessidade de espaços destinados à manutenção dos resíduos industriais, da mesma forma que reduziu os custos de coleta e os volumes de disposição em aterros industriais. Sempre que houver uma baixa contaminação do material na reciclagem primária serão

facilitados os procedimentos acima mencionados. Da mesma forma serão obtidos produtos com melhor qualidade. A reciclagem secundária proporciona a redução de impactos ambientais, sanitários e sociais, gerados tanto pelo lançamento indiscriminado de resíduos sólidos no ambiente, quanto pela implantação e operação de instalações destinadas ao seu tratamento e disposição final. O aumento do consumo de matérias-primas virgens, muitas delas não renováveis, tende a se tornar cada vez mais difícil e cara. A reciclagem proporciona, portanto, redução de custos de fabricação de alguns produtos, uma vez que o processamento de materiais recicláveis é geralmente menos dispendioso, sobretudo em termos energéticos (LUKEN, NAVRATIL, 2004; UNEP, 2002, 2009, 2002).

Os mesmos autores citam que o tratamento de resíduos visa, de um modo geral, uma alteração nas suas características, neutralizando seus efeitos nocivos. O tratamento poderá conduzir a uma valorização (abordagem de cunho econômico) dirigida para extrair valores materiais ou energéticos, os quais contribuem para diminuir os custos de tratamento e, em muitos casos, podem gerar receitas superiores a estes custos (WORREL, REUTER, 2014; LUKEN, NAVRATIL, 2004; UNEP, 2002 e 2009).

3.1 | Valorização das Práticas de Produção Limpa

Posteriormente ao relatório de Brundlandt, foram propostos novos métodos orientados para o gerenciamento do processo produtivo, tendo como objetivo o atendimento aos preceitos do desenvolvimento sustentável. A abordagem de um tratamento

fim de linha (*end of pipe*), procura diminuir os efeitos da poluição por meio de tratamentos que minimizam impactos ao ambiente externo à fábrica.

A partir desse relatório, então, essa abordagem é substituída por outras de caráter preventivo, de modo a reduzir a quantidade e a toxicidade dos resíduos gerados. Ao longo da cadeia de produção. Dois desses métodos mais conhecidos são denominados como a Produção Mais Limpa (P+L), e o Método ZERI.

3.2 | Métodos de Produção Mais Limpa (P+L)

A Produção Mais Limpa (P+L) é uma metodologia proposta pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) e pela Organização das Nações Unidas pelo Desenvolvimento Industrial (UNIDO) para, segundo SALAZAR FILHO (2002), “aumentar a eco-eficiência das organizações, exercer o conceito do desenvolvimento sustentável,...” . Segundo esse Programa a eco-eficiência das organizações se apóia em uma tríade de premissas: rentabilidade econômica, atuação social justa e responsabilidade ambiental. O cumprimento destas premissas promove as condições necessárias para que estas organizações perdurem, em consonância com os requisitos do mercado e da sociedade em geral.

A UNEP (2002) conceitua a Produção Mais Limpa (P+L) como sendo “a aplicação continuada de uma estratégia preventiva integrada aplicada a processos, produtos e serviços com vistas a reduzir os riscos para a saúde humana e ambiente e a conseguir benefícios econômicos para as empresas”.

Há referências que consideram que a P+L tem um caráter pró-ativo, estimulando atitudes voluntárias, por parte das indústrias, para melhorar seus processos produtivos independentemente da necessidade de haja uma legislação que as obrigue adotar essas condições. Com a adoção dessas práticas diminui, portanto, a necessidade de se adotar as tecnologias de fim de linha. (end of pipe). Projeta-se, dessa forma, como a maneira mais eficaz, a longo prazo, para projetar e operar processos industriais e desenvolver e produzir produtos e serviços (UNEP, 2002).

Sempre que a metodologia (P+L) for aplicada aos processos de produção estará sendo privilegiada a conservação de materiais, água e energia, assim como a redução da toxicidade e da quantidade das emissões na fonte. Da mesma forma estará sendo privilegiada a diminuição de geração de materiais tóxicos e perigosos.

Com relação aos produtos, a P+L está, obrigatoriamente, focada no ciclo de vida dos materiais, desde a etapa de extração da matéria-prima até a disposição final, de modo a reduzir os impactos ambientais, bem como os riscos à saúde e à segurança.

Em se tratando da execução de serviços, a P+L incorpora interesses ambientais, que se expressam na elaboração de projetos, incluindo aspectos logísticos (UNEP, 2002).

Oliveira Filho em acordo com esse estudo da UNEP considera, ainda, que as tecnologias de produção mais limpa contemplam mudanças nos produtos e nos seus processos de produção, adotando medidas preventivas, de modo a reduzir/eliminar a geração de rejeitos. Essa é uma exigência decorrente da

necessidade de ampliar a sustentabilidade dos ecossistemas através de novas práticas produtivas e mercadológicas, que contemplem o que se convencionou denominar de Política dos 3 R, (OLIVEIRA FILHO, 2001; UNEP 2002).

Esse mesmo estudo propõe que “a adoção de produção mais Limpa (P+L) requer, por parte das empresas a constante realização de melhorias contínuas. Estas melhorias facilitam a geração de inovações. As inovações por sua vez, facilitam o alcance da competitividade”.

3.3 | Método ZERI (Zeri Emission Reserch Initiative)

O método ZERI, propõe que seja feito de modo sistêmico e regionalizado o aproveitamento total da matéria-prima, levando em conta que os resíduos são considerados insumos que irão gerar outros produtos em um dado conglomerado de empresas.

O Zero Emissions Research Initiative (ZERI), por outro lado, foi lançado pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 1994. Seu principal idealizador foi Gunter Pauli, que recebeu a incumbência de criar um plano de ação para implementar a Agenda 21 da ONU, voltada para envolver o setor empresarial no processo do desenvolvimento sustentável. Gunter esquematizou as linhas mestras do ZERI para se desenvolver como um programa de longo prazo, visando o estreitamento da parceria com o setor privado, num esforço coletivo de eco-reestruturação, envolvendo a academia, o governo e a sociedade.

Capra, por outro lado, entende que o objetivo do método ZERI é encontrar modos de minimizar a necessidade de entradas (inputs) no processo principal e alcançar um nível máximo de

saídas (outputs) ao se buscar um aproveitamento total dos insumos e matérias-primas (CAPRA, 2002).

Como fator econômico o ZERI propõe a utilização integral dos recursos que servem de matéria-prima e fonte de energia, ultrapassando o pressuposto de que os recursos naturais são limitados. O ZERI traz, intrinsecamente, uma abordagem sistêmica para dentro do conjunto das atividades industriais.

Em resumo:

- i) pode-se entender que de uma forma sistêmica, a P+L procura, respectivamente, reduzir, reutilizar e reciclar os resíduos, internamente às empresas, reduzindo os efeitos dos antigos sistemas de produção. Baseia-se no estudo de entradas e saídas de processos visando a diminuição gradual, tanto no que concerne à toxicidade quanto ao volume dos resíduos gerados.
- ii) por outro lado, embora da mesma forma sistêmica, o Método ZERI tem como objetivo final a produtividade total, com base no estudo das saídas e entradas dos processos, buscando que os resíduos passem a ser matérias-primas para outras empresas, agregando valor, formando, assim, conglomerados empresariais.

4 | TÓPICOS SOBRE OS PROCESSOS DE RECICLAGEM DE METAIS (ALUMÍNIO, COBRE, CHUMBO E ZINCO)

4.1 | Alumínio

O alumínio é usado em aplicações industriais tanto na forma pura, como sob a forma de ligas, associadas a outros metais. As ligas de alumínio são utilizadas em larga escala na indústria aeroespacial, automotiva, ferroviária, de alimentos e bebidas, dentre outros setores, pois que oferecem propriedades consideradas vantajosas quanto ao peso, resistência à corrosão e moldabilidade.

Entretanto, em virtude das diferentes composições das suas ligas pode se prever que a fundição direta da mistura desses vários materiais, poderá resultar em novos materiais com propriedades bastante distintas daquelas consideradas como as das ligas padrão. Esse fato faz com que a pré-seleção dos materiais seja uma etapa essencial na reciclagem de alumínio, para se evitar a obtenção de produtos indesejados, bem como a agregação de custos adicionais de refino para sua readequação ao uso em um novo ciclo.

Está consolidado a nível mundial, há mais de 30 anos, que os resíduos metálicos de alumínio e suas ligas são reciclados, em geral, usando forno de revérbero. Os fornos têm essa denominação porque irradiam calor de suas paredes e tetos para o leito de metal, de modo que ocorra a fusão do metal. A capacidade de processamento das unidades de reciclagem pode variar bastante, porém, segundo WELLS et al (1995) é mais comum encontrar instalações com capacidade de

processamento de alumínio metálico e suas ligas, que varia entre 5 – 6 t/hora de resíduos. Deve-se atentar, ainda, que aos vários resíduos de alumínio que forem reciclados, serão adicionados, obrigatoriamente, compostos químicos escorificantes. A adição de escorificantes faz com que o alumínio possa ser separado mais facilmente do leito fundido, o qual se constitui numa mistura de compostos que se distribuem em diferentes espessuras, em acordo com as densidades de cada uma delas. Em geral, esses fornos são capazes de gerar uma camada que retém cerca de 80% de alumínio metálico, que pode ser separado para uma etapa posterior de refino. Esse material se constitui no chamado drosse de alumínio, que é continuamente formado ao longo do processo sendo composto de uma mistura de alumínio metálico e seu óxido (LUND, 1993; WORREL, REUTER, 2014; VAN DER DONK et. al,1995).

Por outro lado VAN DER DONK et al. (1995) a possibilidade de uso de varias técnicas capazes de remover continuamente ferro do banho de alumínio fundido. Essas técnicas poderão compreender desde a solidificação parcial de alumínio, a partir de um banho contendo alumínio impuro, mas também poderá consistir no uso do processo eletrolítico, utilizando células de camadas.

O processo eletrolítico se baseia na formação de uma camada superior de alumínio puro, que constitui o cátodo da célula, a qual está acima de uma camada intermediária formada por uma mistura de halogenetos de alumínio-bário, que é o eletrólito da célula, enquanto que a camada inferior é o anodo da célula, constituído de alumínio impuro (LUND, 1993; WORREL, REUTER, 2014; VAN DER DONK et. al,1995).

Entretanto, uma das características mais restritivas desse processo se reflete no consumo relativamente alto de energia, o qual segundo MOORE (1990) pode atingir entre 17 – 18 kWh/kg de metal, enquanto que no refino convencional de alumínio pelo processo Hall-Herault, esse consumo pode alcançar entre 13 – 14 kWh/kg de metal (LUND, 1973, WORREL, REUTER, 2014).

Deve-se salientar que, adicionalmente aos efeitos deletérios da presença dos elementos de liga, a reciclagem secundária de alumínio pode trazer outras impurezas que podem ser constituídas de camadas de tintas, lacas e plástico. Uma das unidades de reciclagem de alumínio da ALCAN, entretanto, superou, de há muito esse problema, introduzindo uma tecnologia que priorizou o processamento do alumínio em um reator de leito fluidizado à temperatura de 500°C, por meio da qual se pode reduzir, praticamente, à totalidade a proporção de material orgânico que entra nas etapas seguintes da reciclagem de alumínio (TREMBLAY *et al.*, 1995). Por outro lado uma outra unidade de reciclagem da ALCAN usa uma tecnologia mais simples, que consiste em oxidar a matéria orgânica, em um forno rotativo, utilizando um fluxo co-corrente de ar, à temperatura da ordem de 400°C (NEWBERRY *et al.*, 1995; LUND, 1973, WORREL, REUTER, 2014).

4.2 | Cobre

É sabido que o cobre é consumido na sua forma pura, mas também sob a forma de ligas, estando mais comumente associado a estanho, alumínio e zinco. De uma maneira geral

reciclar o metal na sua forma pura é muito simples, para tal que seja refundido e remoldado, retornando, assim, ao processo de eletrorefino de cobre.

É dessa forma que cobre ligado ou misturado com outros metais poderá ser fundido em unidades primárias ou secundárias de fundição, até se transformar em anodos (GOCKMANN, 1992) (LUND, 1973, WORREL, REUTER, 2014).

Os resíduos de cobre de baixo teor são igualmente tratados conforme acima, sendo submetidos a processos de fusão em forno aquecido, a óleo ou gás, para, então, produzir o chamado cobre blister, que, geralmente, contém impurezas metálicas como: chumbo e zinco, dentre outros. Os elementos metálicos e/ou compostos voláteis, à temperatura de fundição do cobre, são parcialmente eliminados, durante a fusão, tais como: zinco e óxido de chumbo, ainda que, em presença de condições redutoras que são impostas à carga de fusão. Discussões mais detalhadas acerca desses processos de fusão e eletrólise de cobre, podem ser encontrados em HANUSCH (1995) e em PRADO *et al.*(1995) (LUND, 1973, WORREL, REUTER, 2014).

Um outro processo dedicado à fundição de resíduos de cobre de baixo teor foi implantado pela Boliden que o denominou processo Kald. Nesse processo podem ser usados resíduos metálicos contendo em torno de 40% de cobre, 10% de zinco e 18% de ferro, os quais são alimentados a um reator que opera com calhas com diferentes inclinações. A reação exige, ainda, a adição de coque e de ar enriquecido com oxigênio, por meio de uma lança que está em contato direto com a massa fundida. O calor de oxidação do ferro, do zinco e do chumbo faz com que os óxidos metálicos volatilizem (formando óxidos de

chumbo e zinco), gerando, entretanto, cobre impuro e uma escória rica em ferro, que retém, quantidades de cobre e zinco inferiores que são, geralmente, inferiores a 0,5% (HENDLUND, 1995; LUND, 1973, WORREL, REUTER, 2014).

Uma outra fonte secundária de cobre e outros metais, passível de reciclagem, consiste nas sucatas de computadores e de material eletrônico de diversos equipamentos. HOFFMAN (1992), aponta que os resíduos eletrônicos contêm, em média, de 20 a 40% de metais (ex: cobre, alumínio, níquel, estanho, chumbo) sem contabilizar aqueles metais considerados nobres, tais como: ouro, prata e paládio, completando, o balanço desse inventário materiais plásticos e os óxidos refratários. A presença dos metais preciosos tem estimulado, decisivamente, a recuperação de resíduos dessa natureza, já que, via de regra, estão presentes em proporções que giram no entorno de 700-800 g/t de ouro, 1000-1500g/t de prata e cerca de 20-60 g/t de paládio.

As melhores técnicas de recuperação desses resíduos passam, obrigatoriamente, por uma primeira etapa de processamento pirometalúrgico, que remete à produção de cobre impuro, o qual deverá ser refinado ao final do processo, preferencialmente, por meio de um processo eletrolítico (LUND, 1973, WORREL, REUTER, 2014).

4.3 | Chumbo

O uso de chumbo metálico e suas ligas predomina, em especial, na produção das baterias automotivas. Os dados históricos apontam que a reciclagem de chumbo, a nível

mundial, atinge cerca de 95% das baterias usadas nos veículos automotivos.

As baterias são constituídas de uma caixa de polipropileno que abriga os contatos de chumbo, bem como os eletrodos que são, tipicamente, telas metálicas. Ainda existem no interior dessa caixa espaçadores de plástico entre os eletrodos, uma pasta formada de óxido de chumbo e sulfato de chumbo e, de ácido sulfúrico (ROYER *et al.*, 1992) Uma bateria típica pesa cerca de 10 kg, contendo no entorno de 7 kg de chumbo e cerca de 3 kg de ácido sulfúrico. Numa unidade típica de reciclagem de chumbo de baterias automotivas, a etapa inicial consistirá na fragmentação das baterias, resultando dessa operação três fluxos principais resíduos, a saber: caixas de materiais que carregam chumbo (numa proporção mássica aproximada de 60% de chumbo); cerca de 18% de óxido de chumbo; em torno de 12% de sulfato de chumbo; materiais plásticos e, ainda, ácido sulfúrico.

Após a separação dos fluxos de diferentes materiais, os resíduos que são carreadores de chumbo serão fundidos, de maneira a gerar um bullion de chumbo, resultando, ainda, uma fase líquida sobrenadante (escória), que contém óxido de chumbo. Essa escória, após passar por um processo de resfriamento, e, em seguida, por uma etapa de cominuição deverá ser misturada com um agente redutor (em geral carbonatos) e outros agentes de escorificação. Em seguida deverá ser fundida em fornos, similares àqueles da fusão primária de óxidos de chumbo, instalados na empresa de processamento primário de chumbo (CHAVEZ *et al.*, 1995) (VAN DER DONK *et al.*, 1995; LUND, 1973; WORREL,

REUTER, 2014; INTERNATIONAL LEAD AND ZINC STUDY GROUP, 1992; WANG *et al.*, 2009).

Em um outro processo tradicionalmente usado para reciclar resíduos diversos de chumbo, os materiais são fundidos a 1000°C, na presença de coque, carbonato de sódio e raspas de ferro, em um forno rotativo. Há citações de que a injeção excessiva de oxigênio na massa fundida é capaz de aumentar a capacidade de produção e recuperação de chumbo de um dado forno, em até 40% (SUTTIE, 1995; LUND, 1973; WORREL, REUTER, 2014; WANG *et al.*, 2009.).

Outros autores referem (WRIGHT *et al.*, 1994) que o uso do processo ISASMELT, permite que sejam introduzidas quantidades massivas de coque misturado aos resíduos de chumbo, em um forno vertical que contem um leito protetor de escória. Essa operação faz com que o material contendo chumbo percole esse leito, produzindo chumbo metálico, que contém baixo teor de impurezas (< 0,1%). Destaque-se, ainda, que esse processo depende, fortemente, da injeção maciça de ar e/ou oxigênio para a obtenção de elevadas recuperações de chumbo. A posição das lanças de injeção de ar e/ou oxigênio desses reatores é similar àquela dos fornos BOF, usados na fabricação de aço. Dessa operação resulta, portanto, chumbo metálico, normalmente apresentando antimônio como impureza em teores, quase sempre, inferiores a 0,5%, que percola para a parte inferior do forno. Por outro lado, a escória que se forma, continuamente, na camada superior do leito, em estado de fusão, contém em geral, cerca de 40 a 60% de chumbo, de 5 a 8% de antimônio, bem como entre 3 e 5% de chumbo.

À medida que a escória se forma atinge a uma determinada espessura deve ser retirada do forno, dando continuidade à operação que forma, consecutivamente, nova camada de escória e de chumbo metálico, que fluem no reator em sentido contra-corrente (BREW, 1991; LUND, GRANDHILL, 1973; WORREL, REUTER, 2014; PATENT US423822A, 1980).

4.4 | Zinco

Desde a segunda metade do século passado está bem consolidado que o uso predominante de zinco é o segmento de revestimento e proteção de aços industriais (galvanização) (DIAZ *et al.*, 1995). Daí resulta que a maior parcela de reciclagem de zinco tenha sua origem, a partir da refusão de sucatas de aço galvanizado, em fornos de arco elétrico, bem como a partir da fundição de outros resíduos constituídos de cinzas, contendo zinco, assim como de drosses de zinco (WORREL, REUTER, 2014, INTERNATIONAL LEAD AND ZINC STUDY GROUP, 1992).

Uma das características facilitadoras dos processos que permitem a reciclagem de zinco de suas fontes secundárias é a faixa de temperatura em que os fornos de arco elétrico operam (até 600°C). Nessas condições resulta a volatilização completa de zinco, mas também a de um pequeno percentual de ferro e, ainda, uma fração de material particulado extremamente fina, constituída, eminentemente de pó de óxido de zinco. Uma outra fonte carreadora de zinco que permite a sua recuperação por processos de fundição é o chamado PAE, pó de aciaria elétrica. Esse material (PAE) pode conter até 30% de zinco,

dependendo das condições da operação e do material do qual foi originado, que em geral são subprodutos da produção de aço.

Uma operação típica de fundição de peças galvanizadas permite a reciclagem de ferro e zinco, usando fornos de arco elétrico. Em média são recuperados entre 10-15 kg de poeiras (PAE) por tonelada de aço, sendo que esse resíduo contém entre 20-40 % de ferro, entre 1-5 % de chumbo, bem como entre 0,5-3% de cloreto e de 0,1 a 0,5% de fluoreto (ZUNKE, 1995; WORREL, REUTER, 2014, INTERNATIONAL LEAD AND ZINC STUDY GROUP, 1992; LUND, 1973).

O processo, entretanto, que predomina nas unidades secundária recicladoras de zinco, que tratam resíduos com teor relativamente mais elevados é o processo Waelz, que utiliza, entretanto, um forno rotativo, contrariamente aos fornos de arco elétrico.

No processo Waelz o zinco contido na fonte secundária é oxidado, sendo volatilizado e recuperado, na forma de óxido de zinco impuro (50-60%). A presença de óxido de ferro na carga que alimenta o forno Waelz resulta, em geral, na produção de ferro metálico (gusa), que pode ser usado como fonte de ferro nos fornos de arco elétrico para produção de aço ou ser usado pela indústria cimenteira. Por outro lado, o óxido de zinco que é recuperado no sistema de contenção de pós e poeiras, pode ser reprocessado em uma fundidora para ser transformado em zinco metálico, ou, ainda, poderá ser destinado para uma planta de processamento hidrometalúrgico (ZUNKE, 1995; WORREL, REUTER, 2014, TURAN et al. 2004; PATENT US423822A, 1980).

Outros processos emergentes permitem a recuperação de zinco, porém, utilizando rotas hidrometalúrgicas. Nesse caso se enquadram os tradicionais processos denominados EZINEX (OLPEN, 1995) e ZINCEX (DIAZ et al., 1995), os quais lixiviam o pó de aciaria elétrica (PAE) e separam os cátions metálicos, por processos de cementação, extração com solventes e eletrorrecuperação (WORREL, REUTER, 2014, INTERNATIONAL LEAD AND ZINC STUDY GROUP, 1992, WANG, et al. 2009; LUND, 1973; PATENT US 423822A, 1980).

5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 | Quanto aos Aspectos de Reciclagem de Resíduos Industriais e o Desenvolvimento Sustentável (WORREL, REUTER, 2014; GRAEDEL, 2006 e 2011; WANG et al. 2009)

Não há dúvidas de que a reciclagem de resíduos industriais assume, além da importância fundamental relacionada à preservação do meio ambiente, novas e variadas facetas, por conta do conceito de sustentabilidade e da pressão da sociedade mais organizada.

Cada vez mais consciente, a sociedade tem exigido das empresas, em todos os setores produtivos, uma postura mais responsável ambientalmente, que abrange, ainda, questões de uma atuação social mais abrangente. Esses fatores motivam a adoção de processos mais limpos, os quais darão origem aos chamados produtos verdes.

Entretanto existe, praticamente, um consenso a nível mundial, de que o reaproveitamento dos resíduos industriais é uma tendência irreversível. Essa tendência se fortaleceu à medida que aumentou a consciência e a pressão ecológica, bem como pela constatação de que a exaustão dos recursos e matérias-primas renováveis se avizinha, mais rápido do que fora previsto.

Ressalte-se, todavia, que a reciclagem de resíduos, bem como toda e qualquer atividade produtiva humana poderá, da mesma forma, causar impactos ao meio ambiente. Há variáveis, tais como: tipo do resíduo; tecnologia usada na reciclagem; características dos novos resíduos gerados; tipo de fonte de

energia ou combustível utilizado, bem como a reutilização proposta para o resíduo a ser reciclado, as quais poderão inviabilizar o processo de reciclagem. Uma das razões residem na possibilidade de que o próprio processo e suas derivações sejam, ainda, mais impactantes do que o resíduo ou o processo que, inicialmente, o gerou.

Assim, a decisão de reciclar resíduos industriais exige uma gestão rigorosamente atenta a esses aspectos.

A reciclagem de resíduos resultará sempre na formação de novos resíduos, os quais deverão ser classificados quanto à toxicidade, corrosividade e periculosidade. Nesse aspecto considera-se fundamental a análise do ciclo de vida dos materiais, avaliando, detalhadamente, as possibilidades de sua reciclagem.

Somente depois de sua transformação o resíduo poderá retornar à cadeira produtiva. Nesse sentido, muitas vezes, o processo de reciclagem precisará lançar mão de outros processos químicos e/ou físicos para adequar o resíduo ao seu novo uso.

Assim é de se esperar que a decisão por um dado processo de reciclagem seja ponderada no que toca à avaliação de todas as alternativas de processamento, considerando todos os insumos entradas e saídas do processo.

As empresas que estiverem adotando processos de produção limpos e promovendo a reciclagem de seus vários resíduos, estarão também à frente de alguns de seus competidores.

5.2 | Quanto as Tecnologias de Reciclagem

Disponíveis e as Implicações de Seu Uso (BREW, 1991; DIAZ, 1995; WORREL, REUTERS, 2014; GOCKMANN, 1992; HANUSCH, 1995; HENDLUND, 1995; HOFFINAM, 1992; LUND, 1973; TURAN, et al, 2004; VAN DER DONK et al, 1995; PATENT US 423822A, 1980; WORREL, REUTER, 2014)

No que toca às tecnologias atualmente disponíveis, pode-se afirmar que as constantes inovações que vem sendo feitas naquelas mais tradicionais tem se mostrado de muito sucesso.

Explique-se que os setores de produção de materiais metálicos, bem como de materiais ferrosos e não-ferrosos são, em geral, muito conservadores, tendo em vista os volumes de recursos e os pesados investimentos que essa atividade requer para se manter competitiva.

Os grandes avanços tecnológicos que ocorreram, não consistiriam na introdução de novos e revolucionários processos. Foram, porém, resultados das constantes melhorias nas operações unitárias e da otimização dos processos tradicionais, especialmente, naqueles que empregam os métodos pirometalúrgicos (fundição de metais não-ferrosos) e dos métodos já utilizados na siderurgia.

Os grandes avanços nonotecnológicos pirometalúrgicos ocorreram nos sistemas de injeção de reagentes, na garantia da manutenção das condições de reação, bem como nos processos de separação e escorificação das diferentes fases, garantindo, assim, elevada eficiência de recuperação de produtos e/ou dos sub-produtos.

De modo geral, os processos e equipamentos que empregam sistemas reacionais gás-sólido, são menos eficientes do que aqueles que empregam um sistema gás-líquido.

Os maiores avanços aconteceram, portanto, nesse segmento tecnológico, qual seja; o que privilegia o emprego de fornos e/ou reatores verticais e a geração dos reagentes in situ. Foi otimizada, ainda, a distribuição do gás de reação diretamente no seio do metal fundido, mas também a otimização da homogeneização dos insumos e dos reagentes no copo do reator.

Antes, entretanto, de haver a opção por uma determinada tecnologia é preciso avaliar, atentamente, as suas vantagens e desvantagens, bem como certificar-se dos casos de sucesso e insucesso de sua utilização.

Nesse sentido cabe, ainda, no caso de se aderir a uma gestão de resíduos que privilegie a reciclagem, que se leve em conta que adotar essa prática não significa dizer que as instalações existentes numa determinada indústria devam ser inteiramente substituídas. Atualmente, está bem estabelecido que se forem introduzidas algumas modificações nos setores considerados mais críticos, poderão ser obtidos resultados que são, quase sempre, suficientes para uma significativa melhoria do desempenho ambiental, quanto à geração de poluição e resíduos na maioria das indústrias já instaladas.

Ainda, o conceito de gerar resíduos, segregando-os e tratando-os, está cada vez mais evidente e tem sido colocado em prática, desde há alguns anos, por muitas empresas.

A comparação das diferentes de aplicações nos setores objeto de avaliação, mostra que as tecnologias de maior sucesso, no que toca à reciclagem de metais e suas ligas, são aquelas que empregam os processos pirometalúrgicos.

É recomendável que em função dos investimentos exigidos para montar diferentes plantas de recuperação de resíduos de fundição, de diferentes capacidades (*smelters*), que as fundições processem seus vários resíduos numa central de resíduos. Essa recomendação pressupõe que a solução se aplica em locais onde há uma concentração de empresas desse setor.

É de se esperar, portanto, que o investimento compartilhado entre essas empresas, em geral, de porte pequeno a médio, traga significativos benefícios ambientais e econômicos para a região onde estão instalados.

Finalmente, no tocante às empresas do setor de produção de metais não-ferrosos, a questão da reciclagem vem passando por uma significativa transformação.

O fato dessas empresas serem de grande porte lhes confere uma capacidade maior de investimento, bem como de capital intelectual mais diversificado e, em geral, mais atualizado do que aquele das empresas de menor porte.

Face aos volumes de materiais particulados que processam, têm adotado, nos últimos 15 anos, uma ação mais proativa em relação à gestão dos seus resíduos.

O momento se lhes mostra mais favorável, quando o preço das *commodities* metálicas está em alta. Outro fator motivador está no fato de que os seus resíduos, normalmente dispostos em

bacias de rejeitos, poderão ser processados, quer por processos pirometalúrgicos quer por processos hidrometalúrgicos, se transformando em ativos.

A decisão quanto à rota a ser escolhida dependerá de uma série de fatores. Entretanto, tem havido uma crescente opção pelos métodos pirometalúrgicos, pois, em geral, resultam em produtos quase semi acabados. Em muitos dos casos os resíduos retornam à forma de metais e/ou ligas, mas, também, podem se transformar em óxidos, os quais retornam diretamente aos processos internos da própria indústria, passando, portanto em geral, nos casos de metais não ferrosos ao processamento hidrometalúrgico.

No Quadro a seguir apresenta-se um elenco de características que uma tecnologia de reciclagem deve atender para ter a possibilidade de ser amplamente empregada. É de se esperar que abriguem um conjunto de diferentes operações unitárias, as quais deverão ser escolhidas entre aquelas que ofereçam mais benefícios ou vantagens em termos ambientais, econômicos e sociais para serem, então implementadas.

Quadro geral de condicionantes para implantação de tecnologias de reciclagem

Característica	Descrição e vantagens	Benefícios para a empresa
1) Flexibilidade para tratar diferentes materiais	Múltiplas aplicações, para tratar desde materiais de alto teor até resíduos de baixo teor. A tecnologia deve permitir ajustes operacionais, mantendo, entretanto a qualidade do produto numa faixa pré-determinada.	Economicidade do processo, operação ajustável às características da alimentação
2) Elevada taxa de reação	Deve apresentar recursos para intensificar a reação e a distribuição dos reagentes, facilitar a homogeneização da mistura, aumentar a transferência de massa e energia, permitindo o baixo consumo de oxigênio, de outros insumos e de energia.	Baixo custo operacional, cinética de reação mais acelerada, menor consumo de energia e de insumos.
3) Design compacto, fácil montagem e adaptação	Deve ocupar menores espaços, apresentar um baixo custo de investimento, permitir adaptações no circuito de modo que possa tratar diferentes materiais, gerando diferentes produtos mediante a adoção de ajustes relativamente simples, incorporando, ainda, preferencialmente, sistemas de tratamento de efluentes e separação de produtos.	Sistema versátil que pode ser rearranjado, apresentando baixo custo operacional e baixo custo de investimento.

Quadro geral de condicionantes para implantação de tecnologias de reciclagem (Cont.)

Característica	Descrição e vantagens	Benefícios para a empresa
4) Baixo consumo de energia e de insumos	O sistema deve ser, preferencialmente, dotado de sistema inteligente que maximiza o uso de diferentes combustíveis, permitindo a sua combinação para otimizar a eficiência e aumentar o rendimento da operação	Versatilidade quanto ao uso de matérias-primas e de combustíveis.
5) Controle do processo	Deve apresentar automação e permitir a remoção de contaminantes aos níveis desejados, deve ser de fácil controle a separação dos produtos sem comprometer a sua qualidade.	Elevadas recuperações de metais (> 98%); garantindo a obtenção de produtos dentro de sua especificação.
6) Facilidade de <i>start up</i>	Equipamentos com comprovada eficiência de operação, permitindo fácil manutenção e reentrada em operação.	Tempo mínimo de parada para manutenção e revisão, apresentando facilidades para controle de processo e de manutenção.

Fonte: Extraído e adaptado de WORREL, REUTER, 2014; LUND, 1973; WANG et al., 2009

5.3 | Quanto ao Cenário Atual de Desafios para o Aumento da Reciclagem de Metais a Nível Mundial (RECK, GRAEDEL, 2012; GRAEDEL, 2006, GRAEDEL ET AL., 2011)

Para melhor situar o leitor, deve ser registrado que esse item foi preparado a partir da consulta a um conjunto de trabalhos feitos por especialistas de organismos internacionais que têm tratado desses temas, ao longo de, pelo menos, dez anos.

Assim, como esses especialistas têm participado diretamente da implantação de projetos e ações sobre o assunto, mas também vem monitorando a sua evolução, os seus trabalhos tornam-se referência para inclusão nesse texto.

Percentual Atual de Reciclagem Global dos Metais

Grupos	Elementos	Percentual de Reciclagem (%)				
		<1	1 – 10	11 – 25	26 – 50	>50
1	Li, Be, B, Sc, Ga, Ge, As, Se, Sr, Y, Zr, In, BA, Hf, Ta, Os, Tl, Bi, ETR					
2	Sb, Hg					
3	Ru, Cd, W					
4	Ir, Mo					
5	Mg, Ti, Cr, Mm, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Nb, Rh, Pd, Ag, Sr, Re, Pt, Au, Pb					

Ref. Extraído e adaptado de RECK, GRAEDEL, 2012.

A observação do Quadro acima nos permite identificar, em razão dos percentuais de reciclagem contabilizados para cada grupo de elementos que, embora tenham acontecido avanços, eles foram menos significativos em relação ao que se desejava que tivessem sido.

Por outro lado, se pode entender que ainda existem oportunidades para o crescimento das atividades de reciclagem de metais em todos os continentes. Essa premissa se embasa, especialmente, quando se observa que o percentual de reciclagem de alguns dos metais que podem ser classificados como *specialties* (Grupo 1), ainda é baixo (<1%), em relação àqueles classificados como *commodities* (>50%). Alguns exemplos se destacam como no caso daqueles metais usados nas indústrias eletroeletrônicas de ponta (In, Ga, Ge e ETR),

em contraponto com os que são tratados como *commodities* Fe, Ni, Co, Au, Pd, Pt, Ag, Cu, Zn, Pb, dentre muitos outros que estão listados no Quadro.

Se pode destacar que, especificamente, o caso dos metais preciosos e do grupo da platina que estes estão nas faixas mais altas de reciclagem. Isso acontece, muito provavelmente, em razão do alto valor agregado desses elementos, em função da sua ampla utilização em quantidades significativas (Grupo 3), em vários elementos industriais.

Por outro lado, a reciclagem de metais considerados perigosos e/ou tóxicos, tais como Cd e Hg (Grupo 2), acontece de modo muito mais tímido, especificamente 1 até 10% para Hg, enquanto para Cd está entre 11 e 25%. Esse último, entretanto, acontece, principalmente, a partir da reciclagem das baterias de níquel-cádmio, mas também como subproduto da produção de zinco.

Uma das razões atribuídas à baixa taxa de reciclagem dos metais do Grupo 1 está no fator economicidade de escala, tendo em vista que são usados em quantidades muito pequenas nos vários produtos de alta tecnologia, nos quais são aplicados.

Existem, entretanto, referências que apontam para uma tendência do aumento da reciclagem desses metais, em países asiáticos, com foco, especialmente, em produtos da indústria eletroeletrônica.

Por outro lado, os metais de uso intensivo (Grupo 5), termos de proporção mássica e diversidade de aplicações tem se destacado, por se tratar, na maioria, de elementos que são usados em tecnologias industriais básicas. Nesse contexto há

que referir que as tecnologias BATs – que significa: as melhores tecnologias disponíveis que já foram aprovadas - e os rejeitos e/ou resíduos de onde esses elementos são recuperados permitem o seu reuso quase que diretamente na forma de óxidos, metais e/ou ligas.

É consenso, entretanto, entre os especialistas que os maiores desafios residem na coleta dos resíduos metálicos. Há exceções, as quais estão representadas pelos elementos distribuídos entre os Grupos 2 (Sb e Hg); 3 (Ru, Cd e W); 4 (Mo e Ir) e o Grupo 5 (Mg, Al, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Nb, Rh, Pd, Ag, Sn, Re, Pt, Au e Pb).

Esse último grupo reúne metais preciosos (Au e Ag), assim como elementos do grupo da platina (Pd, Pt, Os, Ir, Ph, Re), além dos metais básicos de mais amplo emprego industrial.

No caso dos metais desse Grupo 5 o sistema de coleta e reciclagem é intenso, estando bem estabelecido tanto em países desenvolvidos, mas também em alguns países em desenvolvimento.

Outro desafio apontado pelos especialistas está na necessidade de que o *design* dos produtos leve em consideração a possibilidade de reciclagem de seus componentes, de uma forma mais ordenada, fazendo combinações que se adequem mais facilmente à reciclagem. Isso, entretanto, está limitado pela especificidade de uso e das aplicações dos produtos, tendo em vista que a funcionalidade de um dado produto não poderá ficar comprometida.

Há, entretanto, referências de que outro desafio se apresenta no tocante às tecnologias aplicáveis à produtos *high-tech*, especialmente, do setor eletroeletrônico. Nesse sentido os

especialistas apontam que as BATs ainda oferecem oportunidades para que se aumente a recuperação dos vários elementos metálicos, desde que se empreguem processos mais seletivos para cada elemento de interesse.

Em complemento a essas considerações finais, talvez se possa resumir que o maior desafio para uma maior alavancagem da reciclagem, reside na percepção de que essa atividade passe a fazer parte integral de todas as indústrias produtoras de não ferrosos. Somente dessa forma poder-se-á tirar vantagem dos benefícios para o meio ambiente, para a sociedade e para os negócios das empresas como um todo

Vale considerar aqui que as restrições e ameaças ambientais devem ser encaradas como oportunidades. O reaproveitamento dos resíduos internamente nas indústrias ou a sua venda para outras indústrias, alavancarão novos negócios, abrindo perspectivas para o surgimento / aprimoramento de outras tecnologias limpas, aumentando a competitividade possibilitando o desenvolvimento de novos produtos, assim como manutenção e substituição de materiais dentre outras possibilidades.

Segundo a Agenda 21 uma prática industrial ambientalmente correta, com foco na gestão de resíduos, deve ir além da destinação segura ou da recuperação dos rejeitos que são gerados.

Deve-se sempre procurar focar nas raízes do problema, tentando mudar os padrões insustentáveis de produção e consumo. Isto implica na aplicação do conceito de gerência de ciclo de vida integrado (desde o planejamento do produto até o pós-consumo), o qual apresenta a única oportunidade de

reconciliar desenvolvimento com proteção ambiental. A estrutura necessária para que essa ação se efetive deve estar fundamentada em uma hierarquia de objetivos enfocada em quatro áreas programáticas, a saber: redução da geração de resíduos; maximização da reutilização e reciclagem de resíduos; promoção da correta destinação e tratamento dos resíduos.

Em suma, a orientação é para que os resíduos sejam minimizados ou reciclados e que todos os recursos esgotáveis sejam considerados mais valiosos do que o indicariam os preços de mercado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 14001:2004.
- BARBIERI, J.C. Desenvolvimento e meio ambiente: As estratégias de mudanças da agenda 21. 6ª ed. Petrópolis: Vozes, 2003.
- BELLO, C.V.V., Zeri: uma proposta para o desenvolvimento sustentável, com enfoque na qualidade ambiental voltada ao setor industrial. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) -. Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis. Disponível em <http://www.eps.ufsc.br/disserta98/bello/#A>>. Acesso em 24 out. de 2004.
- BOFF, L. Ecologia: grito da terra grito dos pobres. Rio de Janeiro: Sextante, 2004.
- BREW, RBM, FOUNTAIN, CR, PRITCHARD, J. 1991. ISASMELT for Secondary Lead Smelting. pp. 170-181 in Lead '90, Lead Development Association, London.
- CAPRA, F. As conexões ocultas: Ciência para uma vida sustentável Tradução Marcelo Brandão Cipolla, 2ª ed. São Paulo, Ed. Cultrix 2002.
- CHAVEZ, F, MORALES, RD, ROMERO, A, GUERRERO, A. 1995. Optimizing Rotary Furnace, Smelting of Battery Residue. pp. 337-347 in Proceedings of the Third International Symposium on the Recycling of Metals and Engineered Materials. Queneau PB and Peterson RD eds. Available from TMS, Warrendale, PA.
- DIAZ G, MARTIN D, LOMBERA C. 1995. Zinc Recycling by the Modified Zincex Process. pp. 623-638 in Proceedings of the Third International Symposium on the Recycling of Metals and Engineered Materials. Queneau PB and Peterson RD eds. Available from TMS, Warrendale, P A.
- GOCKMANN K. 1992. Recycling of Copper. CIM Bulletin 85:150-6.

- GRAEDEL, T. E. et al. (2006). *Journal of Industrial Ecology* 15, 355.
- GRAEDEL, T. E. et AL (2011). "Recycling Rates of Metals – A Status Report, A Report for Working Group on the Global Metal Flows to UNEP's International Resource xxx, www.unep.org.
- GROTT, J.M. Meio ambiente do Trabalho: prevenção a Salvaguarda do trabalhador. Curitiba:Juruá, 2003.
- GUNTHER, W.M.R. Minimização de resíduos e educação ambiental. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS E LIMPEZA PÚBLICA, 7. Curitiba, 2000. Anais. Curitiba, 2000.
- HANUSCH, K, BUSSMALLI, H. 1995. Behavior and Removal of Associated Metals in the Secondary Metallurgy of Copper. pp. 171-188 in Proceedings of the Third International Symposium on the Recycling of Metals and Engineered Materials. Queneau PB and Peterson RD eds- Available from TMS, Warrendale, PA.
- HENDLUND, L. 1995. Flexible Recycling with Boliden Technology. Ibid pp. 155-162
- HOFFINAM, JE. 1992. Recovering Precious Metals From Electronic Scrap. JOM 44:43-8.
- International Lead and Zinc Study Group, "End Uses of Lead" (2012), www.ilsig.org.
- JOHN, V.M. Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. São Paulo, 2000. 102p. Tese (livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- KEMENY, FL., SOSINSKY ,DJ, SCHMITT RJ. 1992. Development of a dc Plasma-Arc Furnace for Processing Aluminum Dross. pp. 1147-1153 in Light Metals J992 Proceedings of the 121st TMS Annual Meeting Mar 1-5 1992 San Diego, CA. The Minerals, Metals & Materials Society (TMS) Warrendale, P A.
- LUND, F. H., Mac Graw Hill. Recycling Handbook, 1973.

LUKEN R. A., NAVRATIL, J.,, A Programmatic Review of UNIDO/UNEP National Cleaner Production xxxxx, Journal of Cleaner Production, 12, 195-205 (2004).

MATOS, VIGOLVINO, S.,. Alternativas de minimização de resíduos na indústria de fundição. FS Fundição e Serviços, São Paulo, ano 13, nº 115. julho. 2002.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. LEI Nº 6.938, DE 31.08.81 <http://www.mct.gov.br/legis/leis/6938_81.htm>. Acesso em 10 de junho de 2005.

MOORE JJ. 1990. Chemical Metallurgy. p. 324-325. Butterworths, Boston, MA.

OLIVEIRA FILHO, FA, Aplicação do conceito de Produção Limpa: estudo em uma empresa metalúrgica do setor de transformação do alumínio. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Programa de pós graduação em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis. Disponível em <<http://teses.eps.ufsc.br/defesa/pdf/3923.pdf>>. Acesso em 15 de out de 2004.

ORTEGA, E. Análise energética : uma ferramenta para quantificar a sustentabilidade dos agro ecossistemas. Disponível em <http://www.oestadoacre.com.br/Artigo/08_08artigo.htm>. Acesso em 20 de set de 2004.

PATENT, US423822A, Waelz Process for Volatilizing Zinc and Lead from Ion-Oxide Containing Materials, Dec. 1980.

PRADO F, PRADO F,L. 1995. Secondary Copper Smelter Dusts: An Economical and Environmentally Friendly Reclamation. Ibid. pp. 831-840.

RECK, BARBARA K., GRAEDEL, T. E. Challenges in Metal Recycling, Science, vol. 337, 690-695.(2012).

- ROYER, M, SELVAKUMAR, A, GAIRE, R. 1992. Control Technologies for Remediation of Contaminated Soil and Waste Deposits at Superfund Lead Battery Recycling Sites. *J. Air and Water Management* 42(7):970.
- SALAZAR FILHO, H.O., Aplicação da metodologia de produção mais limpa através dos círculos de controle da qualidade – cqq em uma indústria do setor metal mecânico-estudo de caso. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção. UFSC. Florianópolis. Disponível em < <http://teses.eps.ufsc.br/defesa/pdf/6335.pdf>>
- SIBLEY, SF, BUTTERMAN, WC, and STAFF. 1995. Metals Recycling in the United States, Suttie AB. 1995. Lead Recycling via Rotary Furnaces. *Ibid.* pp. 329-336.
- TREMBLAY, F, LITALINE, M, STEPHENS, D. 1995. The Alcan Fluidized Decoater. p. 19-30 in *Proceedings of the Third International Symposium on the Recycling of Metals and Engineered Materials*. Queneau PB and Peterson RD eds. Available from TMS, Warrendale, PA.
- TURAN, M.D.; TÜMEN, S.A.G., Recovery of Zinc and Lead from Zinc Plant Residue, *Hydrometallurgy*, vol. 75, issues 1-4, pp. 169-176 (2004).
- UNEP Declaração Internacional sobre Produção Mais Limpa. Disponível em <<http://www.uneptie.org/pc/cp/declaration/Pdfs/portuguese.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2003.
- UNEP (2009). “Critical Metals for Future Sustainable Technologies and Their Recycling Potential”, SCP Publication, pp.84.
- UNEP – MAP Special Publications, Promoting Cleaner Production in the Industrial Sector, 2002.

- VAN DER DONK, HM. NIJHOF, GH, CASTELIJNS CAM. 1995. The Removal of Iron from Molten Aluminum. pp. 651-661 in Proceedings of the Third International Symposium on the Recycling of Metals and Engineered Materials. Queneau PB and Peterson RD eds. Available from TMS Warrendale, PA.
- WANG, L.K., HUNG, Y., SHAMMAS, N.K, Handbook of advanced Industrial and Hazardous Wastes Treatment, CRC Press, pp. 1376 (2009)
- WELLS, P A, ANDREAS, RE, FOX, TM. 1995. Metal Recovery Enhancement Using Taguchi Style Experimentation. Ibid pp. 269-281.
- WORREL, E., REUTER, M. (2014), Handbook of Recycling, State of Art for Practitioners, Analysts and Scientists, Elsevier, pp. 600, , ISBN 978-0-12-396459-5, 2014.
- WRIGHT, S, JAHANSHAHI S, ERRINGTON, WJ. 1994. Reduction of Battery Paste Slags with Graphite. pp. 11 in Processing for Treatment and Minimization of Wastes, ed. Hager et al. Available from TMS, Warrendale, P A.
- ZUNKE A. 1995. EAF Dust as an Electrolytic Zinc Resource. Ibid pp. 579-588.

SÉRIES CETEM

As Séries Monográficas do CETEM são o principal material de divulgação da produção científica realizada no Centro. Até o final do ano de 2010, já foram publicados, eletronicamente e/ou impressos em papel, mais de 200 títulos, distribuídos entre as seis séries atualmente em circulação: Rochas e Minerais Industriais (SRMI), Tecnologia Mineral (STM), Tecnologia Ambiental (STA), Estudos e Documentos (SED), Gestão e Planejamento Ambiental (SGPA) e Inovação e Qualidade (SIQ). A Série Iniciação Científica consiste numa publicação eletrônica anual.

A lista das publicações poderá ser consultada em nossa homepage. As obras estão disponíveis em texto completo para download. Visite-nos em <http://www.cetem.gov.br/series>.

Últimos números da Série Estudos e Documentos

SED-82 – **Potencial de Aproveitamento de Fontes Secundárias para Terras-Raras: Lâmpadas Fluorescentes.** Bruno Marques Machado Bardano, 2014.

SED-81 – **Lítio: Um Mineral Estratégico.** Paulo Fernando Almeida Braga e Silvia Cristina Alves França, 2013.

SED-80 – **Sustainable development indicators concerning the natural stone sector..** Carlos Cesar Peiter, 2011.

SED-79 – **Ecoeficiência aplicada à redução da geração de resíduos sólidos.** Cristina Lúcia Silveira Sisino, Andréa Camardella de Lima Rizzo e Ronaldo Luiz Corrêa dos Santos, 2011.

INFORMAÇÕES GERAIS

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
Avenida Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ

Geral: (21) 3865-7222

Biblioteca: (21) 3865-7218 ou 3865-7233

Telefax: (21) 2260-2837

E-mail: biblioteca@cetem.gov.br

Homepage: <http://www.cetem.gov.br>

NOVAS PUBLICAÇÕES

Se você se interessar por um número maior de exemplares ou outro título de uma das nossas publicações, entre em contato com a nossa biblioteca no endereço acima.

Solicita-se permuta.

We ask for interchange.