

SELEÇÃO DE ALTERNATIVA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE ZINCO - UM ESTUDO DE CASO*

Carlos Alberto Chaves¹
Wainer da Silveira e Silva²
Robison Damasceno Calado³
Marco Antonio Teixeira⁴
Tone Takayama Filho⁴

Resumo

A preocupação com o adequado tratamento de resíduos industriais surgiu com o conceito de desenvolvimento sustentável criado pelo Clube de Roma e contribuiu para o uso racional dos recursos naturais ao longo dos últimos 50 anos. A preocupação com a produção responsável e uso judicioso de recursos naturais priorizou a reciclagem de materiais na agenda das empresas, tornando-se numa atividade de alta relevância, vital para a sustentabilidade econômica e ambiental. Este trabalho aborda os aspectos técnicos, econômicos e ambientais da reciclagem de resíduos contendo zinco através do estudo de caso de reciclagem de resíduos gerados no processo de fabricação de aço em Forno Elétrico, denominado pó de Aciaria Elétrica (PAE). A indústria ainda está em busca de tecnologias para redução da geração e reciclagem desse resíduo. A relevância do estudo está na utilização da Análise Hierárquica de Processo (AHP) para avaliação e seleção da melhor alternativa, entre várias, para tratamento e reciclagem do PAE. Como resultado, demonstrou-se a eficácia do uso da metodologia no empreendimento de reciclagem de resíduos contendo zinco implantado pela Votorantim, em Juiz de Fora, Minas Gerais.

Palavras-chave: Análise Hierárquica de Processo; Estudo de Viabilidade; Reciclagem de resíduos Industriais; Resíduos de zinco.

SELECTION OF ALTERNATIVE FOR ZINC WASTE RECYCLING -A CASE STUDY

Abstract

The concern with the adequate treatment of industrial waste arose with the concept of sustainable development created by the Rome Club alert and contributed to the more rational use of natural resources over the past 50 years. The concern with responsible production and judicious use of natural resources has given priority to the recycling of materials for companies' agenda and currently is a relevant activity, vital for the economic and environmental sustainability. This work deals with the technical, economic and environmental aspects of the recycling of zinc - containing waste through a case study of recycling of waste generated in the steelmaking process in Electric Furnace, known as electric steel powder (EAFD). The relevance of the study is the use of the Analytic Hierarquic Process (AHP) method to evaluate and select the best alternative, among several, for treatment and recycling of EAFD. As a result, the efficacy of the methodology in the zinc - containing waste recycling project implemented by Votorantim in Juiz de Fora, Minas Gerais, was demonstrated.

Keywords: Analytic Hierarquic Process; Feasibility Study; Recycling of industrial waste; Zinc waste.

¹ M. Met., Departamento de Engenharia de Produção, EEIMVR, UFF, Volta Redonda, RJ, Brasil.

² PhD, Professor do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFF, Niterói, RJ, Brasil.

³ PhD, Professor do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFF, Rio das Ostras, RJ, Brasil.

⁴ Engenheiro, Nexa Resources, Unidade de Juiz de Fora, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

No ambiente de negócios as decisões gerenciais mais importantes são únicas, particularmente envolvendo elevados riscos.

Diariamente são tomadas decisões nas empresas visando seu desenvolvimento e crescimento e agregação de valor ao negócio, sendo a principal fonte de crescimento com elevado e sustentado nível de investimento em capital humano, inovação organizacional e tecnológica, novos equipamentos, novas unidades de produção, desenvolvimento de novos produtos, expansão e abertura de novos mercados para produtos/ serviços (ONO e NEGORO, 1992).

As empresas podem ser consideradas sistemas cujo objetivo principal é serem bem sucedidas, contribuindo para o desenvolvimento do país, de seus colaboradores e das comunidades/regiões em que estão inseridas. Elas elaboram seu planejamento estratégico traçando objetivos secundários e metas de desempenho. Uma das metas de qualquer organização é minimizar perdas, ou seja, objetiva o desperdício zero. Esse trabalho aborda um estudo de caso de reciclagem de resíduos industriais, especificamente da seleção de uma alternativa, dentre várias, de investimento em tecnologia de reciclagem de resíduos contendo zinco.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Destinação de resíduos industriais

É comum proceder ao tratamento de resíduos industriais com vistas à sua reutilização ou, pelo menos, à sua inertização para que não prejudiquem o meio ambiente. Dada a diversidade destes resíduos, não existe um processo de tratamento pré-estabelecido, havendo sempre a necessidade de realizar pesquisas e desenvolvimento de processos economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis. Algumas técnicas usualmente empregadas no tratamento de resíduos industriais são: incineração, biogásificação, confinamento, disposição em aterros e reciclagem, tornando-se matéria prima em outra indústria. O presente trabalho trata do problema da destinação e reciclagem de resíduos contendo zinco e outros metais, considerado perigoso, de acordo com a Norma brasileira ABNT NBR 10.004.

2.2 O problema dos resíduos contendo zinco

Em um século de atividade (início em 1918), a Votorantim S.A. (VSA) conquistou posição de liderança na maioria dos mercados em que atua e consolidou-se como um dos grandes grupos empresariais do Brasil. Mesmo diante de um cenário econômico adverso no Brasil, em 2018, a receita líquida do Grupo fechou o ano em R\$ 31,9 bilhões com um EBITDA de R\$ 6,9 bilhões, 47% superior ao ano anterior, e lucro líquido de R\$ 2 bilhões. A empresa manteve os investimentos planejados, que totalizaram R\$ 2,6 bilhões no ano (www.votorantim.com.br/relatotioanual, 21/05/18).

Em outubro de 2017 a VSA incorporou as operações de zinco no Brasil (antiga Votorantim Metais-VM) à empresa Nexa Resources (Luxemburgo), com participação acionária de 64,25% nesta empresa, que tem suas ações negociadas nas bolsas de valores de Nova Iorque (NYSE) e Toronto (TSE). (United States Securities and exchange Commission. Washington, D.C. 20549. Form 20-F).

A Unidade objeto do Estudo de Caso é a de Juiz de Fora, Minas Gerais, dedicada a fabricação de Zinco e Óxido de Zinco. A planta foi estabelecida em 1980,

originalmente denominada Paraibuna Metais, para a produção de Zinco (90.000 t/ano), ácido sulfúrico (80.000 t/ano) e óxido de Zinco (VOTORANTIM METAIS, Relatório Anual, 2014).

No processo de fabricação de zinco, a empresa utiliza concentrado de Blenda (ZnS), matéria prima que é parte produzida no Brasil e parte importada. O preço da matéria prima vinha aumentando gradativamente, causando aumento nos custos de produção do metal. Somente no período de 2005 a 2008, entre a decisão de implantar a Planta de Polimetálicos e o início de implantação do projeto, o preço do concentrado de zinco triplicou, passando de USD 477.00 a 1,414.00 a tonelada de zinco contido. (SANTOS, 2010). Atualmente esse valor é de USD 2,620.50 (London Metal Exchange, www.lme.com , 10/06/19).

Além disso há um crescente aumento na geração de resíduos de zinco, tanto na mineração quanto na metalurgia e siderurgia. Somente no setor siderúrgico são geradas cerca de 100.000 toneladas anuais de resíduos de Pó de Aciaria Elétrica – PAE. Esse resíduo ferroso, que contém ainda zinco, chumbo e outros metais não ferrosos, é gerado durante a operação de fusão da sucata de aço em Fornos Elétricos a Arco (FEA) devido a contaminação da sucata de aço com sucata de produtos automotivos e eletrodomésticos (chamada “Linha Branca”), produtos esses confeccionados com chapa zincada.

O resíduo industrial de Aciaria Elétrica, PAE, de acordo com a Norma Brasileira ABNT NBR 10.004:2004, é considerado um resíduo Classe I, perigoso, não podendo ser lançado em aterros, o que requer dispendioso tratamento. A classificação se deve a presença de metais pesados (Pb e Cd) e halogênios (Cl e F). Existe em estoque nos pátios das siderúrgicas brasileiras cerca de 500.000 toneladas de resíduos PAE sendo a geração anual de cerca de 100.000 toneladas (TAKAYAMA, MAGALHÃES e SANTOS, 2015).

Os resíduos contendo zinco constituem um problema que afeta toda a siderurgia. As soluções adotadas para reciclagem de resíduos contendo zinco com algum sucesso foram via pirometalurgia (Alemanha: processamento em Forno Cubilô e EUA: processamento em Forno de Soleira Rotativa – *Rotary Hearth Furnace*).

O resíduo PAE é composto por óxidos e silicatos de ferro, zinco e cálcio. (Tabela 1). Verifica-se que o teor de zinco no resíduo PAE é, em média, de 18,92%, teor esse que já o habilita a se constituir em potencial matéria prima para o processo de fabricação de zinco (observe-se que os teores médios de zinco no minério e concentrado são, respectivamente, 5% e 49%).

Tabela 1 - Composição química do resíduo Pó de Aciaria Elétrica (PAE), em %

Forneced	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Médi
Zn	19,1	21,4	20,1	20,2	19,5	18,0	17,1	17,0	17,9	18,6	18,92
Fe	28,7	25,6	33,6	36,8	35,1	36,2	35,9	31,4	34,7	34,9	33,34
Pb	2,09	2,27	1,68	1,41	1,35	1,22	1,37	1,28	1,35	1,40	1,54
SiO₂	3,30	2,85	2,81	2,79	3,67	2,95	3,70	2,75	3,47	2,70	3,10
CaO	13,7	15,5	6,74	4,92	6,61	8,01	7,79	13,6	8,03	5,90	9,10
Cl	na	2,62	1,65	1,36	1,50	1,25	1,64	1,59	1,51	1,88	1,67
F	0,43	0,39	0,43	0,47	0,44	0,46	0,46	0,45	0,44	0,42	0,44

Fonte: TAKAYAMA, T.; MAGALHÃES, W.; SANTOS, F. M., 2015.

2.4 Alternativas para tratamento de resíduos contendo zinco

A disposição de resíduos de pó contendo zinco é um problema mundial que vem sendo enfrentado por siderúrgicas integradas (Alto Forno-Aciaria a Oxigênio) e não integradas (Aciarias Elétricas). O tratamento e adequada disposição de resíduos contendo zinco (PAE) vem sendo exaustivamente estudado por empresas, Institutos de Pesquisa e Universidades sendo várias as possíveis alternativas para solução do problema (mais de uma dezena). Essas alternativas podem ser classificadas em basicamente três grandes grupos (ASSIS, 1998; SOUTHWICK, 2010 e BUZIN, HECK e VILELA, 2017): tratamento do resíduo contendo zinco por processos Pirometalúrgico, Hidrometalúrgico e confinamento em materiais (cerâmica e vidro).

2.4.1 Tratamento de resíduos por processo pirometalúrgico

O processamento de resíduos contendo zinco por pirometalurgia fundamenta-se no princípio que esse metal se vaporiza a temperatura de 907 °C, temperatura relativamente baixa para essa via de extração. Assim, o metal pode ser volatilizado juntamente com outros metais pesados tais como cádmio e chumbo, permitindo sua recuperação nos sistemas de despoeiramento de processos pirometalúrgicos, ao mesmo tempo em que torna o resíduo não perigoso.

A seguir são detalhados os principais processos pirometalúrgicos desenvolvidos para tratamento de resíduos de zinco: a) Co-processamento em Forno de Cimento (Clínquer); b) Forno Waelz; c) Reator Ausmelt; d) Forno de Fusão Imperial (*Imperial Smelting Furnace – ISF*); e) Forno de Soleira Rotativa (*Rotary Hearth Furnace – RHF*); f) Forno Tecnoled.

a) Co-processamento - O Co-processamento consiste na destruição térmica de resíduos em fornos incineradores. Seu diferencial em relação à incineração comum está no aproveitamento do resíduo energético ou substituição da matéria prima na indústria cimenteira, sem qualquer alteração na qualidade do produto final. Consiste no envio do resíduo para empresas de co-processamento (geralmente Cimenteiras). Entretanto, essas empresas cobram caro pelo tratamento, transformando o resíduo tornando-o não perigoso. A principal vantagem dessa alternativa é o tratamento do resíduo por empresa especializada, com o recebimento de Certificado de Destruição do Resíduo (CDR) pela empresa geradora. Já as desvantagens residem no elevado custo do tratamento e transporte, que pode variar de R\$ 350,00/tonelada de resíduo (FIALHO e SOUZA, 2015) até R\$ 1.800,00/tonelada (LIMA e FERREIRA, 2007). Nos países desenvolvidos esse custo chega a ser de USD 250.00/t (~R\$ 1.000,00/t).

b) Tecnologia do Forno Waelz - consiste num processo pirometalúrgico que trata o resíduo produzindo óxido de zinco e posterior adição como matéria prima ao processo de fabricação de zinco. No Forno Waelz o material (resíduo PAE) é misturado com coque e transformado em pelotas. Essas são carregadas num Forno Rotativo, deslocando-se lentamente dentro do forno sendo aquecidas por gases quentes (queima de gás natural). Os óxidos de metais presentes no PAE (zinco, chumbo, cádmio) são reduzidos pelo carbono do coque sendo volatilizados indo para o sistema de despoeiramento. Junto ao zinco, os metais chumbo, cádmio e índio, além dos halogênios são volatilizados e saem do forno via fluxo de gases. Os gases vão para os filtros de manga, onde são resfriados e o pó, denominado óxido Waelz, contido nesses gases é capturado. O óxido Waelz é composto por uma

mistura de óxidos de zinco, cádmio e chumbo, além da presença de sódio e dos halogênios cloro e flúor.

Como vantagem ressalta-se que a tecnologia Waelz é madura e comprovada no tratamento de resíduos de zinco, possuindo mais de 40 unidades em operação no mundo (notadamente Europa, EUA, Japão e Coreia do Sul). Como desvantagem, pode-se considerar o investimento relativamente elevado e o tempo de implantação do projeto, que pode superar os 24 meses.

c) Tratamento pela Tecnologia Ausmelt - A Tecnologia Ausmelt foi desenvolvida no Centro de Pesquisas australiano CSIRO (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization*), originalmente para processamento de finos de minério de ferro. Posteriormente foi aplicado a tratamento de pós de Aciaria Elétrica para a recuperação de zinco e outros metais não ferrosos. Consiste no tratamento pirometalúrgico por injeção de ar enriquecido com oxigênio através de uma lança submersa (*Top Submerged Lance – TSL*). Como desvantagens tem-se os elevados custos de investimento e operacional, bem como elevado consumo de oxigênio (GLININ et al, 2013).

d) Processo Imperial Smelting Furnace (ISF) - O Forno *Imperial Smelting* foi desenvolvido na Inglaterra, nos anos 50 do século passado, com a finalidade de processar concentrados de chumbo e zinco. Trata-se de um Reator de Redução/Fusão que opera em contracorrente carga-gases, semelhante ao Alto Forno convencional de fabricação de chumbo. Como desvantagens apresenta elevado custo de investimento e tecnologia em estado de obsolescência (SCHWAB, 2005).

e) Forno de Soleira Rotativa (Rotary Hearth Furnace – RHF) - A tecnologia do Forno de Soleira Rotativa (*Rotary Hearth Furnace*) consiste num forno aquecido a gás natural que utiliza como carga pelotas de uma mistura de resíduos ferrosos contendo zinco e carvão (pelotas auto-redutoras). Durante o processo os óxidos de zinco são reduzidos, volatilizados e recuperados no sistema de despoeiramento. Um atrativo para essa tecnologia é a obtenção de ferro pré-reduzido que pode ser usado como carga em Fornos Elétricos a Arco para a produção de aço.

f) Forno Tecnoled (TecnoLogos - VALE) - O processo Tecnoled é uma nova tecnologia de produção de ferro, desenvolvida no Brasil pela TecnoLogos - VALE, que se destaca pelo uso de um forno com geometria inovadora e utiliza matérias primas de baixo custo (MAXWELL, 2009).

O processo tem capacidade de processar uma carga de resíduos sólidos (rejeitos de lavra, finos de peneiramento, transporte, limpeza e pó de Aciaria Elétrica, PAE). Estes materiais, misturados com fundentes e ligantes, são aglomerados em máquinas de briquetagem na forma de briquetes. Em seguida são curados, secados e adicionados ao Reator Tecnoled.

Como proposto por D'ABREU et al. (2007) no forno Tecnoled o ZnO presente na carga reduz a zinco metálico e volatiliza-se em temperaturas relativamente baixas. Ao subir junto com os gases do reator o zinco reoxida-se na presença de CO₂ sendo arrastado pelos gases da chaminé.

O ZnO contido nos gases de topo é posteriormente recuperado no sistema de limpeza de gases e poderia ser comercializado para a indústria de produção de Zinco

Outros processos pirometalúrgicos para tratamento de resíduos contendo zinco

Embora existam outros processos pirometalúrgicos que mencionam ser capazes de reciclar resíduos siderúrgicos contendo zinco (processos OxyCup, PRIMUS, etc.) os mesmos não foram aqui considerados por se tratarem de tecnologias emergentes (com pouca comprovação prática) e que visam principalmente a fabricação de ferro metálico, fora do objetivo da VSA.

2.4.2 Tratamento de resíduo de zinco por processo hidrometalúrgico.

O processamento de resíduos de zinco via hidrometalurgia tem como objetivo recuperar o metal por solução aquosa. Na grande maioria dos processos hidrometalúrgicos o objetivo é a obtenção de uma solução aquosa rica em zinco de pureza suficiente para possibilitar a posterior recuperação do metal de alta pureza ou um composto, como o óxido ou sulfato de zinco. Os entusiastas dessa rota de tratamento alegam ser a mesma uma das mais versáteis pois permite a recuperação do zinco e de outros metais (cobre, cádmio). Entretanto a hidrometalurgia é afetada pela forma mineralógica do zinco, Frankelinita ($ZnO.Fe_2O_3$), de difícil solubilização. Também a presença de cloretos afeta negativamente a recuperação do metal por eletrólise, etapa final do processo hidrometalúrgico. Adicionalmente no processo hidrometalúrgico são gerados resíduos e efluentes líquidos com elevados custos de tratamento e disposição que, frequentemente, limitam sua implementação. No processo o ferro e outras impurezas são lixiviadas juntamente com o zinco e, desse modo, o processo não provê soluções aquosas isentas de impurezas que permitam a recuperação econômica do zinco. Exemplos comerciais de processos hidrometalúrgicos são os processos Ezinex e Zincex (SOUTHWICK, 2010 e BUZIN, HECK e VILELA, 2017).

2.4.3 Confinamento em materiais dos resíduos contendo zinco

Além das rotas de tratamento/reciclagem via piro e hidrometalurgia existe a possibilidade de incorporação do resíduo contendo zinco em outros materiais. O objetivo dessa técnica é além de usar o resíduo como matéria prima de outro processo inibir a ação dos elementos perigosos sobre o meio ambiente através de seu confinamento. Assim, alguns processos foram desenvolvidos para o confinamento do resíduo em materiais como cerâmica (tijolos), concreto, cimento e vidro.

Exemplos comerciais de processos de confinamento desenvolvidos nos EUA foram os processos da *Glassification International*, Oregon, *Inorganic Recycling* (NUCOR, Hickman), *International Melting and Manufacturing* (La Porte, IN) e *Richland Molded Brick* (Mansfield, OH) (SOUTHWICK, 2010).

Essa alternativa, apesar de oferecer uma solução paliativa para o confinamento do resíduo, não resolve a questão do que fazer com o produto ao longo de seu ciclo de vida.

As principais tentativas de desenvolver tecnologias para tratamento de resíduos contendo zinco tem sido nos EUA. Isso se deve, provavelmente, à severa legislação americana em relação a disposição de resíduos em aterros que tem incentivado as empresas siderúrgicas a apoiar o desenvolvimento de novas tecnologias, mesmo aquelas sem esperança de sucesso. Entretanto, a maioria das iniciativas foram malsucedidas causado por falhas de projeto, partida e comissionamento. (SOUTHWICK, 2010).

3 Métodos Multicritério de Apoio à Decisão

Os Métodos Multicritério de Apoio à Decisão (MMAD) são ferramentas que auxiliam a tomada de decisão, geralmente empregados na solução de problemas

complexos onde há o envolvimento de muitas variáveis que interferem na decisão, dificultando uma escolha rápida e que garanta atender as expectativas de quem decide.

Os métodos MMAD objetivam auxiliar decisores e analistas em situações onde há a necessidade de identificação de prioridades sob a ótica de múltiplos critérios, o que ocorre normalmente quando coexistem interesses em conflito (GOMES, 2012).

Os principais métodos multicritério utilizados, segundo Guitouni e Martel (1998), (DZULINSKI e JUNIOR, 2018) são:

Escola americana: MAUT (*Multiattribute Utility Theory*) ou MAVT (*Multiattribute Value Theory*): método utilizado em problemas de seleção, denominados problemas de critério único de síntese; AHP (*Analytic Hierarchic Process*): também é um método que busca a seleção da melhor alternativa, utilizando comparações aos pares para avaliar a decisão e cria níveis hierárquicos entre as alternativas; MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*).

Escola francesa: ELECTRE (*Elimination Et Choix Traduisant la Réalité*): Família de métodos multicritério os quais podem ser tanto de escolha, quando de ordenação e classificação; PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*): possui os mesmos princípios do ELECTRE e introduz seis funções para descrever a preferência do decisor de acordo com cada critério.

As fases do processo de apoio à decisão são basicamente três: estruturação, avaliação e recomendação de cursos de ação a serem seguidos.

No presente trabalho aplicou-se o método AHP à decisão da escolha da alternativa para tratamento dos resíduos contendo zinco pela Nexa Resources, em Juiz de Fora, MG. A opção pelo método AHP deveu-se a sua simplicidade e por ser um dos mais conhecidos e utilizados métodos MMAD.

3.1 O método de Análise Hierárquica de Processo (AHP)

O Método de Análise Hierárquica (*Analytic Hierarquic Process*, AHP) busca a solução de um problema complexo através da decomposição e síntese das relações entre os critérios até que se chegue a uma priorização dos seus indicadores, aproximando-se de uma melhor resposta de medição única de desempenho (SAATY, 2012). A AHP é um modelo flexível que permite a tomada de decisão através da combinação de julgamentos e valores pessoais de uma maneira lógica. Vem a complementar outras técnicas de seleção de projetos e atividades tais como relação custo-benefício, priorização (por exemplo, o método GUT, Gravidade Urgência e Tendência) e análise de risco. O processo do método AHP ocorre em oito (8) etapas, a saber: 1. Definição do problema. 2. Estruturação da hierarquia do problema (em níveis) sob o ponto de vista gerencial a partir dos níveis superiores até o nível no qual a intervenção para solucionar o problema é possível. 3. Construção de uma matriz para comparação pareada das contribuições relevantes ou impacto de cada elemento em cada critério governante no próximo nível superior. 4. Obtenção de todos os julgamentos requeridos para desenvolver as matrizes da etapa 3. Julgamentos múltiplos poderão ser sintetizados utilizando uma média geométrica. Para isso, são necessários $n(n - 1) / 2$ julgamentos para uma matriz $n \times n$, sendo n o número de linhas e colunas. Os valores inseridos são aqueles da escala de comparação, mostrados na Escala Fundamental de Saaty para julgamentos comparativos (Tabela 2). 5. Estabelecimento de prioridades. Após

coletar todas as comparações pareadas e entrando com os valores recíprocos junto com entradas unitárias na diagonal principal da matriz as prioridades são obtidas e testada a consistência. 6. Realização das etapas 3, 4 e 5 para todos os níveis e aglomerados na hierarquia. 7. Síntese. Usar a composição hierárquica (síntese) para ponderar os vetores de prioridades pelos pesos dos critérios e efetuar a soma de todas as prioridades ponderadas correspondentes aquelas do nível inferior e assim por diante. O resultado é um vetor de prioridade geral para o menor nível da hierarquia. 8. Avaliação da consistência para toda a hierarquia através da multiplicação de cada índice de consistência pela prioridade do critério correspondente e adicionando os produtos. O resultado é dividido pelo mesmo tipo de expressão usando o índice randômico de consistência correspondente às dimensões de cada matriz ponderado pelas prioridades. A razão de consistência da hierarquia deverá ser menor ou igual a 10%. Se não for, a qualidade da informação deverá ser melhorada, por exemplo, revisando a maneira que as questões são colocadas para fazer as comparações pareadas.

Tabela 2 – Escala Fundamental de Saaty para julgamentos de comparativos

Escala Verbal	Escala Numérica
Igual preferência (importância)	1
Preferência (importância) fraca	3
Preferência (importância) moderada	5
Preferência (importância) forte	7
Preferência (importância) absoluta	9

Fonte: SAATY, T. L., 2012 e COSTA, H.G., 2002.

3.2 Aplicação do método AHP para seleção da tecnologia para tratamento de resíduos de zinco

A Tabela 3 mostra a estruturação do problema de disposição/tratamento adequado do resíduo perigoso contendo zinco, com o estabelecimento do objetivo e dos níveis hierárquicos (critérios e alternativas) para solução do problema.

Tabela 3 – Estrutura Hierárquica para solução do problema resíduos de zinco.

OBJETIVO	CRITÉRIOS	ALTERNATIVAS
Adequada disposição / tratamento do resíduo contendo zinco	Conversão a resíduo não perigoso (ABNT ISO 10004)	A) Processo Pirometalúrgico
	Matéria prima para outro processo	B) Processo Hidrometalúrgico
	Sinergia com outras Unidade de Negócio	C) Confinamento/Vitrificação
	Logística favorável	
	Retorno econômico	
	Menor custo operacional	

Fonte: Os autores.

A terceira etapa foi a construção de Matrizes de Comparação pareada segundo os critérios: solução ambiental, retorno econômico, menor custo operacional, matéria prima para outro processo, sinergia com outras Unidades de Negócio (UN's) e logística favorável. Na Tabela 4 pode-se ver um exemplo de matrizes paritária, para o critério Solução Ambiental. De modo similar, foram determinadas as matrizes paritárias para os demais critérios.

Tabela 4 – Desempenho das alternativas à luz do critério Solução Ambiental

Solução Ambiental	Processo Pirometalúrgico	Processo Hidrometalúrgico	Confinamento/Vitrific.
Processo Piro	1	2	5
Processo Hidro	1/2	1	3
Confinamento	1/5	1/3	1

Na obtenção dos quadros normalizados realizam-se as etapas de cálculo do somatório dos elementos de cada coluna do quadro de julgamentos e divisão de todos os elementos de cada coluna do quadro de julgamentos pelo somatório referente a coluna, para cada um dos nós de julgamento da hierarquia (COSTA, 2002).

Para a AHP do problema VSA determinaram-se os quadros normalizados para os critérios solução ambiental, retorno econômico, menor custo operacional, matéria prima para outro processo, sinergia com outras Unidades de Negócio (UN's) e logística favorável. Em seguida são determinadas as Prioridades Médias Locais (PML's) que são obtidas para cada um dos nós de julgamentos ou quadros normalizados.

Prioridades Globais

O vetor de Prioridade Global (PG) armazena a prioridade associada a cada alternativa em relação ao foco principal ou objetivo global. Para calcular o PG faz-se necessário combinar os PML's no Vetor de Prioridade Global. $PG = (PG_{\text{piro}}; PG_{\text{hidro}}; PG_{\text{confi}})$.

Por exemplo, o Vetor de Prioridade Global para a rotas de tratamento Pirometalúrgico do resíduo contendo zinco será: $PG_{\text{piro}} = (\text{Prioridade de SAS à luz do foco principal} \times \text{Desempenho de Piro à luz de SAS} + \text{Prioridade de SEC à luz do foco principal} \times \text{desempenho de Piro à luz de SEC} + \dots + \text{Prioridade de SLG à luz do foco principal} \times \text{desempenho de Piro à luz de SLG})$. A tabela 5 resume o cálculo das Prioridades Médias Globais para as três rotas de tratamento do resíduo contendo zinco.

Tabela 5–Cálculo das Prioridades Médias Globais p/ as três rotas de tratamento do resíduo de zinco

	SAS	SEC	SMC	SMP	SUN	SLG	PriorGlobal	
PG_{piro}	$(0,31 \times 0,58) + 0,181$	$(0,25 \times 0,54) + 0,133$	$(0,22 \times 0,58) + 0,126$	$(0,12 \times 0,59) + 0,073$	$(0,06 \times 0,49) + 0,030$	$(0,04 \times 0,18) + 0,018$	0,562	
PG_{hidro}	$(0,31 \times 0,31) + 0,096$	$(0,25 \times 0,30) + 0,075$	$(0,22 \times 0,31) + 0,068$	$(0,12 \times 0,33) + 0,040$	$(0,06 \times 0,44) + 0,026$	$(0,04 \times 0,16) + 0,016$		0,322
PG_{confi}	$(0,31 \times 0,11) + 0,034$	$(0,25 \times 0,16) + 0,040$	$(0,22 \times 0,11) + 0,024$	$(0,12 \times 0,08) + 0,010$	$(0,06 \times 0,08) + 0,005$	$(0,04 \times 0,04) + 0,004$		0,117
							1,001	

O Vetor de Prioridade Global para as rotas de tratamento de resíduo contendo zinco foram, respectivamente: $PG_{\text{piro}} = 0,56$; $PG_{\text{hidro}} = 0,32$ e $PG_{\text{confi}} = 0,12$. Assim, pode-se observar que para o problema: “Adequado tratamento/disposição do resíduo perigoso contendo zinco”, a alternativa de rota de processamento que melhor atende às necessidades da VSA foi a Rota Pirometalúrgica ($PG_{\text{piro}} = 0,56$). A segunda preferência seria a rota hidrometalúrgica ($PG = 0,32$) e a terceira o confinamento do resíduo perigoso em materiais (cerâmica, vidro, $PG = 0,12$).

3.3 Avaliação da consistência da hierarquia

A avaliação da consistência para a hierarquia é feita através da multiplicação de cada índice de consistência pela prioridade do critério correspondente e adicionando os produtos. O resultado é dividido pelo mesmo tipo de expressão usando o índice randômico de consistência correspondente às dimensões de cada matriz ponderado pelas prioridades. A razão de consistência da hierarquia deverá ser menor ou igual a 10% (SAATY, 2012).

Cálculo do Índices de Consistência (IC) para os critérios Solução Ambiental (SAS), Solução Econômica (SEC), Solução Menor Custo Operacional (SMC), Solução Matéria Prima (SMC), Solução Logística Favorável (SLG) e Solução Sinergia com outras Unidades de Negócio (SUN).

$$\text{Índice de Consistência; IC} = (\lambda_{\text{máx}} - N) / (N - 1)$$

A Razão de Consistência, $RC = IC / IR$, onde IC é o Índice de Consistência e IR o Índice Randômico, extraído de uma Tabela de Índices aleatórios (Tabela 6).

Tabela 6 - Índice Randômico Médio do AHP

Dimensão da Matriz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice Randômico	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: SAATY, 2012.

Tabela 7 – Razão de Consistência (RC)

Critério	SAS	SEC	SMC	SMP	SLG	SUN
$\lambda_{\text{máx}}$	3,0037	3,0092	3,0037	3,0142	3,0291	3,0126
IC	0,0018	0,0046	0,0018	0,0071	0,0146	0,0063
IR	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
RC	0,0032	0,0079	0,0032	0,0122	0,0251	0,0109

Fonte: Este trabalho.

Como se pode observar na Tabela 7, o índice de consistência para os julgamentos (critérios ambiental, econômico, menor custo, matéria prima, logística e sinergia com UN's) encontraram-se dentro do limite satisfatório para o método AHP ($IC < 0,10$). Também o resultado está em concordância com os julgamentos dos gerentes e pessoal técnico da VSA/Nexa Resources que participou do processo e foram entrevistados.

A figura 1 mostra a estruturação da do Método de Análise Hierárquica (AHP) para a análise e decisão desenvolvida para o caso da VSA, do que fazer com os resíduos contendo zinco próprios e de terceiros (empresas do setor siderúrgico).

4 Resultados

O resultado da aplicação do Método de Análise Hierárquica corroborou o que os gerentes e engenheiros da VSA/Nexa Resources julgaram e que resultou na implantação da Unidade para reciclagem de resíduos de zinco utilizando a Tecnologia de reciclagem em Forno Waelz (Planta de Polimetálicos de Juiz de Fora). Esta unidade possibilitou o tratamento de todos os resíduos contendo zinco, inclusive o Pó de Aciaria Elétrica (PAE) das siderúrgicas brasileiras.

A Unidade de Polimetálicos da Votorantim, em Juiz de Fora (Nexa Resources), é a primeira do país e única na América do Sul que trata o Pó de Aciaria Elétrica (PAE). Com investimento de R\$ 521 milhões (R\$ 82 milhões em meio ambiente, segurança e saúde) a planta representou uma mudança do modelo mental existente visando a melhoria para o meio ambiente, porém de modo econômico e com capacidade de reciclar até 85% do pó de aciaria elétrica gerado pelas siderúrgicas brasileiras.

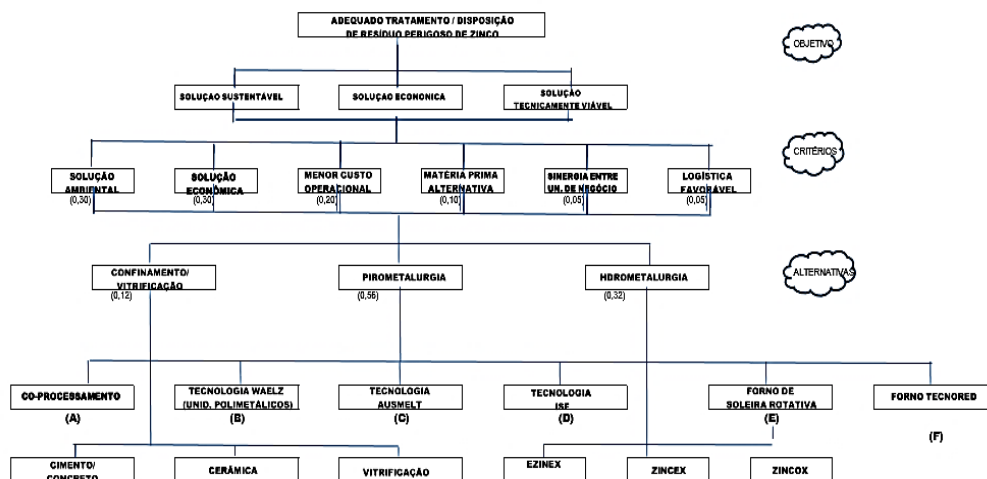


Figura 1 - Estruturação da hierarquia das alternativas para tratamento de resíduos de zinco
Fonte: os autores

5 Conclusão

Este trabalho mostrou a importância da adequada avaliação da questão da geração, tratamento, reciclagem e eventual disposição de resíduos sólidos industriais sob o ponto de vista holístico e sustentável.

Objetivando o exame da questão do adequado tratamento e disposição de resíduos, na etapa de Estudo Conceitual sugere-se a utilização do Método de Análise Hierárquica do Processo (AHP) para auxílio à decisão da tecnologia mais adequada à situação estudada.

A metodologia foi empregada no Estudo de Caso da Fábrica de Polimetálicos da empresa Votorantim S.A, instalada em Juiz de Fora, MG. A questão básica foi a escolha de tecnologia, dentre mais de uma dezena disponíveis, para reciclagem de resíduos industriais contendo zinco gerados pela indústria siderúrgica.

A instalação solucionou um grave problema ambiental, e trouxe benefícios técnicos, de segurança e econômicos para a empresa. O resultado é que o investimento na Planta de Polimetálicos de Juiz de Fora, permitiu a obtenção de uma matéria prima de baixo custo, representando hoje cerca de 20% da matéria prima utilizada pela Fábrica. O Investimento teve um prazo de retorno (*pay back*) de cinco anos, considerado bom para o porte do investimento.

Agradecimentos

A Votorantim S.A. e Nexa Resources pela permissão em utilizar o Projeto de Polimetálicos da Fábrica de Zinco de Juiz de Fora para Estudo de Caso deste trabalho.

Referências bibliográficas

- ABNT NBR 10004, 2004.
- ASSIS, G. Emerging Processes for Zinc and Lead Recovery. Zinc and Lead Processing Symposium, The Metallurgical Society of CIM. Calgary, Canada, August, 1998.
- BUZIN, P.J.W.K.; HECK, N.C.; VILELA, A.C.F. EAF dust: An overview of the influences of physical, chemical and mineral features in its recycling and waste incorporation routes. *Journal of Materials Research and Technology*, 6(2):194-202, 2017.
- COSTA, H.G. Introdução ao Método de Análise Hierárquica: análise multicritério no auxílio à decisão. Niterói, Maio de 2002.
- D' ABREU, J.C.; NOLDIN Jr., J.H.; MARCHESI, E.S.; COSTA, P.H.C. Flexibilidade de Matérias-primas no processo Tecnoled. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, São Paulo, v.3, n.3, p. 22-27, Jan.-Mar. 2007.
- DZULINSKI, A.C.; JUNIOR, A.B. Métodos de decisão multicritério aplicados no desenvolvimento de novos produtos: Uma abordagem teórica. *Tópicos em Gestão da Produção*, Belo Horizonte, Editora Poisson, Volume 3, Capítulo 10, p. 98-115, 2017.
- DORONIN, I.E.; SVYAZHIN, G. Commercial Methods of Recycling Dusts from Steelmaking. *Metallurgist*, volume 54, n. 9-10, 2011.
- FIALHO, L.S.; SOUZA, L. Coprocessamento: vantagens econômicas e ambientais em transformar resíduos sólidos. *ENGEMA-Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente*, FEA-USP, São Paulo, SP, Dezembro de 2015.
- FONSECA, D.C. Metodologia para reciclagem de resíduos sólidos industriais. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2000.
- GLININ, A. et al.: Outotec® Ausmelt Technology for Treating Zinc Residues. *World of Metallurgy – ERZMETALL* 66 (2013) No. 4
- GOMES, L.F.A.M.; GOMES, C.F.S. Tomada de decisão gerencial – Enfoque Multicritério. Editora Atlas, 4ª. Edição, São Paulo, 2012.
- Instituto Aço Brasil (IABr). *Anuário Estatístico*, Rio de Janeiro, RJ, 2015.
- LIMA, R.G.C.; FERREIRA, O.M. Resíduos industriais – métodos de tratamento e análise de Custos. Universidade Católica de Goiás – Departamento de Engenharia – Engenharia Ambiental, Goiânia – GO, 2007.
- LONDON METAL EXCHANGE-<http://www.lme.com>–Acessado em 03/05/19.
- MAXWELL. *Tecnologia de Auto-Redução*. PUC-Rio, 2009.
- NOLDIN Jr., J.H.; SANCHES, E. O Projeto Tecnoled na Aços Villares. II Workshop de Sustentabilidade do Setor Siderúrgico Brasileiro – Estudo de Caso: Gestão de Resíduos e Coprodutos, Março de 2008.
- ONO, K; NEGORO, T. *The Strategic Management of Manufacturing Business*. Tokyo, Japan, 3A Corporation, 1992.
- PENCHEL JR, S.A.; TAKAYAMA FILHO, T.; DIAS, M.J.; MELLO, L.S. AGREGAÇÃO DE VALOR AO SAL MISTO. XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa & VIII Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology, Goiânia - GO, 20 a 24 de Outubro 2013
- SAATY, T. L. Método de Análise Hierárquica, Makron Books, McGraw-Hill – EMBRATEL, Tradução de Wainer da Silveira e Silva, 1991.
- SAATY, T. L. *Decision Making for Leaders – The Analytic Hierarchy Process for decision in a complex world*. Pittsburgh, PA, EUA, RWS Publication, Third Edition, 2012.
- SANTOS, J.F. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME, SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL- PRODUTO 39 Cadeia do Zinco, 2009.
- SANTOS, J.F. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME, SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL- PRODUTO 16 Perfil do Minério de Zinco, 2010.
- SILVA, D.M.R. Aplicação do Método AHP para avaliação de Projetos Industriais. Tese de Mestrado em Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Março de 2007.

SOUTHWICK, L.M. Still no simple solution to processing EAF dust. Steel Times International, March, 2010.

SOUZA, F. M. C. Decisões racionais em situações de incerteza. 2ª ed. Recife: Ed. Universidade Federal de Pernambuco, 2007.

SCHWAB, B. et al. Imperial Smelting Technology Ready for 100% Secondaries Smelting Engineers International Düsseldorf, Germany, 2005.

TAKAYAMA, T.; MAGALHÃES, W.; SANTOS, F.M. Treatment of Secondary Raw Materials at Juiz de Fora zinc smelter in Brazil. Zinc and Lead, 2015.

United States Securities and exchange Commission. Washington, D.C. 20549 Nexa Resources S.A. Form 20-F, April 3, 2019.

VOTORANTIM METAIS, Relatório anual, 2014.

www.votorantim.com.br/relatotioanual, acessado em 21/05/18).