



UNIFACS

UNIVERSIDADE SALVADOR

LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES*

**UNIFACS UNIVERSIDADE SALVADOR
MESTRADO EM ENERGIA**

ALBERTO ROSSINE ANTUNES ORSINE

**SIMBIOSE INDUSTRIAL: SPL DO ALUMÍNIO PRIMÁRIO AO
COPROCESSAMENTO NA INDÚSTRIA CIMENTEIRA**

Salvador
2015

ALBERTO ROSSINE ANTUNES ORSINE

**SIMBIOSE INDUSTRIAL: SPL DO ALUMÍNIO PRIMÁRIO AO
COPROCESSAMENTO NA INDÚSTRIA CIMENTEIRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação, Mestrado em Energia da UNIFACS Universidade Salvador, Laureate International Universities, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Rodrigues de Araújo.

Salvador
2015

FICHA CATALOGRÁFICA
(Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da Universidade Salvador, Laureate
Internacional Universities)

Orsine, Alberto Rossine Antunes

Simbiose industrial: SPL do alumínio primário ao coprocessamento na indústria cimenteira/ Alberto Rossine Antunes Orsine. – Salvador, 2015.

96 f.: il.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação, Mestrado em Energia da UNIFACS Universidade Salvador, Laureate Internacional Universities, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Rodrigues de Araújo.

1. Spent Pot Lining (SPL). 2. Impactos ambientais. 3 Simbiose Industrial I. Araújo, Paulo Sérgio Rodrigues de Araújo, orient. II. Título.

CDD: 624.4

ALBERTO ROSSINE ANTUNES ORSINE

SIMBIOSE INDUSTRIAL: SPL DO ALUMÍNIO PRIMÁRIO AO
COPROCESSAMENTO NA INDÚSTRIA CIMENTEIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Regulação da Indústria de Energia, Mestrado em Energia da UNIFACS Universidade Salvador, Laureate International Universities, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, à seguinte banca examinadora.

Carlos Moreno dos Santos _____
Mestre em Gestão Integrada de Organizações
pela Universidade do Estado da Bahia - UNEB
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA)

Luizella Giardino Barbosa Branco _____
Doutora em Direito Internacional e da Integração da Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ
UNIFACS Universidade Salvador, Laureate International Universities

Kleber Freire da Silva _____
Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo – USP
UNIFACS Universidade Salvador, Laureate International Universities

Paulo Sérgio Rodrigues de Araújo – Orientador _____
Doutor em Agronomia pela Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" -
Universidade de São Paulo - USP
UNIFACS Universidade Salvador, Laureate International Universities

Salvador, 26 outubro de 2015.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Paulo Sérgio Rodrigues de Araújo, meu mais sincero agradecimento pela solidariedade, paciência e, sobretudo, conhecimento e tempo dedicado à minha orientação, tão valiosos à realização de minha dissertação.

À Professora Dra. Luizella Giardino Barbosa Branco, pela compreensão e solidariedade, em especial, durante situações difíceis enfrentadas.

Ao Prof. Dr. Paulo Sergio de Mello Vieira Rocha pela participação sempre positiva durante meu curso.

À Coordenação e todos os demais professores do Mestrado em Energia – UNIFACS, os meus agradecimentos.

À Maria de Fátima Machado, pela atenção gentil e constante.

Aos amigos e colegas de minha turma de mestrado que também contribuíram para a conclusão deste trabalho e ajudaram a tornar cada aula um instante de aprendizado, dividindo comigo seus conhecimentos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), pela bolsa de estudos a mim concedida.

Aos diversos colegas de trabalho, que ao longo de tantos anos compartilharam comigo seus conhecimentos e experiências na difícil lida em uma fábrica de alumínio.

Ao amigo João Alberto Ramos Martins, engenheiro metalúrgico e ex-colega que com sua vasta e rica vida profissional muito me ajudou, facilitando meu acesso às mais recentes publicações do mundo do alumínio.

À Associação Brasileira do Alumínio (ABAL), a quem me socorri na busca de referências para enriquecer este trabalho.

Aos meus pais, já ausentes, mas sempre presentes em cada etapa de minha vida e hoje em minha memória.

À minha esposa Marcia e filha Patrícia pelo contínuo encorajamento, apoio e, sobretudo, muita paciência para que eu pudesse concluir este mestrado.

Ao filho Alberto e a nora Fabrícia que, embora distantes, sempre me estimularam e, mais do que isto, deram à minha vida uma alegria incomum, pelas netas Mariana e Gabriela.

Ao bom Deus que me permitiu ter todos vocês em meu caminho.

“Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende.” Leonardo da Vinci

RESUMO

Spent Pot Lining (SPL) é um resíduo sólido gerado pela indústria de alumínio primário durante sua produção em células eletrolíticas. Após 5 – 8 anos de operação, os materiais do revestimento catódico deterioram-se, sendo substituídos. No desmonte deste é gerado o resíduo composto de carbono e tijolos refratários e isolantes impregnados por componentes do eletrólito. O SPL é rico em fluoretos solúveis em água e pequenas quantidades de cianetos lixiviáveis, que fizeram com que fosse listado como resíduo perigoso pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos em 1988. No Brasil, de acordo com a NBR 10004, é classificado como um resíduo sólido perigoso – Classe I, sendo considerado como principal problema ambiental na indústria do alumínio, estimando-se que cerca de 50% ainda estejam armazenados de forma inadequada. Os componentes químicos do SPL possibilitam seu uso regulamentado (coprocessamento) na indústria de cimento, como fonte de energia térmica e matérias-primas secundárias. Neste trabalho foi descrito um estudo de caso do impacto ambiental em área em que SPL foi depositado em *landfill* durante duas décadas, sendo monitoradas semanalmente as concentrações de fluoreto e de cianeto, as quais indicaram contaminações e necessidade de mitigação (remoção). A solução foi o transporte à indústria cimenteira para aproveitamento na íntegra. Nas condições do referido caso observou-se que a gestão adequada de SPL caracteriza-se como processo de simbiose industrial, decorrente de sua geração pela indústria de alumínio e coprocessamento pelo cimento Portland, aproveitando-se carbono, (fonte de energia térmica na etapa de clinkerização), além dos diversos óxidos (alumínio, ferro, cálcio, silício) e fluoretos, minimizando os passivos ambientais, preservando recursos naturais e cumprindo a destinação adequada, resguardando-se as especificações técnicas.

Palavras-chave: *Spent Pot Lining* (SPL). Impactos ambientais. Simbiose Industrial.

ABSTRACT

Spent Pot Lining (SPL) is a solid waste produced by the aluminium industry during the manufacture of aluminium metal in electrolytic cells. After years of operation, the cathode liner materials deteriorate and affect the cell's performance and need to be replaced. The waste cathode lining consists of a carbon part and a refractory part. SPL contains water-soluble fluorides and small amounts of leachable cyanides. Due to the high fluoride and cyanide content SPL was listed as hazardous waste by the US Environmental Protection Agency in the year 1988. In Brazil, according to the Brazilian Standards NBR 10004, the SPL is listed as a hazardous waste (K088) content of cyanide. SPL is indicated as the major environmental problem in the aluminium industry. The lining during operation of the cells, is subject to strong reducing conditions and fails by a variety of mechanisms depending on how the cell was projected, constructed, designed and operated. Based on current production levels, it is estimated that a significant amount of SPL (more than 50 %) is still stored in buildings lined or unlined sites, waiting for treatment. SPL can be used by cement industry. There are advantages to the cement process as SPL has a reasonable calorific value and fluorides reduce the kiln temperature. The technological requirements of this industry make it particularly well suited to the use of fuels made from waste. Such fuels must be characterized by a suitable amount of chemical energy, which depends on the nature of the components and on the organic matter content. This work presents a case study of environmental impact on the area in which SPL was landfilled for about 18 years. During this period of time the fluoride and cyanide concentrations were measured on a weekly basis. It was observed that the fluoride and cyanide concentrations were increasing and exceeding the allowed limits. A study was conducted to assess the extent of the impact. It was found that the landfill was not working properly. As a first action for remediation it was determined a complete removal of the landfill and its transportation to the cement industry for use in full. In respect to this case it was observed that the proper management of SPL is characterized as industrial symbiosis process, since is generated by the aluminum industry and co-processing by Portland cement, where carbon content works as a source of secondary energy and the other components (oxides of aluminum, iron, calcium, silicon) and fluorides as secondary raw materials, minimizing environmental liabilities and preserving natural resources.

Keywords: Solid waste. Spent Pot Lining (SPL). Industrial Symbiosis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma simplificado do processo Bayer	27
Figura 2 - Linha de fornos com anodo tipo precozido	28
Figura 3 - Sistema de tratamento de gases a seco	29
Figura 4 - Esquema de forno com anodo Soderberg	30
Figura 5 - Esquema de forno com anodo precozido.....	30
Figura 7 - Caso de rachadura no catodo.....	38
Figura 8 - Hierarquia de sustentabilidade no tratamento de resíduos.....	47
Figura 9 - PDCA para Plano de Gerenciamento de Resíduos	48
Figura 10 - Fluxograma de Gerenciamento de Resíduos com etapas do PGR	49
Figura 11 - Etapas da fabricação do cimento Portland.....	54
Figura 12 - Evolução da estrutura do consumo das fontes primárias da energia térmica no processo produtivo do cimento Portland.....	55
Figura 13 - Distribuição das fábricas de cimento Portland no Brasil em 2011	61
Figura 14 - Esquema de um forno de anodo precozido	63
Figuras 15 - Landfill visto da rua lateral.....	69
Figuras 16 - Landfill visto da rua topo	69
Figura 17 - Localização dos poços piezométricos.....	70
Figura 18 - Distribuição dos poços perfurados a trado.....	75
Figura 19 - Primeiro corte feito no landfill.....	78
Figura 20 - Quando 25% do total da remoção foram alcançados	78
Figura 21 - Progresso do desmonte do landfill e depósito temporário em pátio pavimentado.....	79
Figura 22 - Quando todo o landfill foi removido.....	79
Figura 23 - Mudança do processo linear para o o processo linear circular	84

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Produção mundial do alumínio primário entre os anos 2000 e 2014 em milhões de toneladas	32
Gráfico 2 - Concentrações de Cianeto no poço piezométrico 1 (PM 1).....	71
Gráfico 3 - Concentrações de Cianeto no poço piezométrico 2 (PM 2).....	71
Gráfico 4 - Concentrações de Cianeto no poço piezométrico 3 (PM 3).....	72
Gráfico 5 - Concentrações de Fluoreto no poço piezométrico 1 (PM).....	72
Gráfico 6 - Concentrações de Fluoreto no poço piezométrico 2 (PM 2).....	73
Gráfico 7 - Concentrações de Fluoreto no poço piezométrico 3 (PM 3).....	73
Gráfico 8 - Consumo de energia na produção de alumínio primário	81
Gráfico 9 - Emissões de Fluoretos em kg F ⁻ /t Al	82
Gráfico 10 - emissões de PFC's, em kg CO ₂ /t Al para diferentes tecnologias de fornos	83

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Produção e reservas de bauxita (Mt)	24
Quadro 2 - Etapa/Descrição do processo Bayer	26
Quadro 3 - Insumos para a produção de uma tonelada de alumina.....	27
Quadro 4 - Componentes do forno com anodo precozido.....	31
Quadro 5 - Propriedades típicas dos tijolos isolantes.....	34
Quadro 6 - Principais propriedades dos tijolos refratários.....	35
Quadro 7 - Classificação da pasta catódica	35
Quadro 8 - Comparação qualitativa das propriedades de três tipos de blocos catódicos	37
Quadro 9 - Três composições do SPL	40
Quadro 10 - Componentes e suas concentrações no SPL	41
Quadro 11 - Classificação dos Resíduos sólidos	46
Quadro 12 - Sequência das etapas do PGR	48
Quadro 13 - Sumário das diversas etapas de fabricação do cimento Portland.....	54
Quadro 14 - Marcos Regulatórios do Processamento de Resíduos.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção mundial de cimento em 2011	56
Tabela 2 - Três composições do SPL	63
Tabla 3 - Composição química de argilas	64
Tabela 4 - Faixa de Concentração do Cianeto no extrato solubilizado em mg/L.....	76
Tabela 5 - Faixa de Concentração do Fluoreto no extrato solubilizado em mg/L.....	77
Tabela 6 - Volumes extraídos do desmonte do landfill.....	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
ABCP	Associação Brasileira do Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CBA	Companhia Brasileira de Alumínio
CRA	Centro de Recursos Ambientais
DC	Direct Current (em inglês) ou corrente contínua
EPA	Environmental Protection Agency
EPI	Equipamento de Proteção Individual
FIRJAN	Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro
GJ	Gigajoules
HPA	Hidrocarboneto Poliaromático
IAI	International Aluminium Institute
Iclei	International Council for Local Environmental Initiatives
Ipea	Instituto de Pesquisa Econômica e Aplicada
ISO	International Organization Institute
kA	quiloampères
Kg SPL/t Al	quilograma de SPL por tonelada de alumínio
MJ/kg	Megajoule por quilograma
MMA	Ministério do Meio Ambiente
Mpa	Mega Pascoal = 10,1972 kgf/cm ²
Mt	Milhares de toneladas
MWh	Megawatt-hora
MWh/t Al	Megawatt hora por tonelada de alumínio
NBR	Denominação de Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)
PFC	Polifluorcarbono
PGR	Plano de Gerenciamento de Resíduos
PGRS	Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos
pH	potencial hidrogeniônico
PMSI	Programa Mineiro de Simbiose Industrial
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
ppm	parte por milhão

SGA	Sistema de Gestão Ambiental
SNIC	Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento
SNVS	Sistema Nacional de Vigilância Sanitária
SPL	Spent Pot Lining
Suasa	Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária
USEPA	United States Environmental Protection Agency
W/m °C	Watt por metro e por Celsius.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.2 OBJETIVOS	20
1.2.1 Objetivo Geral	20
1.2.2 Objetivos Específicos	20
2 PRODUÇÃO DO ALUMÍNIO	23
2.1 MINERAÇÃO DA BAUXITA	23
2.2 PROCESSO BAYER	25
2.3 PROCESSO HALL-HÉROULT	28
3 O CATODO	33
3.1 CARCAÇA	33
3.2 TIJOLOS ISOLANTES	34
3.3 TIJOLOS REFRAATÓRIOS	34
3.4 PASTA CATÓDICA	35
3.5 BLOCOS CATÓDICOS	36
3.6 BARRAS COLETORAS	38
4 SPENT POT LINING - SPL	39
4.1 COMPOSIÇÃO DO SPL	39
4.2 SPL COMO RESÍDUO PERIGOSO	41
5 RESÍDUOS SÓLIDOS E LEGISLAÇÕES ESPECÍFICAS	43
5.1 DEFINIÇÕES	44
5.2 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS	45
5.3 DIRETRIZES APLICÁVEIS AOS RESÍDUOS SÓLIDOS	46
5.4 IMPLANTAÇÃO DE PLANO DE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS (PGR) ...	47
6 INDÚSTRIA DE CIMENTO PORTLAND E COPROCESSAMENTO DE RESÍDUOS	52
6.1 MATÉRIAS-PRIMAS PARA A FABRICAÇÃO DE CIMENTO PORTLAND	52
6.2 ETAPAS DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CIMENTO PORTLAND	53
6.3 ENERGIA NA FABRICAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND	55
6.4 COPROCESSAMENTO: UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO SUBSTITUTOS DE COMBUSTÍVEIS E MATÉRIAS-PRIMAS	56
6.5 CRITÉRIOS TÉCNICOS PARA O USO DOS COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS	59
6.6 BENEFÍCIOS DO GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS PERIGOSOS EM FORNOS DE CIMENTO PORTLAND	60

6.7 COPROCESSAMENTO DO SPL NA FABRICAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND	61
7 RELATO DE CASO	66
7.1 BREVE HISTÓRICO	66
7.2 CONSTRUÇÃO DO LANDFILL	68
7.3 MONITORAMENTOS DE CIANETO E FLUORETO NOS POÇOS PIEZOMÉTRICOS.....	70
7.4 AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL	74
7.5 AMOSTRAGENS DO SOLO	74
7.6 DESMONTE E REMOÇÃO DO LANDFILL	77
8 GESTÃO DE CERTOS ASPECTOS AMBIENTAIS NO PROCESSO HALL-HÉROULT	80
8.1 PRODUÇÃO MAIS LIMPA NA INDÚSTRIA DO ALUMÍNIO PRIMÁRIO.....	80
8.2 SIMBIOSE INDUSTRIAL NA GESTÃO DO SPL.....	83
8.3 VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS	85
8.4 PROGRAMA MINEIRO DE SIMBIOSE INDUSTRIAL - PMSI, UM EXEMPLO DE PROGRAMA DE SIMBIOSE INDUSTRIAL	86
9 CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
REFERÊNCIAS.....	91

1 INTRODUÇÃO

A partir da década de 1950, quando houve significativa expansão do setor produtivo, deu-se também início elevada geração de resíduos no setor industrial. Foi quando a sociedade começou a desenvolver sua consciência ecológica. Produzir sem afetar a natureza tornou-se um desafio que cresce com o passar do tempo. Ciência, mudança de gestão e hábitos têm se tornado alternativas aos problemas em decorrência dos processos da industrialização.

A indústria do alumínio primário parece ser bom exemplo para esta situação. Embora seja considerada uma indústria jovem, quando comparada às de outros metais, pois tem pouco mais de cem anos, apresenta seus fundamentos ainda similares àqueles do seu surgimento, ainda que grandes avanços sejam verificados em: qualidade de infraestrutura, matérias-primas, menor consumo de energia, menores emissões de gases do efeito estufa e geração e destinação de resíduos, dentre outros.

O alumínio é atualmente o segundo metal mais produzido no mundo, sendo superado apenas pelo o aço. É, portanto, o metal não ferroso mais largamente produzido. Em 2014 sua produção mundial atingiu 53,3 milhões de toneladas, enquanto no ano 2000 foi de 24,6 milhões de toneladas, ou seja; em apenas quatorze anos sua produção mais que dobrou (IAI, 2015).

Crescimento produtivo tão vertiginoso se encontra amparado nas diversas aplicações do alumínio, como transporte da energia elétrica, transportes aéreo, férreo, rodoviário e marítimo, embalagens, construção civil, eletrodomésticos e eletroeletrônicos, dentre outras (KVANDE, 2011).

A indústria do alumínio primário está, ao longo de toda sua cadeia produtiva, diretamente ligada a impactos ambientais significativos. Atualmente, produzir uma tonelada de alumínio primário significa, em média, quatro toneladas de bauxita seca, (minério do qual a alumina é extraída), duas toneladas de alumina, 400,0 Kg de carbono, 20,0 Kg de fluoreto de alumínio, 2,0 Kg de criolita e 14,5 MWh de energia elétrica. Este consumo de energia era de 16,951 MWh/tAl em 1980 (IAI, 2015). Outros aspectos ambientais relevantes são as emissões de gases e geração de resíduos.

Na última etapa da produção de alumínio primário, pelo processo *Hall-Hèroult*, ocorre geração do resíduo denominado Spent Pot Lining (SPL), que tem sua origem quando o catodo do forno, onde se processa a eletrólise, atinge um estágio de desgaste e necessita ser reformado. O resíduo gerado na reforma dos catodos dos fornos, onde o alumínio é produzido, contem concentrações de fluoreto e cianeto que lhes conferem as características de resíduo classe I- perigoso (ABNT, 2004).

Esforços feitos pelos grandes produtores mundiais de alumínio têm redundado na diminuição das quantidades geradas de SPL, atualmente estimada entre 22 e 25 quilogramas por tonelada de alumínio produzida (PAWLEK, 2012).

Segundo Holywell e Breault (2012, p. 1441), a geração de SPL em fornos de tecnologia mais defasada, com anodo do tipo Soderberg, chega a atingir até a 35 quilogramas por tonelada de alumínio produzido (Kg SPL/t Al). Vários fatores contribuíram para esta diminuição, indo desde a qualidade operacional, melhorias na qualidade dos materiais empregados, projetos mais refinados dos fornos atuais e, sobretudo, avanços nas tecnologias inerentes ao processo.

No começo da produção do alumínio primário, via processo *Hall-Hèroult*, os resíduos gerados durante a demolição dos fornos, SPL, tinham como destinos os rios, mares e depósitos a céu aberto sobre o solo e sem nenhuma preparação prévia deste. Posteriormente, vieram os depósitos em aterros industriais, aqui denominados landfills, construídos com alguma segurança inicial, mas que se dissipava com o passar do tempo, principalmente por estarem expostos aos elementos da natureza, além do desgaste dos materiais utilizados em suas construções (TURNER; BINNING; SLOAN, 2008).

Em seguida aos aterros, vieram edificações projetadas para abrigo e guarda mais seguros do SPL. A construção e a manutenção destes equipamentos são de custos elevados, e a geração do SPL é um processo que ocorre continuamente, durante toda a existência da unidade produtora do alumínio primário.

Em 1988, o SPL foi declarado, nos Estados Unidos, resíduo perigoso pela *Environmental Protection Agency (EPA)*, em virtudes dos teores de cianeto e fluoreto presentes (CHANANIA; EBY, 2000).

No Brasil o SPL é classificado como resíduo perigoso, classe I, pela Norma técnica Brasileira NBR 10004, principalmente por conter quantidades tóxicas de cianetos (ABNT, 2004).

Desde o início da década de 1980 que muitos esforços têm sido aplicados para o desenvolvimento de um processo satisfatório para o tratamento do SPL. Os processos desenvolvidos, até então, são muito diversos e frequentemente baseados em: tratamento em altas temperaturas, transformação em insumos para outras indústrias ou a recuperação dos valores de fluoreto e carbono para a própria indústria de alumínio (YOUNG; NORDWICK; FOOTE, 2001).

Diversas pesquisas foram iniciadas nos principais países produtores de alumínio primário, visando à utilização do SPL em outros segmentos industriais. Dentre tais segmentos a indústria do cimento se mostrou como um caminho possível e adequado no Brasil, visto que os componentes do SPL são desejáveis à produção de cimento, que por sua vez é um produto de alta demanda no país.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Discorrer em relato de caso sobre o uso do SPL em coprocessamento na indústria de cimento.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Caracterizar a capacidade calorífica inerente ao SPL em substituição de combustíveis no forno de cimento;
- b) Utilizar os componentes do SPL como insumos na produção do clínquer;
- c) Discutir a minimização de impactos negativos e passivos ambientais inerentes à produção do alumínio primário.

Este trabalho está estruturado em sete Capítulos. O Capítulo 2 aborda a cadeia produtiva do alumínio primário, que se inicia na mineração da bauxita, de onde se extrai óxido de alumínio (Al_2O_3), mais conhecido como alumina. Esta etapa se dá através do Bayer. A alumina é a matéria-prima usada na obtenção do alumínio metálico via processo *Hall-Hèroult*, que se passa em uma célula eletrolítica (também chamada forno) mediante alto consumo de energia elétrica. A célula eletrolítica é

formada por três partes (anodo, banho eletrolítico e catodo). O anodo fornece o carbono para o processo. No banho eletrolítico acontecem diversas reações químicas a altas temperaturas. A composição química do banho é ligeiramente variável, mas, sobretudo predominam compostos à base de fluoretos, principalmente a Criolita ($3\text{NaF}\cdot\text{AlF}_3$), que possibilita o processo eletrolítico à aproximadamente 960°C . O terceiro componente da célula eletrolítica é o catodo, considerado por muitos como a principal parte do forno.

No Capítulo 3 está a descrição das principais partes do catodo, inclusive tabelas das principais características de importantes componentes. O catodo é continuamente, ao longo de toda sua vida útil, submetido a fortes agentes estressores (ataques químicos, altas temperaturas e condições operacionais adversas). Após algum tempo em operação o catodo vem a falhar e sua reforma deve ser feita. Produtores de alumínio vêm desenvolvendo muitos esforços para alongar ao máximo a vida do catodo. Isto significa melhor desempenho financeiro e menor geração de SPL.

O Capítulo 4 tem como foco o SPL, resíduo gerado na demolição do catodo e que contem uma pequena fração de Cianetos (1%) e uma fração rica em Fluoretos (20 %). No Brasil, está listado como resíduo perigoso, Classe I.

O Capítulo 5 aborda os resíduos sólidos no Brasil a partir de algumas legislações pertinentes e Normas Técnicas. Tais instrumentos não apenas disciplinam o assunto resíduo, mas servem como orientação para a disposição e destinação seguras. O coprocessamento de resíduos sólidos perigosos tornou-se atividade legal e benéfica, pois proporciona a preservação de recursos naturais, oferecendo alternativas através do uso do teor energético e matérias-primas secundárias, além de ajudar na eliminação de passivos ambientais. A indústria de cimento Portland, no Brasil e em outros países, é uma opção viável e segura para o gerenciamento de resíduos sólidos perigosos.

O Capítulo 6 trata da fabricação do cimento Portland e alguns aspectos técnicos que tornam este segmento industrial um meio seguro para a destinação de algum resíduo sólido perigoso. O SPL por ter razoável poder calorífico, devido ao carbono, também fornece outros componentes que atuam como matérias-primas secundárias no processo produtivo do cimento Portland.

No Capítulo 7 está um estudo de caso, em que o SPL esteve disposto de forma inadequada nos primeiros dez anos de operação de uma fábrica de alumínio. Em seguida, este resíduo foi transferido para um *landfill* construído e dotado de mecanismos de controle de seu funcionamento. Falhas vieram a ser detectadas e um estudo mais específico apontou a contaminação no solo da área utilizada. A ação inicial para a remediação da área contaminada foi o completo desmonte do *landfill*. Todo o material retirado, incluindo aquele utilizado na construção, foi destinado à indústria de cimento, onde foi coprocessado.

O Capítulo 8 se refere a certos aspectos ambientais relevantes decorrentes do processo *Hall-Hèroult* (alto consumo de energia elétrica, emissões de fluoretos, emissões de perfluorcarbonos (PFC's) e a geração de SPL). A relevância nesse Capítulo 8 encontra-se nos princípios modernos de gestão ambiental, destacando-se a Produção Mais Limpa aplicada às reduções do consumo de energia e emissões atmosféricas. O coprocessamento do SPL na indústria de cimento é exemplo da Simbiose Industrial e Valorização Energética de Resíduos. Faz parte também, deste capítulo 8, o Programa Mineiro de Simbiose Industrial (PMSI).

2 PRODUÇÃO DO ALUMÍNIO

O alumínio é o terceiro elemento mais abundante da crosta terrestre e o segundo metal mais produzido pelo homem, sendo superado apenas pelo ferro em seu uso industrial. Devido a sua alta afinidade com o oxigênio, o alumínio não é encontrado na natureza em sua forma elementar, mas sempre combinado com outros elementos. A obtenção do alumínio primário ocorre a partir de dois processos industriais que se passam de forma independente um do outro. O primeiro, denominado Processo Bayer, destina-se à fabricação do óxido de alumínio (Al_2O_3) também conhecido como alumina. O segundo processo, denominado Processo Hall-Hérout, serve para a obtenção do alumínio primário, símbolo Al. Por alumínio primário entende-se o alumínio metálico obtido através do processo *Hall-Hérout*. Esta designação serve para diferir do alumínio secundário que é obtido a partir de sucatas do metal alumínio (KVANDE, 2011).

2.1 MINERAÇÃO DA BAUXITA

O minério que dá origem à extração metalúrgica do alumínio é a bauxita, que é uma mistura natural de óxidos de alumínio, sendo que seu principal componente é o óxido de alumínio, Al_2O_3 . A bauxita contém também sílica, óxido de ferro, dióxido de titânio, silicato de alumínio e outras impurezas em quantidades menores. A bauxita é classificada tipicamente de acordo com a aplicação comercial (abrasivos, cimento, produtos químicos, metalúrgicos e material refratário entre outros). A maior parte da extração mundial de bauxita, em torno de 90%, é usada como matéria-prima para a fabricação de alumina por lixiviação química, método conhecido como processo Bayer. A grande parte da alumina produzida a partir deste processo de refinamento é, por sua vez, empregada como a matéria-prima para a produção de alumínio primário (BERGSDAL; STROMMAN; HERTWICH, 2004; LUO; SORIA, 2007).

A mineração da bauxita tem sido verificada em quatro grupos climáticos: Tropical com 48%, Mediterrâneo (39%), Subtropical (13%) e Temperado (0,5%). As reservas atualmente conhecidas de bauxita são bastante substanciais, sendo estimado que sejam capazes de suprir as necessidades mundiais para os próximos

300 anos (IAI, 2003). O Brasil tem a terceira maior jazida de bauxita, também sendo seu terceiro maior produtor (Quadro 1), (U. S. GEOLOGICAL SURVEY, 2014).

Quadro 1 - Produção e reservas de bauxita (Mt)

Pais produtor	Produção em 2012	Produção em 2013	Reservas
Estados Unidos	Não informado	Não informado	20.000
Austrália	76.300	77.000	6.000.000
Brasil	34.000	34.200	2.600.00
China	47.000	47.000	830.000
Grécia	2.100	2.000	600.00
Guiné	17.800	17.000	7.400.000
Guiana	2.210	2.250	850.000
Índia	19.000	19.000	540.000
Indonésia	29.000	30.000	1.000.000
Jamaica	9.340	9.500	2.000.000
Kazakstão	5.170	5.100	160.000
Rússia	5.720	5.200	200.000
Suriname	3.400	3.400	580.000
Venezuela	2.000	2.500	320.000
Vietnam	100	100	2.100.000
Outros	34.900	34.800	2.400.000
Total	258.000	259.000	28.000.000

Fonte: Adaptado de U. S. Geological Survey (2014, p. 27).

As reservas mundiais de bauxita e os volumes minerados aumentam à medida que o mercado requer mais alumínio, contribuindo para a depleção dos recursos naturais. O impacto ambiental mais imediato da mineração da bauxita é o distúrbio do habitat e uso do solo. No Brasil, aproximadamente 90% da bauxita minerada ocorrem em minas superficiais, requerendo a remoção da parte superior do solo. Atualmente, esta camada superior é removida e estocada para posterior retorno ao local original, na fase de reabilitação da área degradada (ABAL, 2012, p. 42).

A indústria de mineração promove o uso temporário da terra, devolvendo-a recuperada com a utilização de técnicas de manejo essenciais para o solo após a lavra. As operações de mineração de bauxita no Brasil têm como meta recuperar as áreas mineradas, cumprindo as leis vigentes, retornando-as às condições pré-

operação, de modo a se tornarem ecossistemas autossustentáveis e que possibilitem usos da terra que atendam aos interesses das comunidades locais. As áreas de extração da bauxita se beneficiam do processo de reabilitação da fauna e flora nativas. As empresas desenvolvem programas próprios de plantios, com viveiros de produção de mudas, para recuperar ao máximo a biodiversidade de cada região onde a unidade fabril está instalada (ABAL, 2012).

A indústria brasileira do alumínio tem obtido o reconhecimento por diversas iniciativas derivadas da aplicação de políticas e práticas de elevado padrão, visto que, hoje, 85% das áreas mineradas de bauxita no Brasil já foram reabilitadas e devolvidas, na quase totalidade, ao seu uso original, a maioria com vegetação nativa, e os 15% restantes ainda estão sendo lavrados ou possuem instalações permanentes (ABAL, 2012).

2.2 PROCESSO BAYER

O Processo Bayer, sumarizado no Quadro 2, foi inventado e patenteado em 1887, pelo cientista austríaco Karl Josef Bayer. Duas a três toneladas de bauxita, a depender das características, são necessárias para produzir uma tonelada de alumina. Cerca de 90% do fornecimento de alumina global, são usados na produção de alumínio primário. As refinarias de alumina tendem a ser localizadas perto de minas de bauxita e/ou portos, visando menores custos de transporte de matérias-primas e produto final. A alumina também é utilizada em outras aplicações industriais, como cerâmicas, lixas, pigmentos, cosméticos e produtos farmacêuticos. O processo Bayer é o meio mais econômico de obtenção de alumina a partir da bauxita. Outros processos para obtenção de alumina a partir de minérios metálicos também estão em uso em algumas refinarias, particularmente na China e na Rússia, embora estes constituam percentagem relativamente pequena da produção global (ABAL, 2008; IAI, 2012).

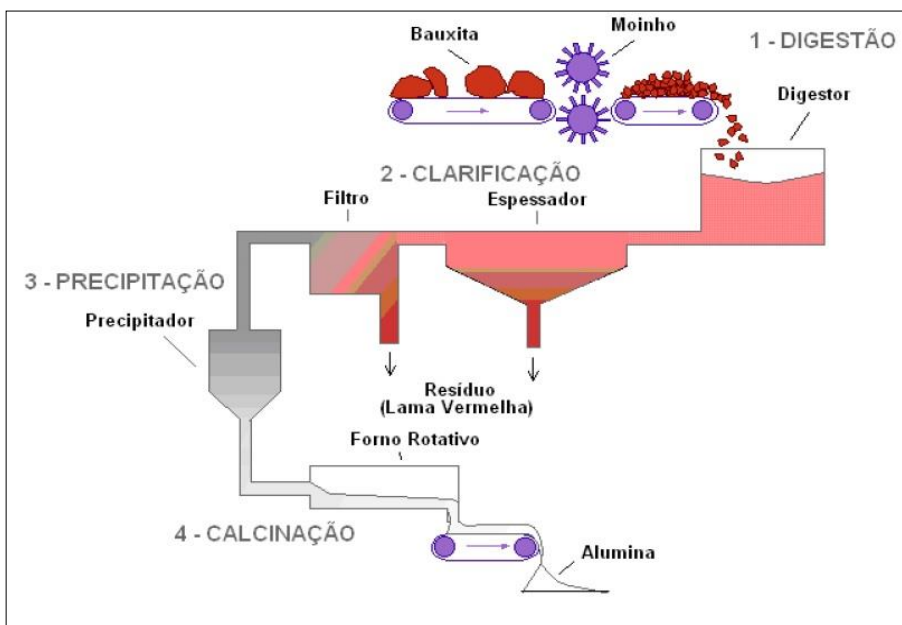
Quadro 2 - Etapa/Descrição do processo Bayer

Etapa	Descrição sumarizada
Moagem	A bauxita é lavada e moída, para redução do tamanho das partículas e aumento da área de superfície para a etapa de digestão. Cal e soda cáustica são adicionadas nesta etapa de modo a se formar uma pasta bombeável;
Digestão	Solução quente de soda cáustica (NaOH) é utilizada para dissolver os minerais que contêm alumínio na bauxita (gibbsite, böhemite e diásporo), para formar uma solução supersaturada de aluminato de sódio, também chamada "licor". As condições dentro do digestor (concentração cáustica, temperatura e pressão) são definidas de acordo com as propriedades do minério da bauxita. Minérios com um alto teor de gibbsite podem ser processados a 140°C, enquanto as bauxitas böhemitic requerem temperaturas entre 200 e 280° C.
Clarificação/ Sedimentação	A primeira etapa da clarificação é a separação dos sólidos (resíduos da bauxita) a partir do licor e por meio de sedimentação. Aditivos químicos (floculantes) são adicionados para auxiliar o processo de sedimentação. Os resíduos da bauxita depositam-se no fundo dos tanques de sedimentação, para em seguida serem transferidos para os tanques de lavagem, onde são submetidos a uma série de etapas de lavagem para a recuperação da soda cáustica, a ser reutilizada no processo de digestão.
Precipitação	Neste estágio, a alumina é recuperada por cristalização a partir do licor, que é supersaturado em aluminato de sódio. O processo de cristalização é conduzido por arrefecimento gradual do licor, resultando na formação de pequenos cristais de hidróxido de alumínio, Al(OH) ₃ , comumente conhecido como "hidrato", que, em seguida, crescem e se aglomeram para formar cristais maiores.
Evaporação	O licor em uso é aquecido através de uma série de trocadores de calor para em seguida ser resfriado em uma série de tanques intermitentes. O condensado formado nos aquecedores é reutilizado no processo, como a lavagem por exemplo. A soda cáustica permanente é lavada e reciclada de volta para o processo de digestão.
Classificação	Os cristais formados na precipitação são classificados em faixas de tamanho (granulometria). Isso normalmente é feito usando ciclones ou tanques de classificação por gravidade. Os cristais maiores em tamanho são destinados à calcinação, após terem sido separados, enquanto que aqueles mais finos, após terem sido lavados para remoção de impurezas orgânicas, são devolvidos para a fase de precipitação como semente de aglomerante.
Calcinação	Os cristais de maior granulometria, obtidos na etapa anterior (Classificação), são alimentados em calcinadores com temperatura de até 1100 °C, para desidratação e retirada da água ligada quimicamente, produzindo sólidos de alumina. A equação seguinte descreve a reação de calcinação: $2\text{Al}(\text{OH})_3 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{O}.$ Alumina, um pó branco, é o produto final do processo Bayer, pronto para ser enviado para reduções de alumínio primário e/ou a indústria química.

Fonte: Adaptado de IAI (2012).

As etapas do sistema produtivo da alumina são mostradas na Figura 1, com destaque para: Digestão, Clarificação, Precipitação e Classificação.

Figura 1 - Fluxograma simplificado do processo Bayer



Fonte: World Aluminium Organization (WAO, 2015).

O processo Bayer envolve intensa movimentação de material. Além da grande massa de bauxita e outros insumos utilizados, alto consumo de energia utilizada na geração de vapor, produção de ar comprimido, calcinação e bombeamento de materiais (ABAL, 2008). Os principais insumos utilizados no processo Bayer estão compilados no Quadro 3.

Quadro 3 - Insumos para a produção de uma tonelada de alumina

Bauxita	1,85 a 3,4t
Cal	10 a 50 kg
Soda Cáustica	40 a 140 kg
Vapor	1,5 a 4,0t
Óleo Combustível para calcinação	80 a 130 kg
Floculante sintético	100 a 1000kg
Energia Elétrica	150 a 400kWh
Produtividade	0,5 a 3,0 Hh (Homem hora)
Água	0,5 a 2,0m ³

Fonte: Adaptado de ABAL (2010).

2.3 PROCESSO HALL-HÉROULT

O processo *Hall-Héroult* foi desenvolvido em 1886, de forma independente pelo americano Charles Martin Hall e o francês Paul Héroult, é o único método industrial para a produção do alumínio primário. Envolve a passagem de uma grande corrente elétrica através de uma mistura fundida de criolita ($3\text{NaF}\cdot\text{AlF}_3$), alumina (Al_2O_3) e fluoreto de alumínio (AlF_3), para se obter o alumínio líquido e puro. Corrente contínua (DC), a uma amperagem de até 600 kA, alimenta uma linha de cubas eletrolíticas ligadas em série, ou linha de fornos, como é conhecida nas plantas de alumínio (Figura 2). Embora os fornos e as linhas de produção variem em tamanho e configuração, de uma planta para outra, o processo eletroquímico fundamental é idêntico (IAI, 2015).

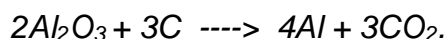
Figura 2 - Linha de fornos com anodo tipo precozido



Fonte: IAI (2015a).

Cada cuba é um grande recipiente de metal revestido de carbono e tijolos isolantes e refratários, formando o eletrodo negativo (catodo) da cuba eletrolítica. Normalmente, o tempo de vida do revestimento do catodo pode durar entre 1000 e 2500 dias, antes que necessite ser substituído. A cuba contém o banho eletrolítico (eletrólito) de criolita fundida, (Na_3AlF_6), mantido a uma temperatura entre 960-980 °C, em que a alumina (Al_2O_3) é dissolvida. Fluoreto de alumínio (AlF_3) é adicionado à solução para a manutenção da relação $3\text{NaF}/\text{AlF}_3$. Grandes blocos de carbono, suspensos e parcialmente mergulhados no banho eletrolítico, atuam como eletrodos positivos (anodos). A corrente elétrica passa dos anodos de carbono, através do banho, para o catodo do forno seguinte, em uma linha eletricamente ligada em série.

À medida que a corrente elétrica passa através da solução, a alumina dissolvida é dividida em alumínio fundido (Al) e oxigênio (O₂). O oxigênio consome o carbono dos blocos de anodo para formar dióxido de carbono. A reação eletrolítica resultante pode ser expressa de acordo com Kvande (2011), conforme segue:



A alta reatividade dos átomos de alumínio requer significativa quantidade de energia, sob a forma de energia elétrica, para dividir a alumina (Al₂O₃) nos seus elementos constituintes. Além do dióxido de carbono, o processo de produção de alumínio primário também produz fluoreto de hidrogênio (HF). Estações de tratamento deste gás (Figura 3), denominadas *dry scrubber*, são empregadas para capturar o HF e reciclá-lo como fluoreto de alumínio, para utilização no processo eletrolítico. Estas plantas também são utilizadas para remover outros subprodutos gasosos, tais como o dióxido de enxofre, reduzindo, assim, as emissões para o meio ambiente. Também atuam na retenção dos materiais sólidos gerados no processo, através de um conjunto de filtro de mangas (KVANDE, 2011).

Figura 3 - Sistema de tratamento de gases a seco

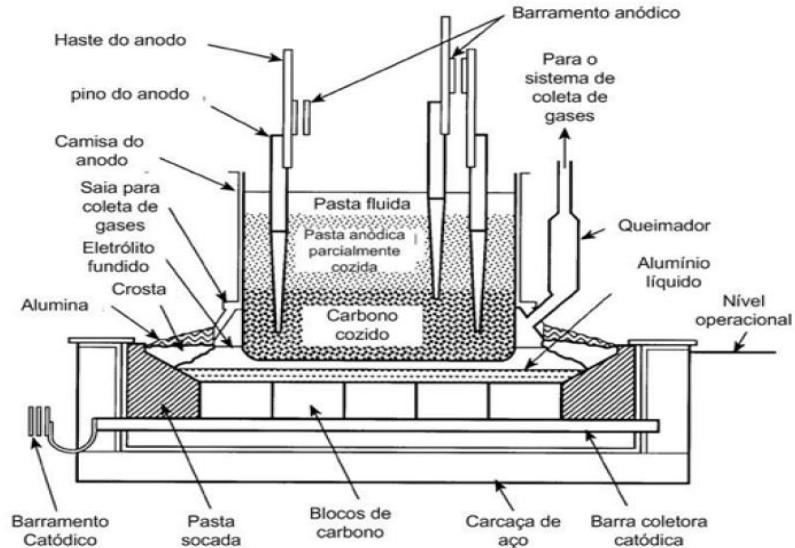


Fonte: Gulf Aluminium Council (2015).

Existem dois tipos de tecnologia de fornos para a redução da alumina: Fornos com anodo Soderberg e fornos com anodo precozido. A tecnologia Soderberg utiliza um anodo contínuo, onde a pasta anódica, uma mistura de piche e coque de petróleo, alimenta o anodo à medida que este é consumido. O cozimento do anodo

ocorre no próprio forno. Na Figura 4, um esquema de forno com anodo do tipo Soderberg (ABAL, 2010b).

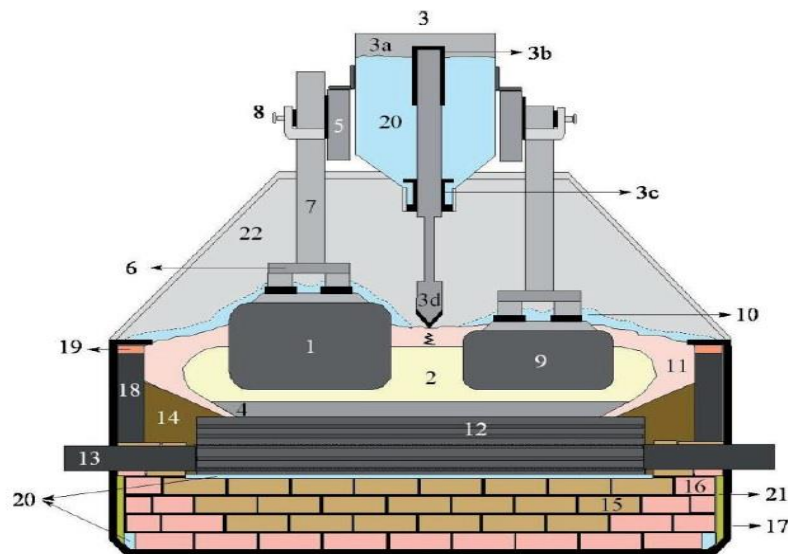
Figura 4 - Esquema de forno com anodo Soderberg



Fonte: ABAL (2010b).

A tecnologia com anodo precozido, Figura 5, utiliza anodos múltiplos em cada célula, que são cozidos numa instalação separada. Novos anodos substituem os anodos gastos. A tecnologia com anodos precozidos é mais recente e proporciona melhores desempenhos.

Figura 5 - Esquema de forno com anodo precozido



Fonte: Adaptado de Parhi (2014).

Os principais componentes do forno com anodo pré-cozido (Figura 5) estão sumarizados no Quadro 4.

Quadro 4 - Componentes do forno com anodo precozido

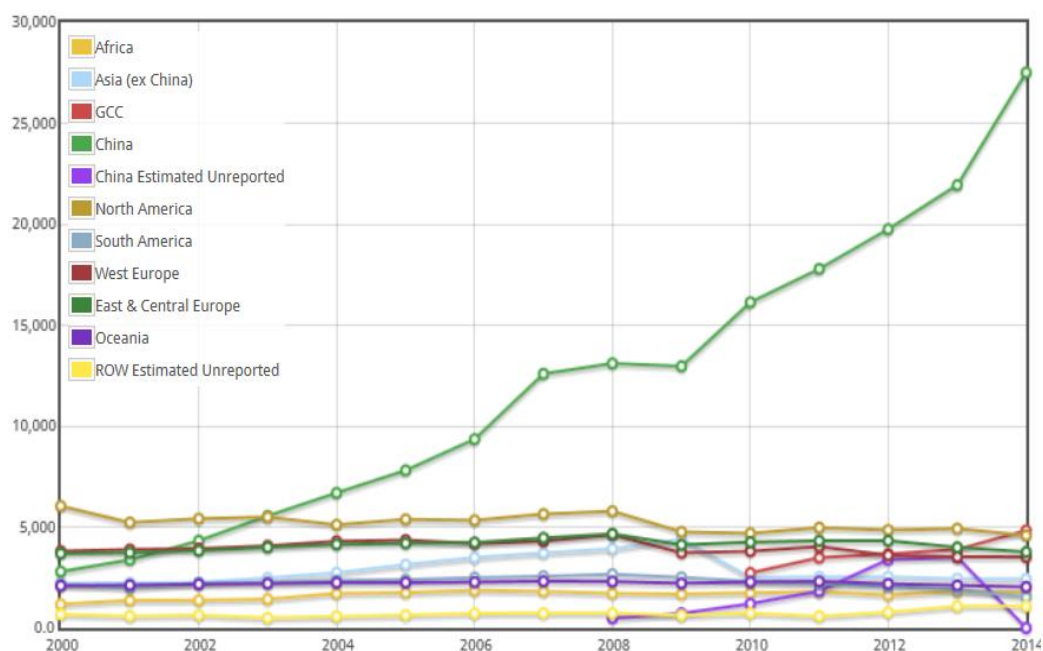
1	Anodo precozido	12	Bloco catódico
2	Banho eletrolítico	13	Barra coletora de corrente
3	Sistema de alimentação da alumina	14	Pasta de socagem
4	Alumínio líquido	15	Tijolos refratários
5	Barramento elétrico	16	Tijolos isolantes
6	Garfo	17	Carcaça de aço
7	Haste	18	Blocos laterais
8	Grampos	19	Massa refratária
9	Anodo gasto	20	Alumina para isolamento
10	Crosta de cobertura	21	Manta isolante
11	Crosta lateral	22	Coletor de gases

Fonte: Adaptado de Pahri (2014).

O alumínio é um metal de baixa densidade, mas resistente e excelente condutor elétrico. Embora se oxide facilmente, ele é resistente à corrosão, visto que sua superfície é apassivada no ar pela formação de um filme de óxido estável. Sua baixa densidade, sua alta disponibilidade e alta resistência à corrosão tornam o alumínio ideal na construção e na indústria aeroespacial. Sendo um metal mole, é normalmente transformado em ligas através da adição de outros elementos como cobre, ferro, silício, manganês e titânio para aumentar sua resistência (ATKINS; JONES, 2007, p. 642).

Segundo a *International Aluminium Association* (IAI, 2015) a produção mundial do alumínio tem experimentado um contínuo crescimento, principalmente devido à produção chinesa do metal, como pode ser visto através do Gráfico 1.

Gráfico 1 - Produção mundial do alumínio primário entre os anos 2000 e 2014 em milhões de toneladas



Fonte: IAI (2015a).

Observa-se que o processo de mineração da bauxita para produção do alumínio primário implica em impactos ambientais negativos, destacando-se: desde supressão de vegetação, passando pela conversão de combustíveis fósseis em energia térmica (processo Bayer) até altas emissões de CO₂ e outros gases do efeito estufa (processo *Hall-Héroult*). Na sequência será descrito o Catodo, em sendo a parte do forno em que se encontra o banho eletrolítico com diversas reações químicas, produzindo o alumínio líquido e gerando o SPL.

3 O CATODO

Há mais de cem anos que o alumínio primário é produzido pelo processo denominado Hall-Hèruolt. Por meio deste processo o alumínio metálico é obtido via eletrólise, onde diversas reações químicas levam à obtenção do alumínio primário. Estas reações se passam no eletrólito, também denominado banho eletrolítico ou simplesmente banho, localizando-se entre o anodo, parte superior do forno e o catodo, parte inferior do forno (KVANDE, 2011).

O catodo é o eletrodo negativo da célula eletrolítica, local para onde a corrente elétrica é direcionada. Usualmente o catodo é referido como a parte mais importante da célula eletrolítica do alumínio e desempenha várias funções (CBA, 2010), dentre as quais se destacam:

- a) Ser um condutor no aporte de eletricidade para transformar os íons de alumínio do banho para alumínio metálico e
- b) Proteger a estrutura metálica do forno do contato e penetração do banho eletrolítico e alumínio fundido

A construção do catodo, tomando como referência a Figura 5, pode ser sintetizada segundo o descrito a seguir.

- a) Carcaça em aço;
- b) Tijolos isolantes assentados diretamente por sobre a carcaça;
- c) Tijolos refratários assentados sobre os tijolos isolantes;
- d) Blocos de carbono assentados sobre os refratários e sobre as barras coletoras de corrente;
- e) Mistura de socagem, formada por piche e antracite em forma pastosa para preencher os espaços e dar acabamento ao revestimento.

3.1 CARCAÇA

A carcaça (parte 17, Figura 5) tem forma de uma caixa construída em aço, sendo dotada de reforços na parte inferior e em suas laterais. Suas dimensões variam de acordo com as tecnologias desenvolvidas para os tipos de fornos. Na parte inferior da carcaça são instaladas barras coletoras para a condução da eletricidade para o forno seguinte, sabendo-se que em uma linha de produção de alumínio os fornos estão ligados em série, e a eletricidade passa do catodo de um

forno ao anodo do forno seguinte. Internamente, a carcaça é revestida mediante procedimentos operacionais rigidamente aplicados.

É o revestimento interno que determina a vida útil da célula eletrolítica. Há uma considerável variação quanto ao tempo de vida do catodo, pois vários fatores podem atuar para que ocorra uma vida mais curta ou mais longa. O projeto global do catodo, sua construção, materiais empregados e os cuidados operacionais são vitais para o tempo de vida (HOLYWELL; BREAUULT, 2013).

3.2 TIJOLOS ISOLANTES

Os tijolos isolantes (parte 16, Figura 5) são assentados sobre a carcaça e atuam prevenindo a troca de calor do forno com o meio exterior, sendo, portanto, de baixa condutividade térmica. Devem também possuir aceitável resistência mecânica à compressão. As tolerâncias dimensionais não devem ser inferiores a 1% (SANCHO; DEL CAMPO; GRJOTHEIM, 1994). No Quadro 5 estão as propriedades típicas dos tijolos isolantes.

Quadro 5 - Propriedades típicas dos tijolos isolantes

Propriedades	Unidade	Valor típico
Resistência à compressão	MPa	1,5 – 2,0
Densidade aparente	g/cm ²	0,45 – 0,5
Porosidade	%	75
Condutividade térmica	W/ m °C	
200°C		0,14
600°C		0,18
900°C		0,20

Fonte: Adaptado de Sancho, Del Campo e Grijothheim (1994).

3.3 TIJOLOS REFRAATÁRIOS

Os tijolos refratários (partes 15 e 18, Figura 5) são instalados nas laterais e sobre os tijolos isolantes, e têm como principais funções fornecer isolamento e servir como uma barreira que evite o contato do alumínio metálico com a parte interna da carcaça. Um dos objetivos é assegurar o perfil adequado de temperatura nos blocos de carbono. No Quadro 6 encontram-se as principais propriedades dos tijolos refratários.

Quadro 6 - Principais propriedades dos tijolos refratários

Propriedade	Unidade	Qualidade média (valor típico)	Qualidade alta (Valor típico)
Porosidade aberta	%	20	18
Densidade real	g/cm ²	2,3	2,4
Densidade aparente	g/cm ³	2	2,1
Resistência à Compressão	MPa	30	45
Refratariedade	°C	1500	1550
Condutividade térmica	W/cm.°C		
200 °C		1,15	1,2
900 °C		1,25	1,2
Composição	%		
Al ₂ O ₃		28	40
SiO ₂		68	55
TiO ₂		1,5	1
Fe ₂ O ₃		2,2	1,5
CaO + MgO		0,8	0,5
Na ₂ O ₃		0,5	0,2

Fonte: Adaptado de Sancho, Del Campo e Grjotheim (1994).

3.4 PASTA CATÓDICA

A pasta catódica (parte 18, Figura 5) é uma mistura composta por materiais carbonosos como o antracito, coque, grafite, piche e resinas. Øye (2001) classifica a pasta catódica, Quadro 7, de acordo com a temperatura de sua aplicação.

Quadro 7 - Classificação da pasta catódica

Classificação	Temperatura em °C
Quente	140
Tépida	30 – 50
Fria	20 – 30

Fonte: Adaptada de Øye (2001).

Atualmente, é recomendado o uso da pasta fria, visto que a pasta quente libera hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) contidos nos vapores orgânicos do piche, os quais são prejudiciais à saúde dos trabalhadores envolvidos nas operações' de revestimento. Segundo Patnaik (2002, p.521-539),

hidrocarbonetos policíclicos aromáticos são uma classe de compostos orgânicos contendo dois ou mais anéis benzênicos condensados, podendo também apresentar anéis com menos de seis carbonos.

Nas indústrias de alumínio os HPAs são monitorados continuamente, devido às incidências de câncer verificadas entre trabalhadores deste segmento (GUZZO; BIVALACQUA; SCHOENBERG, 2008).

A pasta catódica é empregada para preencher os espaços entre os tijolos assentados nas laterais internas e entre os blocos catódicos, de forma que ao final haja uma superfície de materiais carbonosos uniforme e protetora. A pasta aplicada também tem como função atuar como barreira protetora dos blocos catódicos e tijolos contra o ataque químico causado pelo banho eletrolítico.

3.5 BLOCOS CATÓDICOS

Os blocos catódicos (parte 12, Figura 5) são sempre mencionados como a parte mais importante do catodo. São feitos a partir de agregados de carbono unidos com piche e, posteriormente, calcinados. Suas dimensões variam de acordo com o tipo de forno a que são destinados. Segundo Sorlie e Øye (1994), os blocos catódicos são classificados em:

- a) Grafitizados: o tratamento térmico deve ser a 3000 °C para promover elevado grau de grafitização dos materiais empregados;
- b) Semi-grafitizados: o tratamento térmico deve ser a 2300 °C;
- c) Semi-grafítico: obtido a partir de um agregado pré-grafitizado e tratamento térmico;
- d) Antracítico: O principal material de enchimento é antracito, mas frequentemente é agregado grafite. O tratamento térmico é feito a 1200°C.

Muitas empresas produtoras de alumínio estão gradativamente mudando para os blocos grafitizados, que promovem maior vida útil do catodo, com conseqüente queda de custos e menor geração de resíduo (SPL). No Quadro 8 os dados comparativos entre os tipos de blocos catódicos.

Quadro 8 - Comparação qualitativa das propriedades de três tipos de blocos catódicos

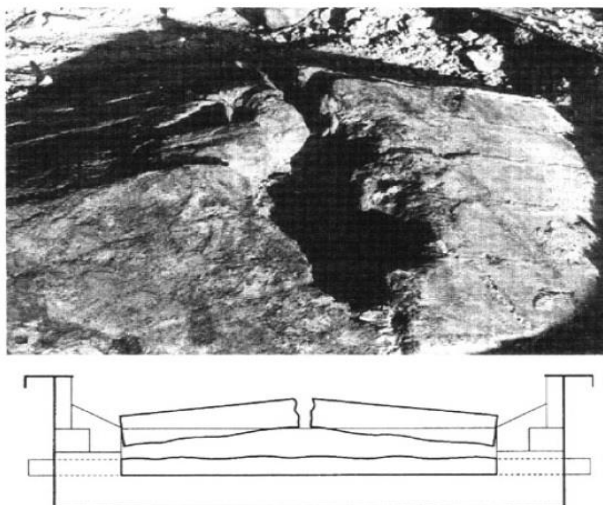
Propriedades comparativas	Antracítico	Semi-grafítico	Grafitizado
Abrasão à resistência	excelente	Boa	pobre
Resistência ao choque térmico	aceitável	muito boa	pobre
Condutividade térmica	moderada	Alta	muito alta
Resistência elétrica			
Temperatura ambiente	alta	Baixa	muito baixa
Temperatura do forno	média	muito baixa	muito baixa
Resistência à flexão	adequada	Baixa	adequada
Inchaço/absorção do sódio	adequada	Baixa	muito baixa

Fonte: Adaptado de Irmis, Soucy e Fafard (2005).

Segundo Hop (2003), a vida da célula eletrolítica na planta de alumínio é prolongada tanto quanto possível. O desligamento de um forno, para que seu catodo seja refeito, significa menor produção de alumínio e mais custos financeiros. A vida útil da cuba é determinada pelo primeiro material a falhar no interior da carcaça metálica. E a falha pode ser por mais de uma razão, mas o foco está nos blocos catódicos.

Durante a partida do forno há uma brusca variação da temperatura no catodo recém-revestido, indo desde a temperatura ambiente até próxima a 1000 °C, em curto espaço de tempo. Alguma falha iniciada ao tempo de partida do forno irá permanecer, e tenderá a aumentar mediante os contínuos efeitos dos outros agentes estressores existentes no forno. A penetração do sódio no revestimento, uma das principais causas da deterioração do catodo, tem início quando o forno é retornado à operação e componentes do banho eletrolítico, em alta temperatura, adentram-se pela porosidade do revestimento. A penetração e concentração do sódio tendem a crescer com o tempo de vida do catodo (Figura 7), promovendo aumento no volume do catodo e mesmo rachaduras, comprometendo seu desempenho operacional (HOP, 2003).

Figura 7 - Caso de rachadura no catodo



Fonte: Hop (2003).

Uma discussão mais alongada sobre penetração de sódio no catodo e outros agentes estressores no forno de alumínio está além do escopo deste trabalho.

3.6 BARRAS COLETORAS

As barras coletoras (parte 13 da Figura 5) de corrente ficam assentadas sobre os tijolos refratários e isolantes, É através delas que a corrente elétrica é transmitida ao anodo do forno seguinte. Em uma linha de fornos para a produção do alumínio primário os fornos estão ligados em série. As barras coletoras são construídas em aço e não são reaproveitadas. O destino dado às barras coletoras já usadas é a indústria siderúrgica.

O revestimento catódico é continuamente submetido a agentes estressores (químicos, mecânicos, altas temperaturas e operacional), comprometendo sua vida útil, produzindo falhas, demandando demolição e refazimento, gerando assim o Spent Pot Lining (SPL), que apresenta toxicidade por cianeto e fluoreto, temática tratada na sequência.

4 SPENT POT LINING - SPL

Na produção de alumínio primário, o catodo é formado por uma carcaça reforçada construída em aço e revestida internamente com materiais refratários, materiais isolantes, blocos catódicos feitos de materiais à base de carbono e pasta de socagem para fechar todos os espaços entre os diversos componentes e proporcionar acabamento homogêneo. O catodo é uma região continuamente submetida a muitas forças estressoras e irá, em algum momento, apresentar condições inadequadas à continuidade operacional. Nesta ocasião será retirado da linha de fornos para que todo o seu revestimento seja removido e substituído por outro novo. Até algumas poucas décadas atrás, a vida útil do catodo de até 1200 dias era considerada satisfatória, mas nos dias atuais um mínimo de 2000 dias é o esperado. O objetivo atual é fazer com que a vida útil do catodo fique entre 3000 e 4000 dias. Esta busca contínua de maior vida útil do revestimento do forno está fundamentada na eficiência econômica do empreendimento e seu desempenho ambiental. Mais tempo de vida do revestimento significa menos geração de resíduos (HOP e cols., 2004).

4.1 COMPOSIÇÃO DO SPL

As concentrações dos agentes químicos presentes no SPL apresentam variações, principalmente em função do tipo de forno utilizado. Segundo Holywell e Breault (2013), outros fatores também contribuem para estas variações. Além dos componentes utilizados na construção do revestimento do catodo, quantidades significativas de banho eletrolítico e alumínio metálico também são encontradas nos interiores das partes do revestimento gasto. Também, outros agentes químicos são formados no revestimento ao longo de sua vida útil, como os compostos à base de cianeto. As quantidades de químicos variam em função da tecnologia de forno empregada, do tempo em operação, da maneira como o forno foi operado, de como foi desligado, desmontado e tipos de tijolos utilizados. No Quadro 9 estão composições químicas do SPL para três diferentes tipos de tecnologias de fornos. As concentrações dos componentes químicos variam entre as diferentes tecnologias de fornos de alumínio, notadamente cianeto e fluoreto, parâmetros muito críticos quanto à toxicidade de materiais. A concentração de carbono também deve ser ressaltada, visto ser a principal fonte de atratividade do resíduo.

Quadro 9 - Três composições do SPL

Componentes	Forno com anodo pré-cozido tipo A	Forno com anodo pré-cozido tipo B	Forno com anodo do tipo Soderberg
Fluoretos (%)	10,9	15,5	18
Cianetos (ppm)	680	4480	1040
Alumínio total (%)	13,6	11	12,5
Alumínio metálico (%)	1	1	1,9
Carbono (%)	50,2	45,5	38,4
Sódio (%)	12,5	16,3	14,3
Cálcio (%)	1,3	2,4	2,4
Ferro (%)	2,9	3,1	4,3
Lítio (%)	0,03	0,03	0,6
Titânio (%)	0,23	0,24	0,15
Magnésio (%)	0,23	0,09	0,2

Fonte: Adaptada de Holywell e Breault (2013).

A parte que fica logo acima das barras coletoras contém, principalmente, carbono e é denominada SPL de primeiro corte. A fração restante, a que fica abaixo das barras coletoras e nas laterais do forno, formada essencialmente por tijolos refratários e isolantes (Figura 5), é designada como SPL de segundo corte (HOLYWELL; BREAUULT, 2013, p.1441-1442).

Uma outra proposição para a composição química (PAWLEK, 2012) considera o SPL dividido em dois cortes. O primeiro corte, que compreende a parte que fica sobre as barras coletoras (parte rica em carbono) e o segundo corte, que compreende o restante do revestimento (pobre em carbono). O Quadro 10 apresenta a composição do SPL total e as composições para o primeiro e segundo corte.

Quadro 10 - Componentes e suas concentrações no SPL

Componentes	Ambos os cortes (%)	1º corte (%)	2º corte (%)
Carbono	33,1	54 – 64	18,2
Fluoretos totais	15,7	6 – 20	4 – 10
Alumina livre	22,3	0 -15	10 -50
Alumínio total	15,1	5 – 15	12,6
Sódio total	14,2	5 – 12	12,0
Cálcio	1,8	0,5 – 4	1 – 6
Quartzo	2,7	0 - 6	10 – 50
Fósforo	0,3	0 – 650 g/t	0 – 300 g/t
Enxofre	0,1	0,1	0,1

Fonte: Adaptado de Pawlek (2012, p.1313).

A fração do SPL de primeiro corte compreende mais da metade do total dos materiais do catodo e seu valor calorífico varia entre 14 e 19 MJ/kg. A fração denominada segundo corte representa aproximadamente 45% dos materiais do catodo, principalmente formado por materiais refratários e isolantes (CHANANIA; EBY, 2000).

4.2 SPL COMO RESÍDUO PERIGOSO

A partir de setembro de 1988 a US EPA passou a classificar o SPL de primeiro corte como material perigoso (K088). Esta classificação foi em função das altas concentrações de cianeto. Além do cianeto, o SPL possui outros constituintes perigosos. Entretanto, o SPL do segundo corte não teve a mesma classificação, podendo ser segregado ou co-disposto (CHANANIA; EBY, 2000). No Brasil o SPL é classificado como um resíduo perigoso (classe I) principalmente por conter quantidades tóxicas de cianetos (ABNT, 2004).

Em 2014 a produção mundial de alumínio foi de 53 milhões de toneladas, segundo dados estatísticos do Instituto Internacional do Alumínio (IAI, 2015). Embora a geração de SPL venha decrescendo ao longo das últimas décadas, a atual geração deste resíduo ainda se situa entre 22 e 25 quilogramas por cada tonelada de alumínio produzido (Kg de SPL/t Al), de onde se pode deduzir que entre 1,17 e 1,33 milhões de toneladas de SPL também foram geradas no mesmo ano.

Destacou-se que o SPL pode ser dividido em duas partes, aquela rica em carbono (primeiro corte), e outra de baixo teor de carbono (segundo corte), rica em componentes dos tijolos refratários e isolantes e banho eletrolítico, notadamente fluoretos, sendo necessário estabelecer o processual de gestão destes resíduos, conforme pormenorizado no próximo capítulo.

5 RESÍDUOS SÓLIDOS E LEGISLAÇÕES ESPECÍFICAS

“A crescente preocupação com a preservação dos recursos naturais e com a questão de saúde pública associada a resíduos sólidos indica que políticas públicas para tratar desses temas tendem a ser cada vez mais demandadas pela sociedade. Como reflexo dessas demandas, foi sancionada em agosto e regulamentada em dezembro de 2010 a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que reúne o conjunto de diretrizes e ações a ser adotado com vistas à gestão integrada e ao gerenciamento adequado dos resíduos sólidos” (BRASIL, 2010).

A Lei nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010) instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil, inaugurando um importante marco regulatório ambiental e estabelecendo princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações a serem adotados no país, visando à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos. Esta lei foi regulamentada pelo Decreto Nº 7.405/2010 e desde então, importantes instrumentos previstos na PNRS foram elaborados:

- a) Plano Nacional de Resíduos Sólidos: em setembro de 2011, foi publicada a versão preliminar do Política Nacional de Resíduos Sólidos, para consulta pública – elaborado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA), em parceria com o Instituto de Pesquisa Econômica e Aplicada (Ipea); e
- b) Planos de gestão em resíduos sólidos: no início de 2012, o documento *Planos de Gestão em Resíduos Sólidos: manual de orientação – Apoiando a implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos: do nacional ao local* / uma iniciativa do Ministério do Meio Ambiente em parceria com os governos locais pela sustentabilidade (Iclei - principal associação mundial de governos locais e subnacionais dedicados ao desenvolvimento sustentável) foi publicado (IPEA, 2012).

No tocante aos resíduos sólidos industriais, a PNRS (BRASIL, 2010) prevê obrigações para o setor produtivo. Além dos benefícios ambientais, o adequado gerenciamento dos Resíduos Sólidos Industriais (RSI) tem um importante viés com a expansão adequada da infraestrutura econômica e social do país. Portanto, pelo aspecto econômico, a Lei no 12.305/2010 obriga os grandes empreendedores a

fazer uma opção entre a redução, o reuso e a reciclagem dos resíduos, reconhecendo o seu valor econômico e incentivando a integração das indústrias com as cooperativas de catadores de materiais reciclados (BRASIL, 2010). Entretanto, a PNRS também prevê benefícios aos setores produtivos que gerenciam eficazmente os seus resíduos (IPEA, 2012).

5.1 DEFINIÇÕES

Algumas das definições aqui empregadas são extraídas do Artigo 3º. Capítulo II da Lei 12.305.

II – área contaminada: local onde há contaminação causada pela disposição, regular ou irregular, de quaisquer substâncias ou resíduos;

IV – ciclo de vida do produto: série de etapas que envolvem o desenvolvimento do produto, a obtenção de matérias-primas e insumos, o processo produtivo, o consumo e a disposição final;

V – coleta seletiva: coleta de resíduos sólidos previamente segregados conforme sua constituição ou composição;

VII – destinação final ambientalmente adequada: destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos;

VIII – disposição final ambientalmente adequada: distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas, de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos;

IX – geradores de resíduos sólidos: pessoas físicas ou jurídicas, de direito público ou privado, que geram resíduos sólidos por meio de suas atividades, nelas incluído o consumo;

X – gerenciamento de resíduos sólidos: conjuntos de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, de acordo com plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos ou com plano de gerenciamento de resíduos sólidos, exigidos na forma desta lei;

XI – gestão integrada de resíduos sólidos: conjunto de ações voltadas para a busca de soluções para os resíduos sólidos, de forma a considerar as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, com controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável;

XII – logística reversa: instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e

meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada;

XIII – padrões sustentáveis de produção e consumo: produção e consumo de bens e serviços de forma a atender as necessidades das atuais gerações e permitir melhores condições de vida, sem comprometer a qualidade ambiental e o atendimento das necessidades das gerações futuras;

XIV – reciclagem: processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes do Sistema Nacional do Meio ambiente (Sisnama) e, se couber, do Sistema Nacional de Vigilância Sanitária do Brasil (SNVS) e do Sistema Unificado de Atenção à Sanidade (Suasa);

XV – rejeitos: resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada;

XVI – resíduos sólidos: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível;

XVIII – reutilização: processo de aproveitamento dos resíduos sólidos sem sua transformação biológica, física ou físico-química, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes do Sisnama e, se couber, do SNVS e do Suasa;

XIX – serviço público de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos: conjunto de atividades previstas no art. 7º da Lei nº 11.445, de 2007. (BRASIL, 2010).

5.2 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2014) definiu como resíduos sólidos os resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, àqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou

exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Essa definição é regulamentada pela norma ABNT NBR 10004/4 (ABNT, 2014), conforme apresentados no Quadro 11.

Quadro 11 - Classificação dos Resíduos sólidos

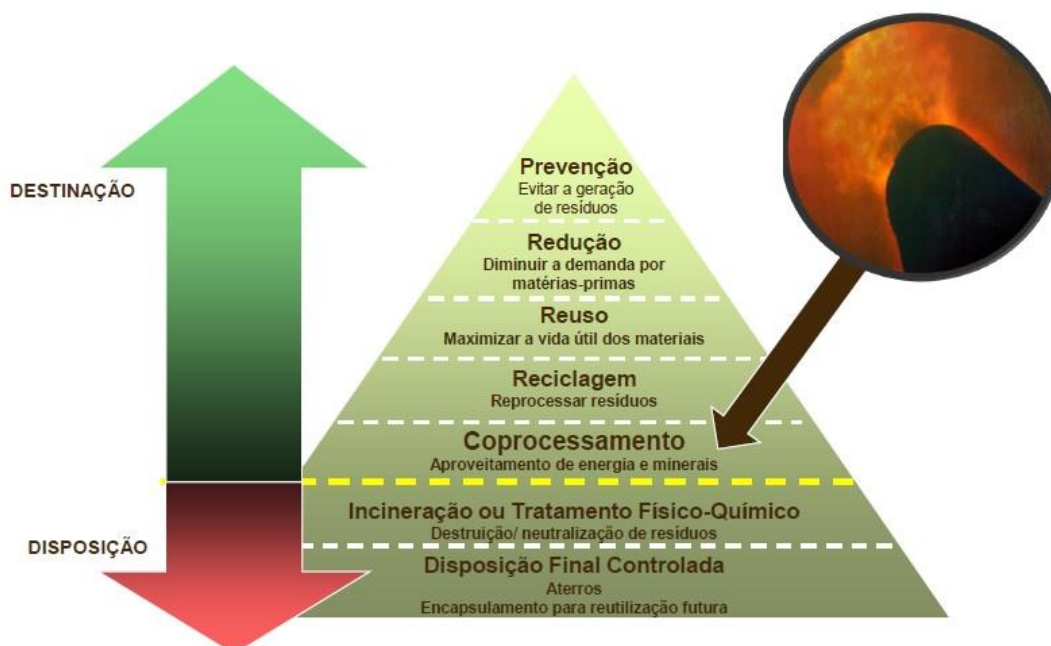
Classe I (perigosos)	aqueles que apresentam periculosidade ou constem nos anexos A e B da norma ABNT NBR 1004 ou apresentem uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.
Classe IIA (não inertes)	aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I ou de resíduos classe IIB, nos termos dessa norma. Os resíduos classe IIA podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
Classe IIB (inertes)	quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo norma ABNT NBR 10007, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme norma ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme anexo G desta norma.

Fonte: Adaptado da NBR 10004 (ABNT, 2014).

5.3 DIRETRIZES APLICÁVEIS AOS RESÍDUOS SÓLIDOS

A Política Nacional de Resíduos, Lei 12.305 de 2010, estabelece através do Art. 9º, CAPÍTULO I que “Na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.” (BRASIL, 2014). Na Figura 8, as opções de hierarquia de sustentabilidade aplicadas ao tratamento de resíduos. A interpretação a ser dada à opção não geração é prevenção.

Figura 8 - Hierarquia de sustentabilidade no tratamento de resíduos



Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2015).

5.4 IMPLANTAÇÃO DE PLANO DE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS (PGR)

Dentre os modelos de Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS), cita-se o modelo desenvolvido pela Federação das Indústrias do Rio de Janeiro para o qual “desenvolver e implantar um Plano de Gerenciamento de Resíduos (PGR) é fundamental para qualquer empresa que deseja maximizar as oportunidades e reduzir custos e riscos associados à gestão de resíduos sólidos.” (FIRJAN, 2006, p.9).

A implementação de práticas ambientais adequadas a minimizar os impactos negativos, em qualquer organização, reflete uma postura necessária, trazendo inúmeros benefícios. Se a organização já adota algum Sistema de Gerenciamento Ambiental (SGA), certamente o PGR já está contemplado nesse sistema. Para sua implementação pode-se adotar a mesma metodologia usada pela ISO 14001 (Figura 9), que faz uso de ferramenta gerencial PDCA, também conhecido como *Ciclo de Deming*, composto por quatro passos: *Plan* (Planejar); *Do* (Realizar); *Check* (Verificar); e *Action* (Atuar para corrigir) e recomeçar um novo ciclo (MOURA, 2008, p. 77-78).

Figura 9 - PDCA para Plano de Gerenciamento de Resíduos



Fonte: Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro (FIRJAN, 2006, p. 9).

O Plano de Gerenciamento de Resíduos deve assegurar que todos os resíduos sejam gerenciados de forma apropriada e segura, desde a geração até a destinação final, implicando em sequência mínima de processo (Quadro 12).

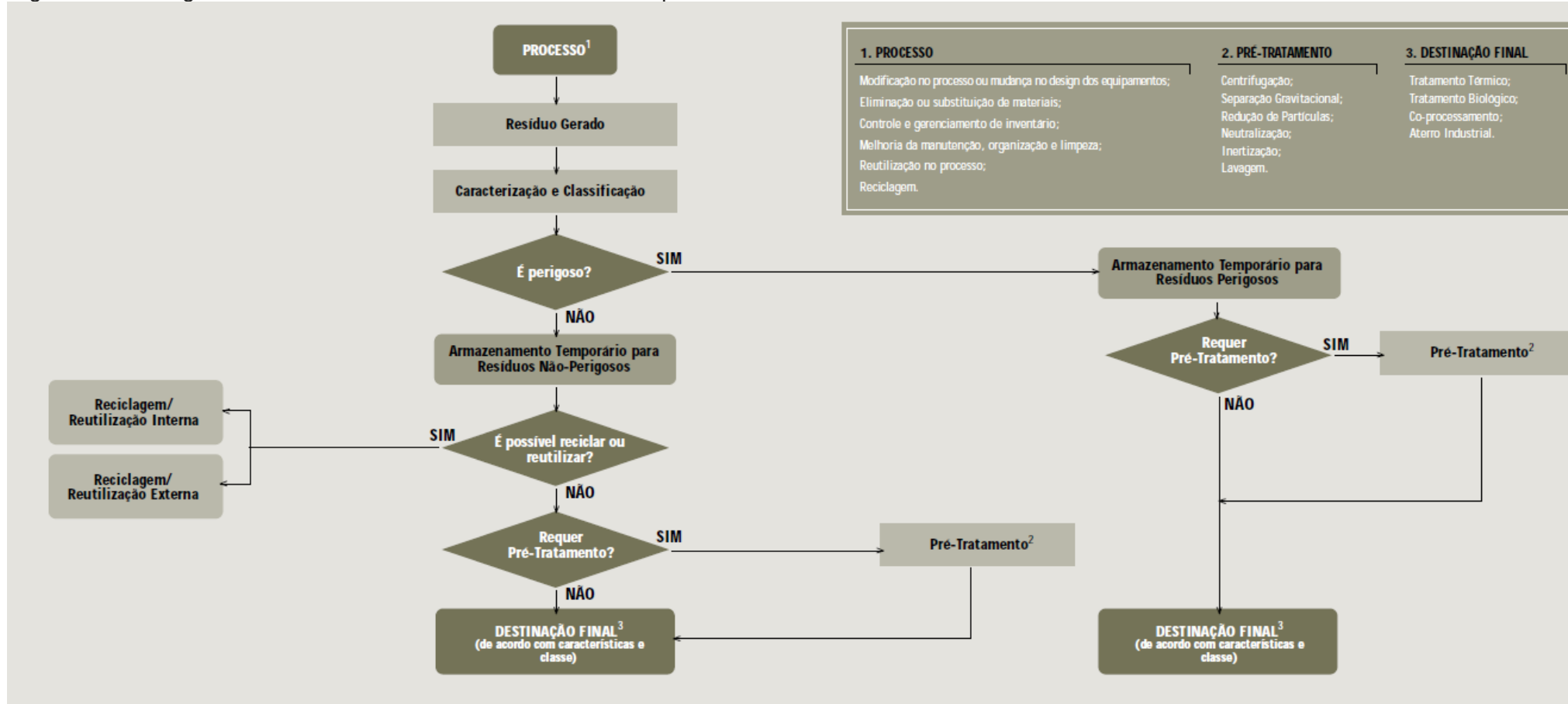
Quadro 12 - Sequência das etapas do PGR

1		Geração (fontes)	6	Coleta
2		Caracterização	7	Transporte
3		Manuseio	8	Reuso/reciclagem
4		Acondicionamento	9	Tratamento
5		Armazenamento	10	Destinação final

Fonte: Adaptado de FIRJAN (2006).

O PGR implica na caracterização de cada resíduo gerado, bem como, uma sistematização operacional (Figura 10). O fluxograma, na Figura 10, propõe uma sequência de ações a serem adotadas para sistematizar o conhecimento e como proceder com cada resíduo identificado pelo PGR.

Figura 10 - Fluxograma de Gerenciamento de Resíduos com etapas do PGR



Fonte: Adaptado de FIRJAN (2006, p. 10).

Como exemplo, descreve-se sumarizadamente o PGR aplicado ao SPL pela fábrica de alumínio primário da Novelis do Brasil, vigente em 2010, na Unidade de Aratu, Candeias, Bahia (PGR – *Plano de Gerenciamento de Resíduos – Documento Interno*).

I. Identificação

a - Nome do Resíduo: Spent Pot Lining

b – Origem: São componentes do revestimento gasto da cuba eletrolítica.

c - Composição Aproximada: carbono, óxido de ferro, óxido de alumínio, óxido de cálcio, óxido de silício, óxido de sódio, cianetos e fluoretos.

d - Classificação conforme ABNT: Resíduo Classe I – Perigoso.

II. Local de geração: Salas de fornos de redução e Central de Revestimento.

II. Processo de geração: Durante desmonte das cubas eletrolíticas

IV. Quantidade gerada: Aproximadamente 2.000 toneladas/ano

V. Local de armazenamento: Galpões de SPL

VI. Tipo de acondicionamento: A granel.

VII. Condições para armazenamento: Em construções fechadas e com sinalização do PGR.

VII. Transporte interno: Utilizar recipiente portátil em boas condições e veículos adequados. Evitar derramar durante percurso.

IX. Catação: Retirar todos os pedaços de metais, cascão do fundo do forno, blocos de carbono, sujeiras e quebrados. Nesta etapa a umidade não pode exceder a 6%.

X. Transporte interno:

- Utilizar recipiente portátil em boas condições, enlonado, sinalizado com rótulo de risco, painel de segurança, equipado com tacógrafo, extintor de incêndio, conjunto de equipamentos para emergência no transporte de produtos perigosos e conjunto de EPIs;

- Motorista com treinamento MOPE (Movimentação de Produtos Especiais);

- Documentação: Ficha de Emergência, Autorização de Transporte de Resíduo (ATRP) e

- Manifesto de transporte de resíduos e lista de verificação para saída de materiais emitido pela empresa geradora.

XI. Britagem e moagem: Esta operação é realizada por empresa especializada e licenciada. A granulometria deve ser de acordo com o que está estabelecido com a empresa do coprocessamento.

XII. Controle ambiental: Ocorrendo um derramamento durante o transporte, recolher imediatamente o resíduo ao recipiente e proceder conforme ficha de emergência. Emitir Relatório de Incidente Ambiental.

- Cumprir o estabelecido na Licença de Operação e legislações pertinentes;
- Manter atualizada Autorização de Transporte de Resíduos (ATR) emitida pelo órgão ambiental e
- Informar mensalmente ao órgão Ambiental o volume transportado.

XII. Destino final: Fábrica(s) de cimento licenciada(s).

XIV. EPI'S: Usar luvas, óculos de segurança e respirador para amônia (especificados pelo setor de saúde e segurança industrial). (NOVELIS DO BRASIL, 2010).

Existem resíduos que podem ser usados como fontes de energia e matérias-primas secundárias em processos de alta temperatura, como é a indústria de cimento. No Brasil, estão em vigor legislações para disciplinar esta atividade denominada coprocessamento. O capítulo que vem a seguir traz o SPL como um desses resíduos, que pode ser inteiramente consumido na fabricação do cimento Portland.

6 INDÚSTRIA DE CIMENTO PORTLAND E COPROCESSAMENTO DE RESÍDUOS

Cimento Portland é a denominação convencionalmente mundialmente para o material usualmente conhecido na construção civil como cimento, que é um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob ação da água. Depois de endurecido, mesmo que seja novamente submetido à ação da água, não mais se decompõe. Quando misturado com água e outros materiais de construção, tais como a areia, a pedra britada, o pó-de-pedra, a cal e outros, resulta nos concretos e nas argamassas usadas na construção de casas, edifícios, pontes, barragens etc. Foi criado por um construtor inglês, Joseph Aspdin, que o patenteou em 1824. Nessa época, era comum na Inglaterra construir com pedra de Portland, uma ilha situada no Sul desse país. Como o resultado da invenção de Aspdin se assemelhasse na cor e na dureza a essa pedra, ele registrou o nome e sua patente (ABCP, 2012).

6.1 MATÉRIAS-PRIMAS PARA A FABRICAÇÃO DE CIMENTO PORTLAND

As principais matérias-primas para a fabricação do cimento Portland são o calcário, a argila, a areia, óxido de ferro, óxido de alumínio e gesso. Ainda que estas matérias primas sejam consideradas simples e de fácil obtenção, as reações químicas envolvidas na produção do cimento Portland são complexas e necessárias para a formação do clínquer. Dentre os minerais comumente encontrados em abundância na crosta terrestre, está a rocha sedimentar calcário, que pode conter mais ou menos impurezas, a depender de sua origem geológica. Já as argilas utilizadas para a fabricação de cimento apresentam em sua formulação, silicatos complexos contendo alumínio e ferro além de potássio, magnésio, sódio, cálcio, titânio e outros. A escolha de uma argila envolve disponibilidade, distância, relação sílica/alumínio e os elementos menores como os álcalis (BERNARDO, 2009).

O referido anteriormente ressaltou que nem sempre a introdução de argila é suficiente para manter a quantidade de óxidos de ferro e de alumínio ao processo, sendo assim, materiais como areia e propriamente óxido de ferro podem ser empregados juntamente com o calcário, a argila e o gesso. A argila contribui com o fornecimento dos compostos Al_2O_3 (óxido de alumínio), Fe_2O_3 (óxido de ferro) e SiO_2 (sílica) que em conjunto com o calcário, posteriormente formarão o sistema

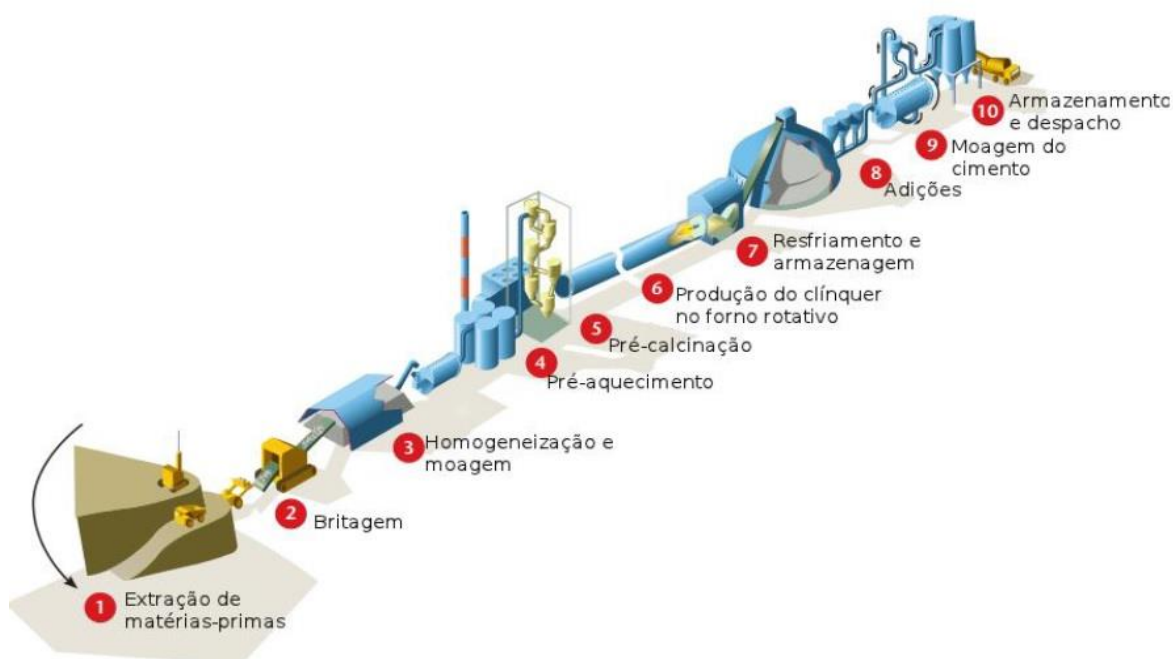
quaternário principal do cimento. Quanto aos compostos Al_2O_3 e Fe_2O_3 podem ser oriundos não somente da argila, mas também estar presentes em outros materiais-primas auxiliares, conhecidos como matéria-prima fundente ou corretiva. Bernardo (2009) ressaltou que com a técnica de coprocessamento, é comum encontrar resíduos cuja composição química contenha tais compostos. A prática de coprocessar resíduos em fornos de cimento se torna cada vez mais atraente tanto para as indústrias quanto para o meio ambiente. O gesso ou sulfato de cálcio é adicionado ao cimento quando o mesmo já passou pela queima e se encontra na moagem. Este elemento é adicionado na porcentagem de 2 a 4%, tendo como finalidade o retardamento da pega do cimento após a adição de água, permitindo que o operário possa produzir uma mistura como argamassa, concreto ou outro tipo e lançar na obra antes que o cimento endureça instantaneamente.

Ainda considerou que calcário e argila são as matérias-primas essenciais para a fabricação do clínquer, em uma proporção de 75%-80% e 20%-25%, respectivamente. Além disso, eventuais aditivos corretivos são utilizados, como minério de ferro, areia e bauxita. Uma vez lavrado, o calcário é britado para, pré-homogeneizado junto com argila e demais aditivos, ser armazenado em silos próprios. Esses minérios são devidamente dosados nas proporções exatas, quando então são moídos e homogeneizados até resultar em um material fino e de concentrações homogêneas, denominado farinha. A transformação físico-química da farinha em clínquer passa por quatro estágios: pré-aquecimento, calcinação, clinquerização e resfriamento.

6.2 ETAPAS DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CIMENTO PORTLAND

O processo de fabricação de cimento Portland, numa planta contemporânea, é apresentado na Figura 11 e sumarizado na Tabela 13.

Figura 11 - Etapas da fabricação do cimento Portland



Fonte: ABDI, MDIC e FGV (2012, p.11).

Quadro 13 - Sumário das diversas etapas de fabricação do cimento Portland

Etapas	Descrição
Extração de matérias-primas	Extração de calcário e argila. Também podem ser extraídas pequenas quantidades de outras substâncias utilizadas para "correção" do cimento.
Britagem	As matérias-primas são britadas para que seu volume seja reduzido a um tamanho adequado.
Moagem e homogeneização	Mistura das diferentes matérias-primas; composição nas proporções e volume exatos; moagem da mistura resultando pó fino (farinha; cru).
Preaquecimento	Farinha preaquecida nos "ciclones" para clínquerização, eficientizando o cozimento;
Pré-calcinação	Calcinação: processo de descarbonatação do carbonato de cálcio (CaCO_3) para óxido de cálcio e dióxido de carbono, pela exposição a altas temperaturas; decomposição inicia na pré-calcinação e termina na clínquerização;
Produção do clínquer nos fornos (clínquerização)	Continuação da calcinação, o cru é aquecido à temperatura média de $1.450\text{ }^\circ\text{C}$ para obtenção do clínquer;
Resfriamento/armazenamento do clínquer	Resfriamento do clínquer para armazenagem; o ar de resfriamento é aquecido pela troca de calor com o clínquer e reaproveitado nos fornos, reduzindo o consumo de calor. Algumas empresas optam por comercializar o clínquer.
Adições e moagem	O clínquer e gesso (3-6 %) são moídos conjuntamente, podendo ser aditivados outros materiais (escórias de alto-forno da siderurgia, cinzas volantes, pozolanas e materiais carbonáticos), diferenciando o tipo de cimento; mistura é moída, transformando-se em cimento e posteriormente armazenada.
Armazenamento e despacho	Armazenado em silos e despachado para embalagem

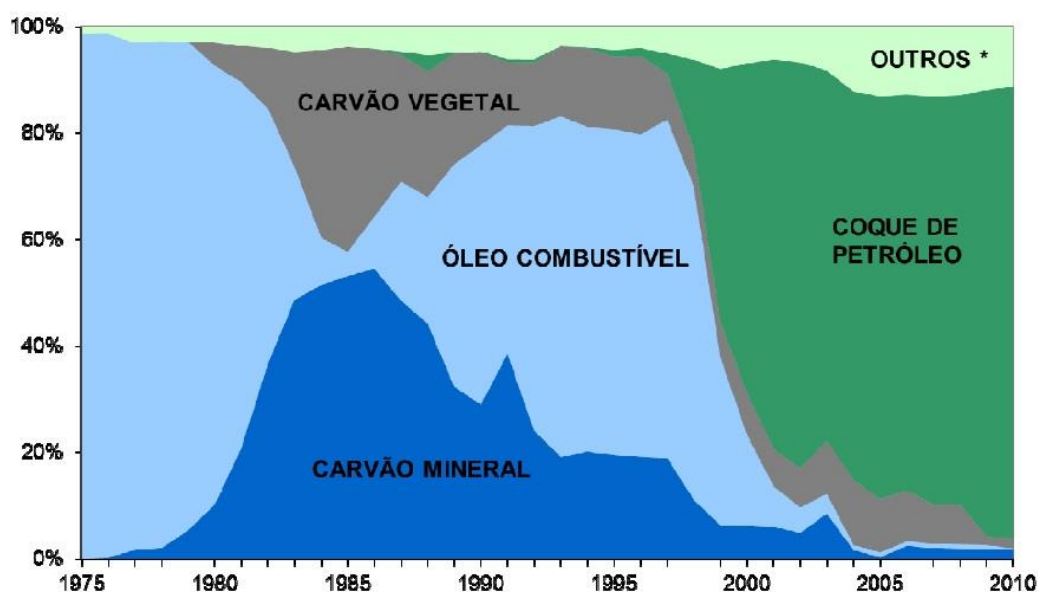
Fonte: Adaptação própria do autor deste trabalho com base em Nota Técnica Indústria Cimento. (ABDI; MDIC; FGV, 2012).

6.3 ENERGIA NA FABRICAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

A produção de cimento requer elevadas quantidades de energia. O combustível primário, empregado para fornecer o poder calorífico ao processo de queima da matéria-prima, é o item de maior valor na estrutura de custos da produção, enquanto a energia elétrica que é utilizada nas outras etapas corresponde a uma parte menor do necessário. Carvão mineral, coque de petróleo, óleo combustível e gás natural podem ser as fontes de energia primária na fabricação do cimento Portland, sendo os dois primeiros insumos os mais usados. Óleo combustível é cada vez menos usado por ser mais poluidor e preço mais elevado. A restrição feita ao gás natural é seu mais elevado custo (ISHIKAWA; HERAT, 2012).

Na Figura 12 consta a evolução da estrutura do consumo das fontes primárias da energia térmica no processo produtivo do cimento Portland entre 1975 e 2010.

Figura 12 - Evolução da estrutura do consumo das fontes primárias da energia térmica no processo produtivo do cimento Portland



Fonte: BEN 2011

* Biomassa, resíduos, outros.

Segundo Ishikawa e Herat (2012), a produção de cimento é processada com alto consumo de energia distribuída em três distintas zonas térmicas:

- a) Secagem e pré-aquecimento (20 – 800 °C);
- b) Calcinação (600 – 1000 °C);
- c) Clinquerização (1250 – 1500 °C).

Ainda, ressaltaram que o cimento é o segundo produto mais consumido no mundo, sendo intensivo no consumo de matérias-primas e energia. Em média, a produção de cimento requer entre 1,5 – 1,7t de matérias primas, 60 – 130 kg de óleo combustível assim como 105 kWh de eletricidade por cada tonelada produzida.

Em 2011 a produção mundial de cimento foi de 3,638 bilhões de toneladas enquanto a produção brasileira atingiu a marca de 64 milhões de toneladas, de acordo com o informe do Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC, 2012, p.31), Tabela 1. No Brasil, a indústria de cimento possui um parque industrial moderno e eficiente, com instalações que operam com baixo consumo energético. Praticamente todo o cimento no país é produzido por via seca, processo industrial que garante a diminuição do uso de combustíveis em até 50% em relação a outros processos. No Brasil os fornos por via seca são responsáveis por 99% da produção de cimento (SNIC, 2012).

Tabela 1 - Produção mundial de cimento em 2011

Maiores produtores de cimento (em milhões de toneladas)							
World leading producer country (millions of tonnes)							
PAÍSES / COUNTRY	2005	2006	2007	2008	2009	2010*	2011*
1. China	1.079,6	1.253,5	1.379,0	1.401,2	1.657,1	1.868,0	2.080,0
2. Índia / India	146,8	162,0	172,9	186,1	190,0	215,5	240,5
3. Estados Unidos / U.S.A.	99,4	98,2	95,5	86,5	64,0	64,9	67,9
4. Turquia / Turkey	45,6	49,0	50,8	53,4	57,6	62,0	67,8
5. Irã / Iran	32,7	35,3	40,0	44,4	48,8	61,3	66,4
6. Brasil** / Brazil**	39,2	42,4	47,2	52,3	52,1	59,2	64,1
7. Japão / Japan	72,7	73,2	71,4	67,6	59,6	54,0	56,4
8. Rússia / Russia	49,5	55,2	60,1	53,5	45,7	50,4	56,1
9. Vietnã / Vietnam	30,8	32,7	35,8	36,3	47,7	55,0	52,0
10. Arábia Saudita / Saudi Arabia	26,1	27,1	30,4	37,4	37,8	41,0	48,4
11. Coreia do Sul / Rep. of Korea	49,1	51,4	54,4	55,1	52,2	47,4	48,3
12. Egito / Egypt	38,9	39,2	40,1	40,1	46,9	48,2	45,4
13. Indonésia / Indonesia	36,1	38,1	39,9	41,8	39,7	39,5	45,2
14. México / Mexico	35,4	38,4	39,2	37,7	35,4	34,5	35,4
15. Alemanha / Germany	31,0	33,6	33,4	33,6	30,4	30,2	33,5
Total Mundial / World Total	2.344,8	2.608,0	2.797,7	2.841,5	3.033,0	3.345,0	3.638,0

Fonte: SNIC (2012, p.31).

6.4 COPROCESSAMENTO: UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO SUBSTITUTOS DE COMBUSTÍVEIS E MATÉRIAS-PRIMAS

A indústria cimenteira apresenta grande demanda de energia, tanto térmica quanto elétrica, para obter o produto final. Com a evolução tecnológica do setor, sob os aspectos da gestão energética, o uso de combustíveis alternativos e matérias-primas secundárias oriundas de resíduos industriais como parte da matéria-prima

e/ou combustível comumente empregada na fabricação de cimento, vem se tornando frequente. Tal atividade é conhecida como coprocessamento. Nos últimos anos, com o intuito de diminuir o consumo de energia, as indústrias cimenteiras vêm investigando substâncias mineralizadoras que possam ser encontradas nos resíduos utilizados como combustíveis alternativos. Os mineralizadores promovem a aceleração das reações químicas necessárias para produzir cimento, e conseqüentemente diminuem o consumo de combustível e até mesmo permitem que combustíveis menos nobres possam ser empregados na fabricação do cimento Portland, uma vez que o poder calorífico exigido ao processo é menor (TOSTA ; SOUZA, 2007).

Como alternativa para diminuir seus custos de produção e manter a eficiência do sistema, as técnicas de coprocessamento vêm se tornando uma realidade nas indústrias cimenteiras, pois permitem que determinados resíduos possam ser empregados como combustível secundário em fornos de cimento. Além de combustíveis secundários, dependendo das características do resíduo, o resíduo pode, também, ser empregado como matéria-prima secundária (CEMBUREAU, 1999).

Se por um lado, a indústria cimenteira objetiva uma redução de custo de produção, por outro lado ela favorece o meio ambiente, pois absorve grande quantidade de resíduos que poderiam ser descartados inadequadamente. A técnica de coprocessamento torna-se, portanto, uma solução viável para as indústrias geradoras de resíduos, pois permite que resíduos possam ser utilizados em outro sistema produtivo. Conforme Ishikawa e Herat (2012), o forno de cimento é um equipamento efetivo para o gerenciamento de resíduos sólidos e perigosos, por ter as seguintes características:

- a) altas temperaturas;
- b) longo tempo de residência;
- c) ambiente alcalino;
- d) alta turbulência na combustão;
- e) processo sem geração de cinzas;
- f) estabilidade térmica;

- g) equipamento eficiente na captação de gases, vapores e óxidos metálicos;
- h) capacidade de absorver grandes quantidades de resíduos e
- i) geração mínima de resíduos.

O coprocessamento permite o aproveitamento da energia contida em diversos resíduos, representando importante papel na gestão ambiental. A oficialização desta atividade em âmbito nacional deu-se pela aprovação da Resolução 264 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 1986), a partir de onde foram iniciados múltiplos processos de licenciamento em fábricas. Atualmente, existem no Brasil diversas plantas licenciadas com esta finalidade.

Em 2011, foram coprocessadas um milhão de toneladas de resíduos provenientes de diversos setores industriais, sendo 655 mil toneladas como insumos energéticos que totalizaram 8% como substituição térmica e 355 mil toneladas como matérias-primas. Do início da atividade, na década de 1990, até 2012, o setor contribuiu para a destinação ambientalmente adequada de aproximadamente 7,5 milhões de toneladas de resíduos (ABCP, 2012).

No Quadro 14, consta uma síntese dos Marcos Regulatórios do Processamento de resíduos no Brasil.

Quadro 14 - Marcos Regulatórios do Processamento de Resíduos

Ano	Normas
1998	FEAM (MG) – Deliberação Normativa DN 26 CETESB (SP) – Processamento e Coprocessamento
1999	CONAMA – Resolução CONAMA 262 – Coprocessamento FEPAM (RS) – Norma Técnica 01/99
2002	CONAMA – Resolução CONAMA 316. Sistema de Tratamento Térmico de Resíduos
2003	CETESB – Norma Técnica P4 - 263
2006	SEMA / PR Resolução 654
2009	CEMA / PR Resolução 076
2010	FEAM MG Deliberação Normativa DN 154

Fonte: ABCP (2012).

Para que uma tonelada de clínquer seja produzida são necessários entre 3,2 e 6,3 GJ de energia (térmica e elétrica) e 1,7 toneladas de matérias primas (principalmente calcário). Sendo uma indústria intensiva no uso de energia térmica, esta responde por cerca de 20 a 25% dos custos da produção, principalmente na etapa da calcinação. A principal fonte da energia térmica para a calcinação está nos combustíveis fósseis (carvão, coque de petróleo e gás). O uso de combustíveis alternativos se torna bem-vindo na manufatura do cimento, devido aos custos dos combustíveis tradicionais. Combustíveis alternativos abrangem aqueles de origem não fóssil e resíduos de outras indústrias, incluindo pneus usados, resíduos de biomassa, dentre outros (ISHIKAWA ; HERAT, 2012, p.137-155).

6.5 CRITÉRIOS TÉCNICOS PARA O USO DOS COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS

Segundo Ishikawa e Herat (2012), a especificidade de critério do material como combustível alternativo pode ser estabelecido pelo produtor do cimento, individualmente, e de acordo com suas próprias necessidades. Alguns parâmetros podem ser analisados previamente, como:

- a) valor de energia: ≥ 14 MJ/kg;
- b) teor de cloro: $< 0,2\%$;
- c) teor de enxofre: $< 2,5\%$;
- d) Bifenilas Policloradas: < 50 ppm e
- e) metais pesados: < 2500 ppm.

A produção do clínquer requer um pré-aquecimento consistente dos materiais. exigindo do material adicionado como combustível alternativo, o atendimento a algumas exigências técnicas:

- a) granulometria uniforme;
- b) valor calorífico alto e uniforme;
- c) ausência de pedaços de metais, vidros e minerais indesejados e
- d) baixo teor de umidade.

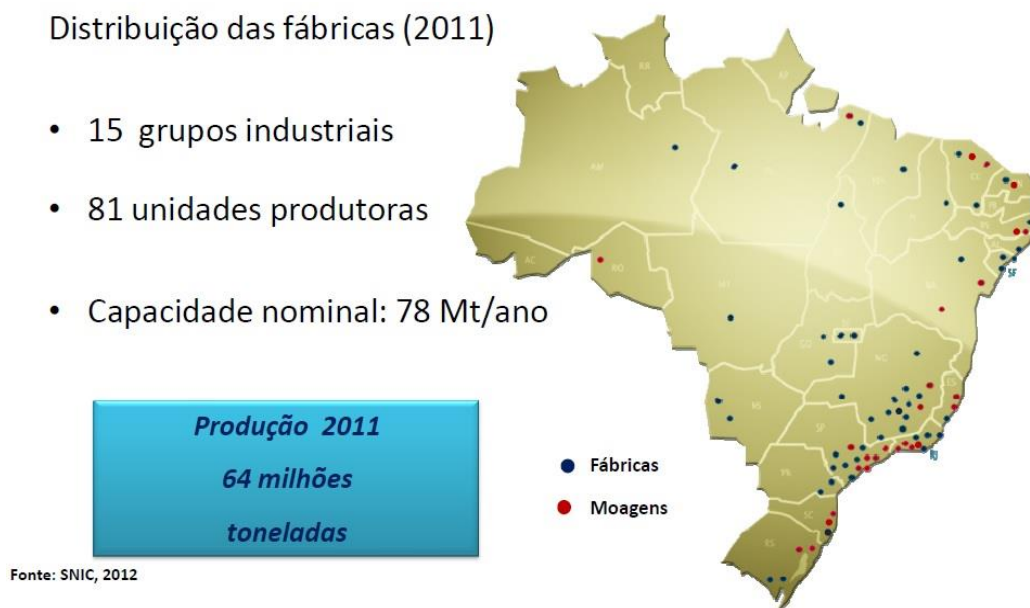
6.6 BENEFÍCIOS DO GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS PERIGOSOS EM FORNOS DE CIMENTO PORTLAND

Para Ishikawa e Herat (2012), são vários os benefícios associados ao gerenciamento de resíduos sólidos perigosos em fornos de cimento, destacando-se:

- a) Recuperação da energia. Todo material, seja natural ou artificial, tem algum teor de poder calorífico intrínseco. O uso de combustíveis alternativos reduz o consumo de combustíveis primários, os quais são recursos naturais, contribuindo assim para os princípios de conservação da energia e desenvolvimento sustentável;
- b) Conservação de recursos não renováveis. Uma vantagem significativa ao se usar resíduo sólido perigoso como combustível suplementar no forno de cimento é a conservação dos combustíveis fósseis. É possível substituir entre 25 e 50% da energia térmica fornecida ao sistema produtivo através do uso do combustível alternativo;
- c) Redução dos custos de fabricação do cimento Portland. É comum que o produtor de cimento receba valores monetários pelo coprocessamento de um determinado resíduo. Além disto, o resíduo pode ser fonte de energia térmica no processo, resultando em melhor desempenho financeira;
- d) O meio alcalino do forno onde ocorre a clínquerização possibilita a neutralização das emissões de gases ácidos e
- e) As instalações para a fabricação do cimento já existem.

A capacidade da produção brasileira de cimento Portland em 2012 era de 78 milhões de toneladas por ano e estava distribuída por 81 unidades produtoras, como pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 - Distribuição das fábricas de cimento Portland no Brasil em 2011



Algumas dificuldades iniciais podem se fazer presentes, demandando tempo até se tornarem rotinas:

- envolvimento de terceiros para a realização do transporte. Em se tratando de resíduos sólidos perigosos, há legislações específicas para garantir a segurança durante todo o trajeto e o transporte deve ser feito por empresas devidamente licenciadas;
- custos dos transportes que podem ter valores elevados principalmente em função da distância e serviços especializados;
- obtenção de autorizações legais;
- adequação da infraestrutura para receber, armazenar e adicionar e
- avaliação das emissões visando a prevenção de impactos no meio ambiente.

6.7 COPROCESSAMENTO DO SPL NA FABRICAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

Alguns compostos químicos são gerados no revestimento do forno de alumínio durante sua vida útil, devido a alta temperatura a que o catodo é submetido. Além de uma grande variedade de compostos de fluoreto, sódio e alumínio, o SPL também contém cianetos (causados pelo ingresso de ar através das

barras coletoras), metais (Al, Li e Na), óxidos reativos de metais (Na_2O), nitretos e carbetos. Estes diferentes compostos irão reagir com a umidade e produzirão hidróxido de sódio (NaOH), hidrogênio (H_2), etileno (C_2H_4) e amônia (NH_3). As presenças destes compostos no SPL tornam-lhe:

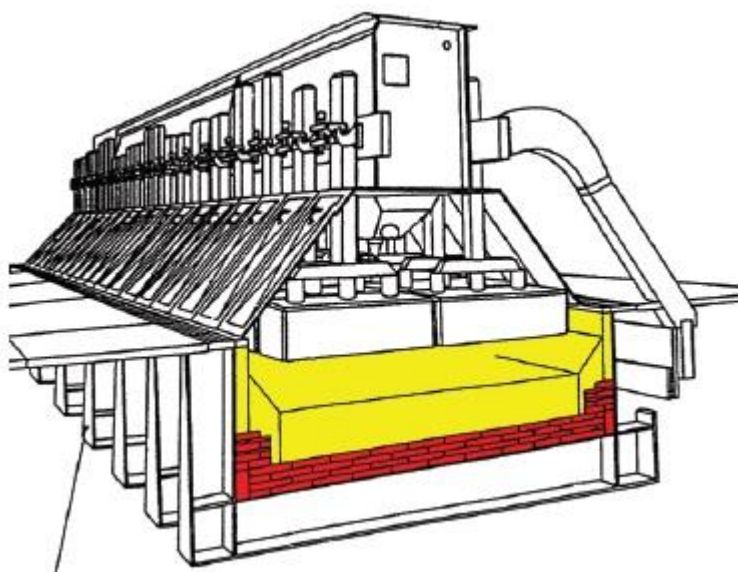
- a) Tóxico, pois os compostos de fluoreto e cianeto são lixiviáveis em água;
- b) Corrosivo, com alto pH devido às presenças de óxidos e metais alcalinos e
- c) Reativo com água, produzindo gases tóxicos, inflamáveis e explosivos.

Estas propriedades do SPL (tóxica, corrosiva e reativa) fazem com que seu processamento seja um grande desafio, requerendo também cuidados especiais que devem ser tomados durante seu manuseio, transporte e estocagem (HOLYWELL; BREAUULT, 2013).

A composição do SPL não é uniforme, variando de acordo com fatores como: tecnologia dos fornos, qualidade dos materiais empregados, qualidade da mão de obra na montagem do revestimento, modo de operação e tempo de vida útil do catodo. Na Figura 14, o esquema de um forno de anodo pré-cozido, a parte em cor amarela representa o SPL de primeiro corte que é rica em carbono. Na parte em cor vermelha, o SPL de segundo corte que é composto por tijolos refratários e isolantes. Importante ressaltar que ambas as partes contêm impregnações derivadas do processo.

Na Tabela 2 são apresentadas três composições distintas para o SPL. A primeira composição se refere a uma amostra que representa o SPL como um todo, composto pelas partes em amarelo e vermelho e a segunda composição (1º corte, em amarelo) e a terceira composição (2º corte, em vermelho) conforme Figura 14.

Figura 14 - Esquema de um forno de anodo precoce



Fonte: Lechtenber (2009, p. 2).

Tabela 2 - Três composições do SPL

Componente	Ambos os cortes (100%)	1º corte (56%)	2º corte (44%)
Carbono	33,1	54 - 64	18,2
Fluoreto total	15,7	6 - 20	4 - 10
Alumina livre *	22,3	0 - 15	10 - 50
Alumínio total	15,1	5 - 15	12,6
Sódio total *	14,2	5 - 12	12,0
Cálcio *	1,8	0,5 - 4	1 - 6
SiO₂ *	2,7	0 - 6	10 - 50
Fósforo	0,3	0 - 650 g/t	0 - 300- g/t
Enxofre *	0,1	0,1	0,1

Fonte: Adaptado de Pawlek (2012, p.1313).

Pela comparação entre a composição química da argila, matéria-prima para a produção do cimento, Tabela 3, e as composições do SPL, Tabela 2 constata-se a presença comum de muitos componentes nos dois materiais.

Tabla 3 - Composição química de argilas

Perda ao Fogo		9 a 11%
SiO ₂	*	49 a 57%
Al ₂ O ₃	*	23 a 31%
Fe ₂ O ₃	*	7 a 8%
CaO	*	0,1 a 1%
MgO		0,6 a 1%
Na ₂ O		0,7 a 1%
K ₂ O		1 a 1,5%

Fonte: Adaptado de Macedo e cols. (2008).

Nota: (*) componentes comuns aos dois materiais.

Segundo Gomes e outros autores (2013), o uso do SPL em plantas de cimento é muito útil, tendo em conta a fração rica em carbono e a fração de materiais refratários que conferem, ao resíduo, características como fontes de energia térmica e matérias-primas secundárias, respectivamente. Alguns dos componentes presentes no SPL são especialmente úteis na indústria cimenteira, como os fluoretos, que desempenham papel importante devido à propriedade em aumentar a taxa de formação do clínquer, atuando como substância mineralizadora. Outros componentes presentes como Fe₂O₃, Al₂O₃ e MgO e álcalis também agem como mineralizadores na produção do cimento Portland.

Outra vantagem anotada é a substituição de parte da argila pela fração de materiais refratários, ricos em sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃), além de pequena proporção de alumínio metálico. Característica também do SPL é sua muito baixa umidade, bem menor que aquela verificada na argila. Aliada a todos estes aspectos está a eliminação do passivo ambiental, que está fundamentado em um resíduo Classe I – perigoso, devido sua concentração de cianeto, (0,033%). Lechtemberg (2009) verificou que 99,99% deste cianeto são destruídos quando o SPL é usado como combustível e matéria-prima secundários. Nas mesmas observações, foram constatadas reduções nas emissões de dióxido de carbono, óxidos de nitrogênio e que sílica, alumina e óxido de ferro foram incorporados ao clínquer.

O resíduo SPL é utilizado na indústria de cimento como fontes de energia térmica e matéria-prima secundária. Esta adequação previne a formação de passivos ambientais e promove a preservação de recursos naturais. No início da

indústria de fabricação do alumínio primário os meios de disposição do resíduo deixaram solos e águas subterrâneas contaminados, requerendo remediações sempre onerosas. O capítulo que vem a seguir tem o relato de caso de impactos ambientais causados pela disposição inapropriada e aponta uma possibilidade para evitar a formação de passivo com o SPL.

7 RELATO DE CASO

7.1 BREVE HISTÓRICO

A Alcan Alumínio do Brasil Nordeste, um conjunto de três fábricas situadas no Centro Industrial de Aratu, Candeias, BA, a 46 km de Salvador, composto por: uma fábrica de alumínio primário, fábrica de cabos e vergalhões condutores de eletricidade e fábrica de produtos extrudados para a construção civil. Atualmente, todas estas unidades já se encontram desativadas.

A unidade produtora de alumínio primário fornecia a matéria-prima para as outras duas unidades. Em 1972, a Alcan Alumínio do Brasil Nordeste iniciou a produção de alumínio primário através de uma fábrica de pequeno porte (28.000t/ano) com fornos de tecnologia Soderberg. Todo o SPL gerado nos primeiros dez anos foi depositado a céu aberto, sobre o solo sem nenhuma impermeabilização e cobertura. Entre o final da década de 1970 e início da década de 1980 deu-se início a expansão da produção de alumínio primário, com instalação de uma segunda linha para produzir mais 30.000t/ano, com fornos de tecnologia mais moderna, de menor consumo de energia elétrica, modernos sistemas de controle de processo e tratamento de gases, além de uma central de revestimento para os catodos.

Indo além, essa nova etapa trouxe também instalações destinadas exclusivamente ao manejo do SPL. Para o resíduo já existente, aquele que estava disposto sobre o solo e exposto aos elementos da natureza, foi construído um landfill, enquanto dois novos galpões e pátio pavimentado passaram a fazer parte de uma infraestrutura destinada exclusivamente ao manejo apropriado do resíduo em geração. Todas estas melhorias foram objeto da Licença de Operação obtida do Centro de Recursos Ambientais da Bahia (CRA), publicada em dezembro de 1983.

Ao mesmo tempo a empresa deu início à busca de uma solução de destinação segura para o resíduo estocado e também aquele em geração. Nesta busca, outra fábrica do mesmo grupo instalada no Estado de Minas Gerais, também empregava esforços visando o mesmo fim. Algumas entidades nacionais estiveram envolvidas em parceria com as fábricas de alumínio primário, e vários testes passaram a ser conduzidos na indústria de cerâmica vermelha (tijolos), mediante o acompanhamento dos órgãos ambientais dos Estados da Bahia e Minas Gerais. Por

fim, a renovação da Licença de Operação da fábrica de alumínio primário publicada em 1989 trouxe como um de seus condicionantes a permissão para o uso do SPL na produção de blocos cerâmicos.

Para Brant Filho e cols. (1998), o uso de SPL na indústria de cerâmica vermelha além de segura, pois a temperatura dos fornos atingia 800 – 1000 °C proporciona uma melhor qualidade do produto, com melhor aparência e, sobretudo torna possível a economia de energia térmica proveniente da queima de lenha. A fração adicionada ao processo é toda absorvida, sem geração de resíduos e as avaliações das emissões gasosas também não detectaram a presença de fluoreto e cianeto.

Os procedimentos adotados com os resíduos, oriundos das demolições dos catodos das células eletrolíticas nesta fábrica de alumínio primário da Alcan, não diferiam de outras fábricas naquela época.

Historicamente, o SPL era disposto a céu aberto e diretamente sobre o solo sem impermeabilização, resultando em sua contaminação e também das águas subterrâneas locais, com altos níveis de fluoreto e cianetos complexos. Outros agentes presentes neste resíduo também podiam ser encontrados nas áreas afetadas, como sódio, sulfatos e cloretos, o que despertou a necessidade de investigação da extensão dos danos causados, assim como a necessidade do desenvolvimento de soluções para prevenção e controle do impacto (TURNER; BINNING; SLOAN, 2008).

Posteriormente, o SPL passou a ser estocado em landfills e galpões construídos de forma adequada à sua guarda. Sem métodos definitivos para a destruição ou reuso do material, a indústria do alumínio passou a reconhecer suas responsabilidades referentes às possibilidades de perdas advindas de guarda inadequada do SPL. Então, de forma ativa lançou-se no desenvolvimento de metodologias diversas para neutralização, recuperação, reuso de constituintes e coprocessamento total ou parcial (SILVEIRA e cols. 2002).

7.2 CONSTRUÇÃO DO LANDFILL

Para melhor abrigar o resíduo existente, a empresa construiu um landfill segundo os desenhos RPM-1-06-CV-002 e RPM-1-06-CV-003¹, em forma de dois troncos de pirâmide com base comum, sendo um deles invertido e situando-se ligeiramente abaixo do nível da rua frontal. A base comum media aproximadamente 51 x 75 m (largura x comprimento), formando um retângulo. A base superior do tronco de pirâmide media 29 x 54 m (largura x comprimento). A base inferior no subsolo media 44 x 62 m.

No perímetro da base superior do tronco de pirâmide, foi construído o sistema de captação de águas pluviais, em alvenaria, e que desembocava em várias canaletas de descida, de forma a evitar erosão. No perímetro da base comum aos dois troncos de pirâmide, o silo foi dotado de sistema de escoamento pluvial com capacidade adequada e construído em concreto.

O silo foi construído primeiramente com a abertura de vala de secção trapezoidal com profundidade de até 1,0 m abaixo do nível da rua. Na superfície do fundo, foi aplicado um colchão drenante de areia com 15 cm de espessura e declive longitudinal de 1% em direção à rua frontal. No fim do colchão drenante, e perpendicular à maior dimensão, foram colocados dreno com brita e tubo rígido ranhurado de PVC.

Sobre o colchão drenante, o silo foi totalmente revestido com manta sintética, forrando toda a área até as suas bordas. Sobre a manta aplicada no fundo e nas laterais da pirâmide, foi colocada camada de 100 cm de espessura de argila compactada em direção às bordas e em todo perímetro da obra.

O SPL foi depositado sobre a camada de argila no interior da depressão, e cuidadosamente arrumado no formato do projeto, sendo coberto paulatinamente com a mesma manta até o seu enchimento. A manta superior foi rejuntada à manta inferior, e pregada com auxílio de estacas de madeira ao longo do perímetro do silo. Nas Figuras 15 e 16 são apresentadas duas vistas do *landfill* lateral e de topo, a partir da rua lateral e cobertura vegetal.

¹Documentos internos da ALCAN (1988).

Figuras 15 - Landfill visto da rua lateral

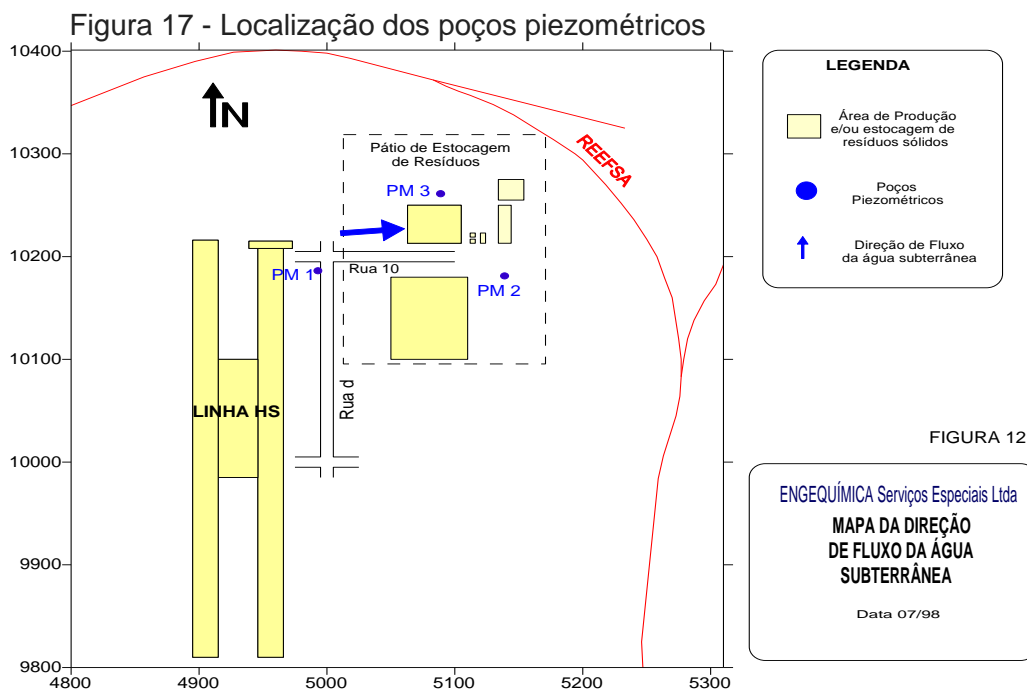


Figuras 16 - Landfill visto da rua topo



Sobre a manta sintética superior, em toda a superfície do tronco de pirâmide, foi colocada uma camada de solo de 50 cm de espessura e sobre a qual foi construído o sistema de drenagem superior, composto por muretas para retenção e canaletas para descida de águas pluviais. Capim foi plantado ao longo de toda a extensão do topo e laterais.

A construção do landfill para abrigar o SPL requereu também a instalação de três poços piezométricos, sendo designados como PM 1, PM 2 e PM 3 para o monitoramento das concentrações de cianeto, fluoreto e pH nas águas subterrâneas. Na Figura 17 vêem-se as localizações destes poços.

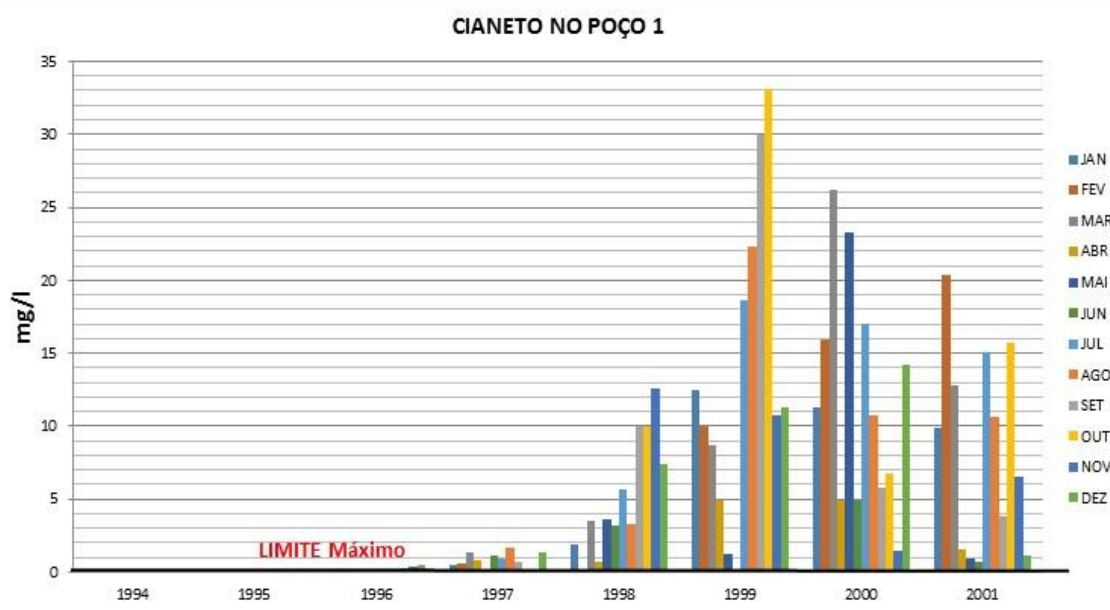


Fonte: Engequímica, Serviços Especiais Ltda (2003).

7.3 MONITORAMENTOS DE CIANETO E FLUORETO NOS POÇOS PIEZOMÉTRICOS

Em conformidade com a Licença de Operação vigente na época, a empresa apresentava ao órgão Ambiental do Estado da Bahia relatório mensal, constando as condicionantes acordadas, dentre as quais se encontravam as avaliações de Cianeto e Fluoreto nos poços piezométricos. Nos Gráficos 2, 3 e 4 estão as séries históricas destes monitoramentos de cianeto, transcorridos entre 1994 e 2001, enquanto os Gráficos 5, 6 e 7 referem-se ao monitoramento de fluoreto. Os valores reportados para cada mês representam a média aritmética dos valores semanais.

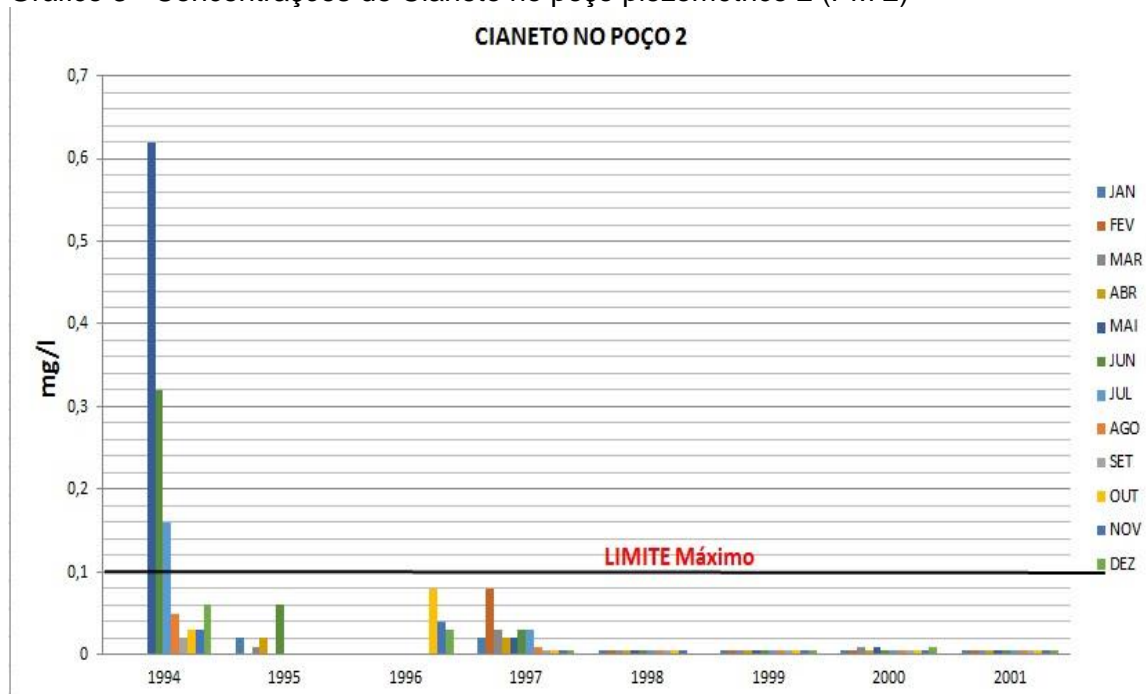
Gráfico 2 - Concentrações de Cianeto no poço piezométrico 1 (PM 1)



Fonte: Adaptado de Alcan Alumínio do Brasil (2015).

As concentrações de Cianeto em PM 1 iniciaram subida vertiginosa a partir de meados de 1996, indicando que a área, em que se situava o poço, estava contaminada.

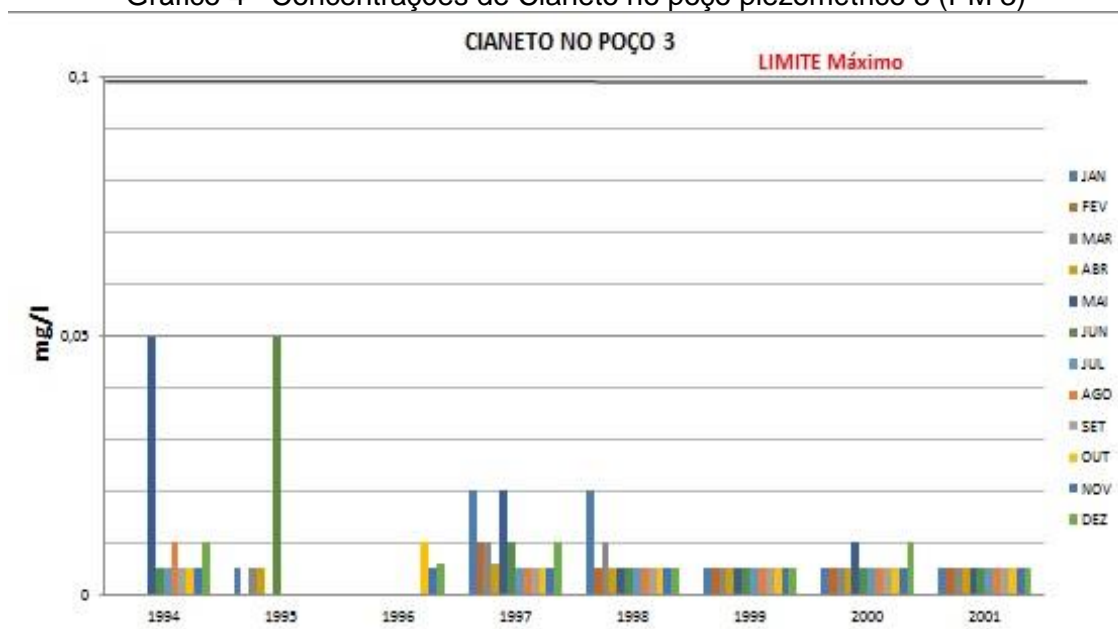
Gráfico 3 - Concentrações de Cianeto no poço piezométrico 2 (PM 2)



Fonte: Adaptado de Alcan Alumínio do Brasil (2015).

A concentração de cianeto em PM 2 apresentou por três valores consecutivos acima do limite máximo no ano em 1994. Ainda naquele ano os valores caíram e permaneceram abaixo do limite máximo até o final do período considerado (2001).

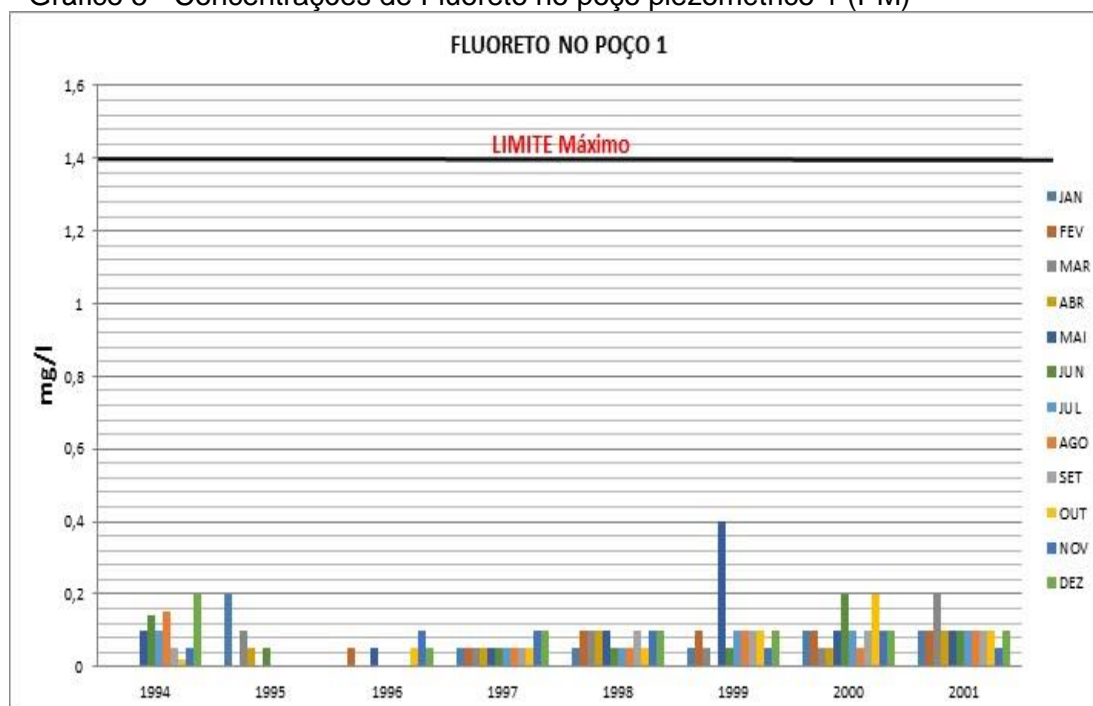
Gráfico 4 - Concentrações de Cianeto no poço piezométrico 3 (PM 3)



Fonte: Adaptado de Alcan Alumínio do Brasil (2015).

A concentração de Cianeto em PM 3 apresentou resultados sempre abaixo do limite máximo permitido durante todo o período considerado, de 1994 a 2001.

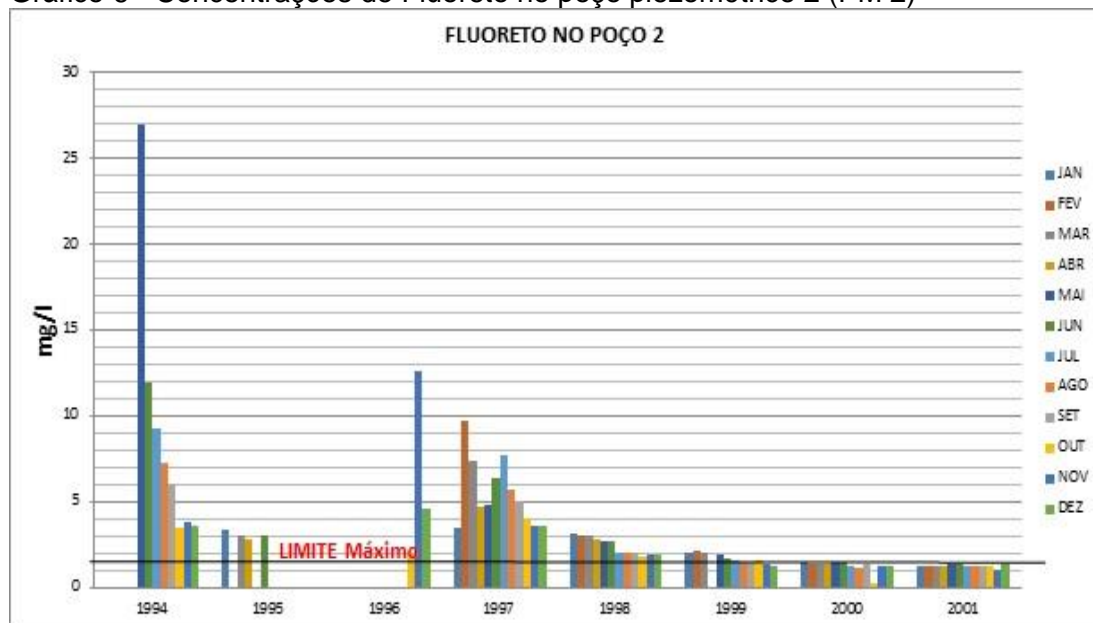
Gráfico 5 - Concentrações de Fluoreto no poço piezométrico 1 (PM)



Fonte: Adaptado de Alcan Alumínio do Brasil (2015).

Em PM 1 a concentração de Fluoreto esteve sempre inferior ao limite máximo permitido de 1,4 mg/L durante todo o período considerado.

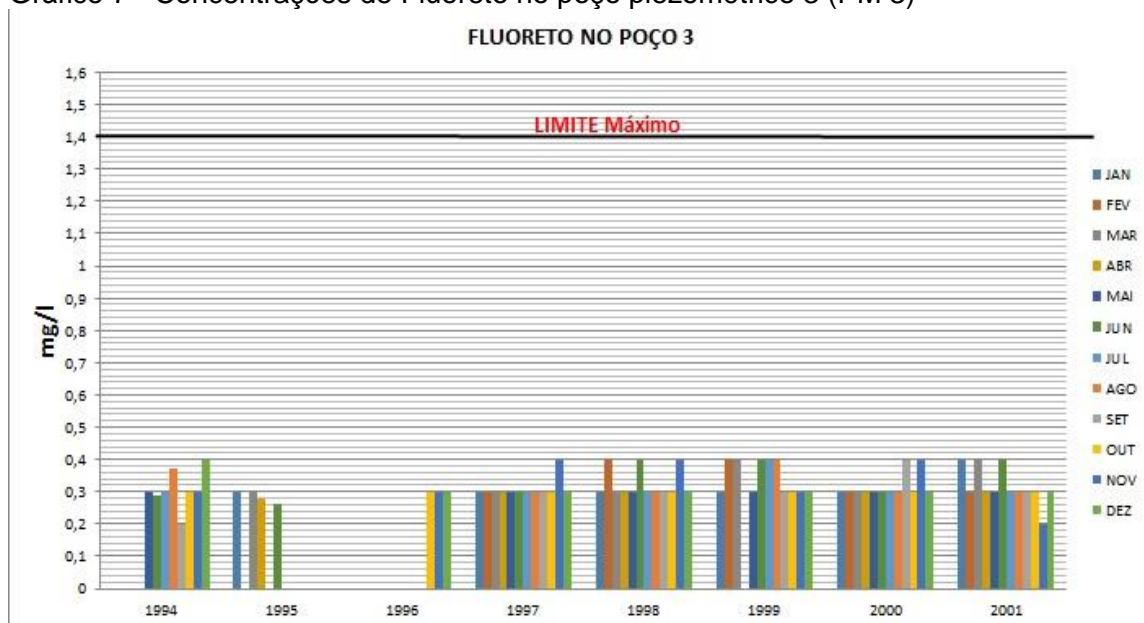
Gráfico 6 - Concentrações de Fluoreto no poço piezométrico 2 (PM 2)



Fonte: Adaptado de Alcan Alumínio do Brasil (2015).

Em PM 2 a concentração de Fluoreto inicia uma queda bem definida a partir do ano de 1997. Em 1999 os valores passam a ficar iguais, e até mesmo inferiores, ao limite máximo, permanecendo com este comportamento até o fim do período considerado.

Gráfico 7 - Concentrações de Fluoreto no poço piezométrico 3 (PM 3)



Fonte: Adaptado de Alcan Alumínio do Brasil (2015).

Em PM 3 a concentração de Fluoreto esteve sempre inferior ao limite máximo permitido de 1,4 mg/L durante todo o período considerado.

As situações das concentrações de cianeto no poço piezométrico 1 (PM 1) e fluoreto no poço piezométrico 2 (PM 2) apontavam para a necessidade de remediação da área que servia como local para a disposição do SPL, além de que eram evidências de falhas no landfill.

7.4 AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL

A avaliação do impacto ambiental, ao longo da extensão das áreas destinadas à estocagem do SPL, foi conduzida por empresa especializada e o planejamento dos trabalhos foi feito a partir da:

- a) Identificação dos pontos de detecção dos contaminantes no solo e águas subterrâneas;
- b) Quantificação da contaminação no solo e águas subterrâneas e
- c) Localização das fontes dos contaminantes.

Como parte do procedimento para o diagnóstico de impacto ambiental do Cianeto e Fluoreto, foram levantadas informações disponíveis em trabalhos anteriores sobre a área do diagnóstico, tais como:

- a) Perfuração dos Poços².
- b) Infraestrutura e obras gerais - Área OX - Geral - Plano Diretor, Agosto/1980 e
- c) Resultados analíticos do Cianeto e Fluoreto nos poços piezométricos, 1994/2001.

7.5 AMOSTRAGENS DO SOLO

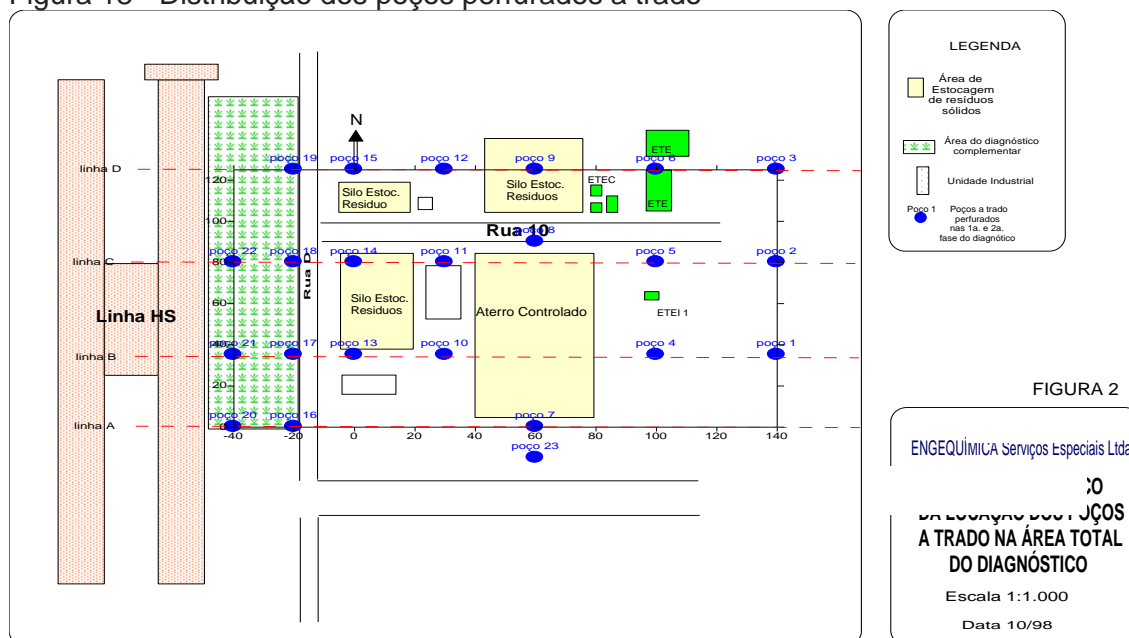
A maioria dos compostos de Cianeto e Fluoreto apresenta, como característica físico-química, a solubilidade em água. A partir do lençol freático, é possível avaliar potenciais fontes de contaminação em escala regional, para os compostos solúveis devido ao processo de diluição e difusão. Entretanto, uma avaliação de fontes de contaminação pontual, quer seja de compostos solúveis ou

² GEOHIDRO Eng. Ltda 203RT-01. Janeiro/1994.

insolúveis, requer uma detalhada amostragem da zona não saturada, assegurando a localização mais precisa das fontes.

Como parte do procedimento para localização das fontes e quantificação dos contaminantes no solo, priorizou-se amostrar a zona não saturada sob o Pátio de Estocagem de Resíduos Sólidos. Em uma área com dimensões de, aproximadamente, 180 x 200 m foram perfurados, a trado, 23 poços para amostragens do solo, de acordo com o esquema mostrado na Figura 18. A malha estabelecida, para a locação dos poços para as sondagens a trado, teve como base o histórico da área, que era onde se encontravam locais destinados às estocagens de SPL.

Figura 18 - Distribuição dos poços perfurados a trado



Fonte: Engequímica, Serviços Especiais Ltda (2003).

A escavação para as amostragens do solo consistiu em remoção da camada superficial e abertura de furos de até 400 cm de profundidade, com diâmetro de aproximadamente 10 cm e tomada de amostra a cada 100 cm. As amostragens do solo seguiram práticas existentes em **Description and Sampling of Contaminated Soils. A Field Pocket Guide - EPA/625/12-19/002, 1991.**

As amostragens do solo foram feitas segundo a sequência:

- Definição exata dos pontos de amostragem, incluindo mapa de locação com descrição das instalações nos locais das amostragens (Figura 18);

- b) Tomada de amostra do solo nos intervalos de 100, 200, 300 e 400 cm (como o lençol freático situa-se a 500 cm de profundidade, a perfuração e coleta de amostras foram limitadas a 400 cm) e
- c) Preservação das amostras em sacos de plástico previamente etiquetados, mantidas em caixa com gelo no campo e refrigerador em laboratório (CETESB, 1988).

As análises químicas das amostras do solo, colhidas nos poços perfurados, foram realizadas de acordo com a metodologia analítica disponível em Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1992). As concentrações de Cianeto e Fluoreto nas amostras de solo foram determinadas conforme os métodos analíticos SM 4500 CN⁻ B e SM 4500 F⁻ D, respectivamente.

Um total de 23 poços foram perfurados e colhidas 4 amostras em cada, perfazendo um total de 92 amostras de solo. Os resultados analíticos de Cianeto foram confrontados com o limite máximo de 0,1 mg/L, estabelecido pela Portaria Nº 36 do Ministério da Saúde de 19 de janeiro de 1991, enquanto os resultados de Fluoreto foram confrontados com o limite de 1,4 mg/L, com base na Resolução CONAMA Nº20, artigo 20 de 18 de junho de 1986 (CONAMA, 1986).

As sínteses dos valores encontrados para Cianeto e Fluoreto encontram-se nas Tabelas 4 e 5, respectivamente.

Tabela 4 - Faixa de Concentração do Cianeto no extrato solubilizado em mg/L.
Valor máximo permitido: 0,4mg/L

Profundidade amostragem (cm)	Concentração (mg/L)	Conclusão
100	0,05 – 0,75	Superior
200	0,01 a 0,11	Limite
300	0,01 a 0,11	Limite
400	0,01 a 0,03	Limite

Fonte: CONAMA (1986).

Tabela 5 - Faixa de Concentração do Fluoreto no extrato solubilizado em mg/L.
Valor máximo: 1,4 mg/L

Profundidade amostragem (cm)	Concentração (mg/L)	Conclusão
100	0,0 a 22,0	limite
200	0,0 a 11,0	limite
300	0,0 a 0,36	limite
400	0,0 a 4,0	superior

Fonte: CONAMA (1986).

A avaliação dos impactos ambientais causados por cianeto e fluoreto foi conclusiva, pois constatou a contaminação da área. Esta conclusão simples foi argumento para a decisão de remoção do landfill.

7.6 DESMONTE E REMOÇÃO DO LANDFILL

O desmonte do landfill foi conduzido de acordo com projeto específico e produzido por empresa especializada³. Os materiais removidos, daqueles empregados na construção do landfill e o SPL nele depositado totalizaram os volumes que se encontram na Tabela 6.

Material Removido	Volume (m ³)
SPL	19.655
Camada de solo da cobertura	1.902
Argila compactada inferior	5.050
Sucata de concreto e alvenaria	80

Fonte: RPM-1-06-CV-002 e RPM-1-06-CV-003⁽⁴⁾

O desmonte do landfill foi executado em etapas previamente estabelecidas. A primeira etapa consistiu de alguns cortes com escavadeira conduzidos de cima para baixo com o objetivo de visualizar como se encontrava o material, como retratado pela Figura 19.

³ WASTECH, Engenharia Limitada, Procedimentos para desmonte de Silo de Allucoque. Documento Restrito. Candeias, Bahia, fevereiro de 2000. Segundo cálculos constantes do desenho N° RPM – 1 – 06 – CV – 0002.

⁴ Documentos internos da ALCAN (1988).

Figura 19 - Primeiro corte feito no landfill



Nota: Em vermelho detalhe da camada de argila sobre a lona plástica e a camada do SPL em cinza escuro

A primeira etapa do desmonte foi interrompida quando se atingiu, aproximadamente, 25% de remoção do total, para uma análise do andamento dos trabalhos e quais melhorias poderiam ser implementadas. Aspectos como segurança, meio ambiente, estocagem temporária em pátio pavimentado foram considerados. A Figura 20 mostra esta etapa, tendo à direita o landfill antes da remoção.

Figura 20 - Quando 25% do total da remoção foram alcançados



À medida que a remoção do landfill avançava, o SPL era temporariamente guardado em pátio pavimentado e com canaletas em seu entorno (Figura 21).

Figura 21 - Progresso do desmonte do landfill e depósito temporário em pátio pavimentado.



Ao final de cada dia de trabalho, o SPL, retirado do landfill em desmonte e depositado no pátio pavimentado, era totalmente coberto com lona impermeável, visando proteção contra chuvas comuns na região. Os trabalhos prosseguiram até a completa remoção do SPL e dos materiais empregados na construção do *landfill*. Na Figura 22, observa-se o antes e o após a remoção.

Figura 22 - Quando todo o landfill foi removido



8 GESTÃO DE CERTOS ASPECTOS AMBIENTAIS NO PROCESSO HALL-HÈROULT

Aqui estão abordados os principais aspectos ambientais decorrentes da etapa produtiva do alumínio pelo processo Hall-Hèroult, ou seja, durante o processo eletrolítico.

- a) Emissões de fluoretos gasosos e particulados em Kg F/t Al (quilogramas de fluoreto por tonelada de alumínio produzida);
- b) Emissões de gases do efeito estufa em Kg CO₂e/t Al (quilograma de equivalentes de dióxido de carbono por tonelada de alumínio produzida);
- c) Consumo de energia elétrica por tonelada de alumínio produzida em KWh/t Al e
- d) Geração de SPL por tonelada de alumínio produzida em kg SPL/t Al.

8.1 PRODUÇÃO MAIS LIMPA NA INDÚSTRIA DO ALUMÍNIO PRIMÁRIO

Em 1989, a expressão “Produção mais Limpa” foi lançada pela United Nations Environment Program (UNEP) e pela Division of Technology, Industry and Environment (DTE):

Produção Mais Limpa é a aplicação contínua de uma estratégia de prevenção ambiental a processos, produtos e serviços, para aumentar a eficiência de produção e reduzir os riscos para o ser humano e o ambiente. (UNIDO – UNITED NATIONS FOR INDUSTRIAL DEVELOPMENT, 1989).

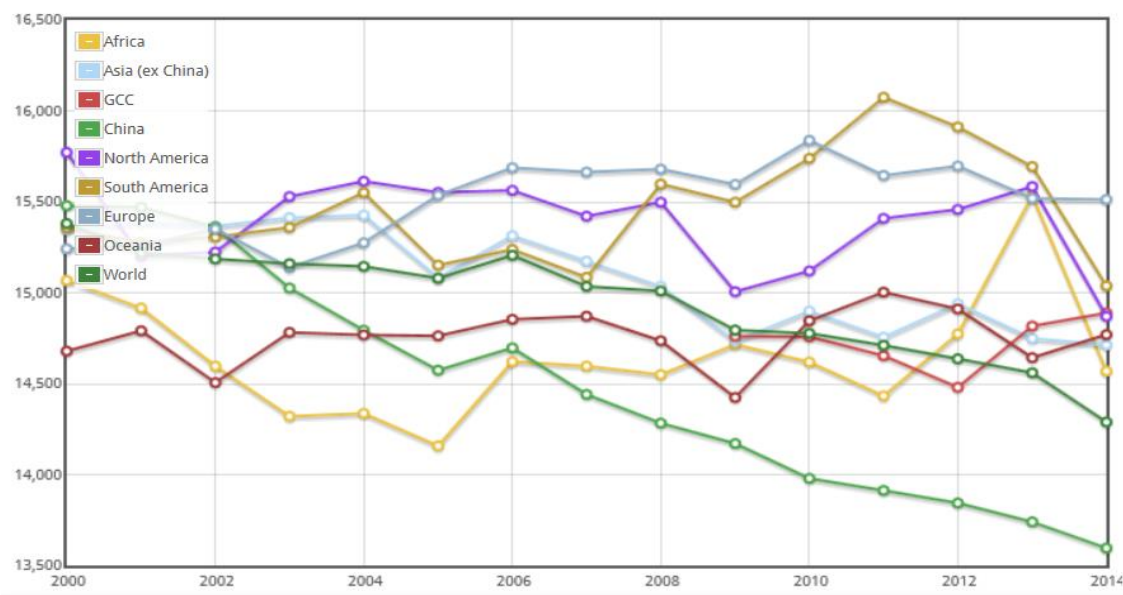
Para Almeida (2006, p.34)

produção Mais Limpa visa melhorar a eficiência, a lucratividade e a competitividade das empresas enquanto protege o ambiente, o consumidor e o trabalhador. É um conceito de melhoria contínua que tem por consequência tornar o processo produtivo cada vez menos agressivo ao homem e ao meio ambiente. A implantação de práticas de Produção Mais Limpa resulta numa redução significativa dos resíduos, emissões e custos. Cada ação no sentido de reduzir o uso de matérias-primas e energia assim como prevenir a geração de resíduos, pode aumentar a produtividade e trazer benefícios econômicos para a empresa.

Na produção de alumínio primário, como visto anteriormente, há um elevado consumo de energia elétrica. Este consumo vem decrescendo com os avanços tecnológicos cada vez mais inseridos neste segmento industrial. Pelo Gráfico 8

observa-se a queda do consumo a partir do ano 2000. A linha em cor verde (World) representa a média do consumo mundial, que é expresso em MWh/tAl (megawatt por tonelada de alumínio produzida). A tendência é que este desempenho melhore ainda mais com a substituição de tecnologias mais velhas e ainda em operação, por aquelas mais novas e mais eficazes. Exemplo disto é a produção chinesa, que tem uma indústria bastante jovem (linha em cor verde claro), já atingindo pouco mais 13 MWh/ t Al. Para exemplificar o significado deste notável desempenho, a produção de 1 tonelada de alumínio que consuma 14 MWh, equivale ao consumo de 3 toneladas de carvão mineral ou 1,5 toneladas de óleo combustível.

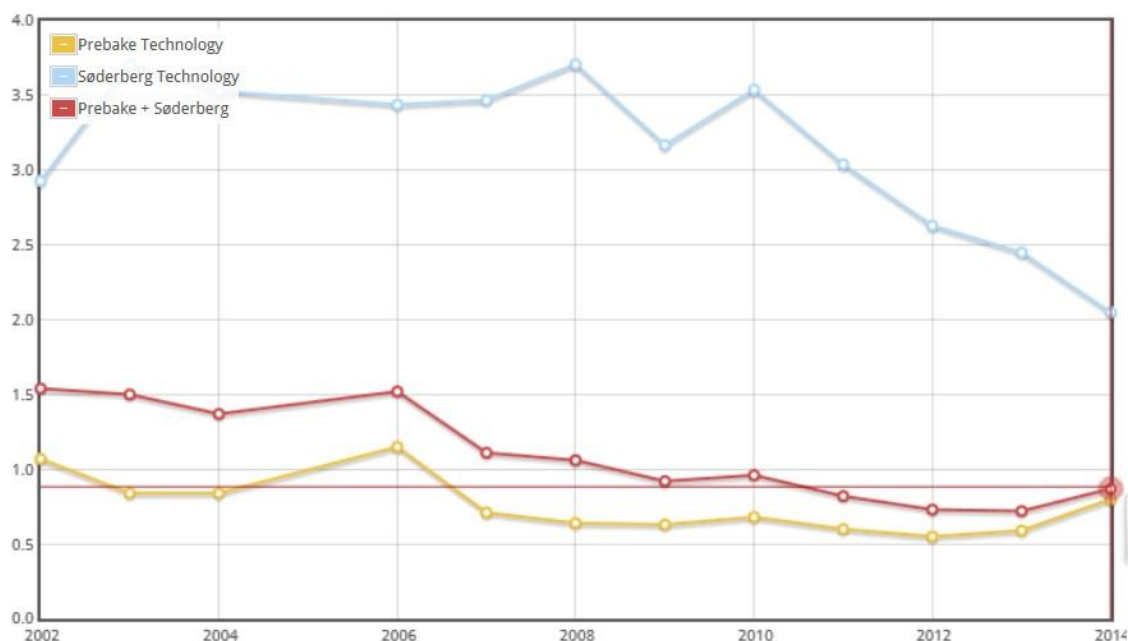
Gráfico 8 - Consumo de energia na produção de alumínio primário



Fonte: Adaptado de IAI (2015 d).

No processo Hall-Hèruolt o eletrólito é uma mistura de sais à base de fluoretos, onde a alumina se encontra dissolvida. A alta temperatura existente possibilita a volatilização de fluoretos, exigindo sua permanente reposição. As emissões de fluoretos têm impactos sobre a saúde humana, além de afetar as vegetações e pastagens nas vizinhanças da planta de alumínio. Pelo Gráfico 9, vê-se que as emissões de fábricas com tecnologias mais velhas (Tecnologia de anodo Soderberg, em cor azul) são bem mais elevadas do que as emissões das fábricas com tecnologias modernas (Tecnologia de anodo precozido, em cor amarela). A linha em cor vermelha representa a média mundial das emissões de fluoretos, já situando-se em torno de 0,8 kg F⁻/t Al.

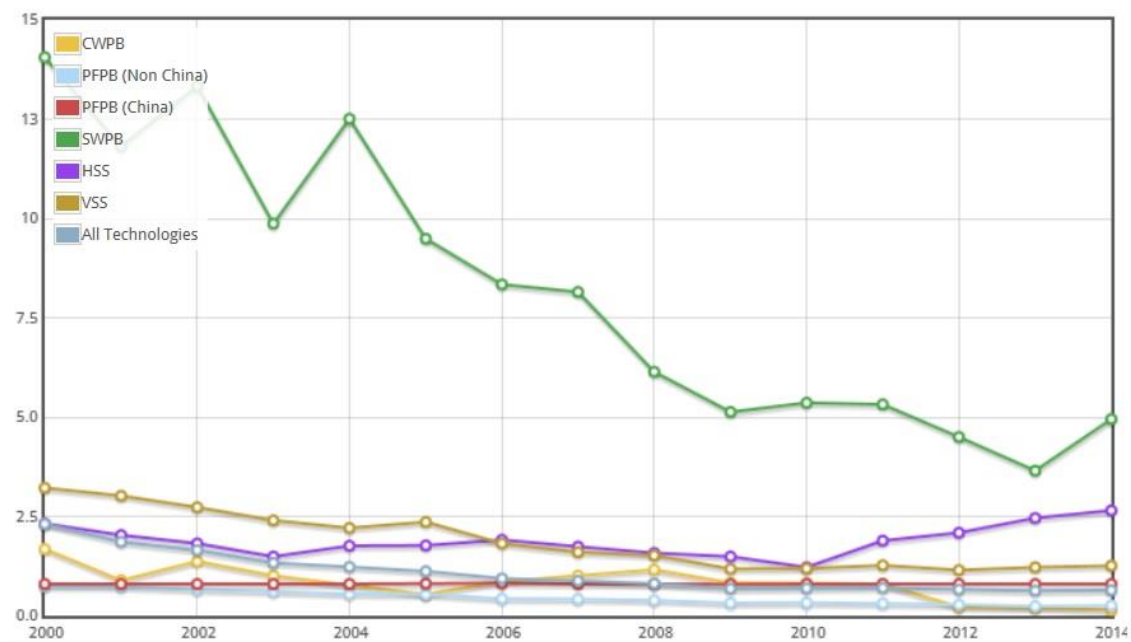
Gráfico 9 - Emissões de Fluoretos em kg F-/t Al



Fonte: Adaptado de IAI (2015b).

O anodo da célula eletrolítica do processo Hall-Hèroult é inteiramente formado por carbono. Durante o processo há oxidação do material carbonoso, redução da alumina e geração de perfluorocarbonos (PFC's), CF_4 e C_2F_6 . As ações de melhorias incidem sobre os PFC's com resultados significativos, como pode ser visto pelo Gráfico 10. Ressalte-se que as linhas estão em cores diferentes e representam as diferentes tecnologias de fornos. A linha em cor azul claro representa a média mundial. As emissões estão em kg CO_2e/t Al (quilogramas de equivalentes de CO_2 por tonelada produzida de alumínio).

Gráfico 10 - emissões de PFC's, em kg CO₂/t Al para diferentes tecnologias de fornos



Fonte: Adaptado de IAI (2015c).

No Gráfico 10 as diferentes cores das linhas representam os tipos de fornos de alumínio, enquanto a linha em cor azul claro representa a média entre todas as tecnologias.

8.2 SIMBIOSE INDUSTRIAL NA GESTÃO DO SPL

A crescente geração de resíduos pelas indústrias é um dos principais impactos ambientais hoje existentes. Uma das ferramentas que pode ser utilizada para a redução desses impactos e realização do desenvolvimento sustentável é a Simbiose Industrial.

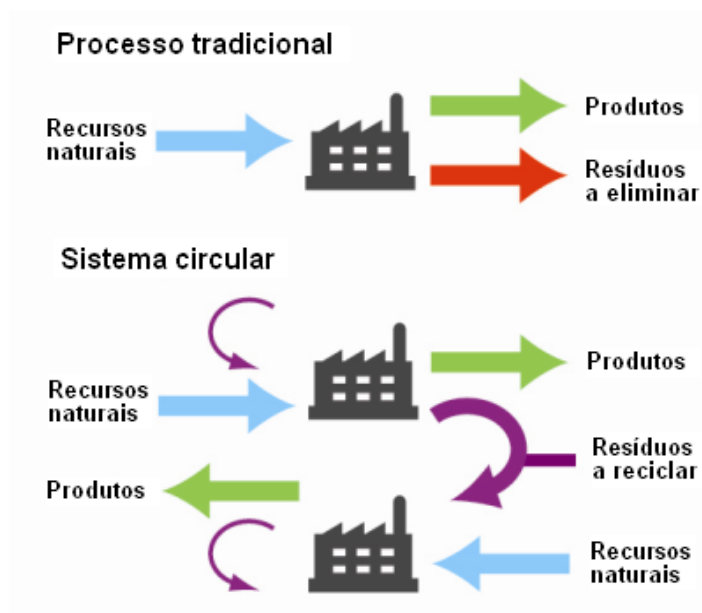
Simbiose industrial é uma iniciativa baseada em um programa britânico, estudado e praticado na América do Norte e Europa desde a década de 1970, cuja proposta é utilizar os resíduos e subprodutos de um setor industrial como insumo para outras cadeias produtivas, alinhando incentivos econômicos com ambientais. Empresas podem reduzir custos e passivos ambientais ao mesmo tempo em que geram receitas, processo que pode ser fortalecido por meio de coordenação e compartilhamento de conhecimentos e melhores práticas (CNI, 2014).

Segundo Mirata e Emtairah (2005), o termo Simbiose Industrial (SI), faz inferência a relação ecológica de simbiose que é descrito como a relação entre

indivíduos de espécies diferentes na qual as duas espécies envolvidas são beneficiadas. No contexto industrial, a SI é a cooperação tanto dos processos produtivos dentro de uma mesma empresa quanto entre várias empresas diferentes, que trocam e partilham entre si diversos serviços e materiais. O conceito está baseado na sinergia entre diferentes atividades produtivas que apresentam maior eficiência de recursos aliados a benefícios ambientais e econômicos.

Os sistemas industriais tradicionais apresentam um fluxo linear de matéria, em que os recursos naturais são utilizados nos processos produtivos e retornam ao meio ambiente sob a forma de resíduos, sem qualquer reaproveitamento no processo. Quando resíduos de um processo industrial é destinado a um segundo processo, o fluxo linear inicial é alterado para um fluxo circular, como mostrado na Figura 23, formando uma interação entre dois processos industriais distintos, um exemplo de simbiose industrial.

Figura 23 - Mudança do processo linear para o o processo linear circular



Fonte: www.google.com.br (2015). Imagens de fluxograma de simbiose industrial.

A integração entre diferentes indústrias deve se dar de forma que os resíduos e subprodutos gerados por uma indústria, que acabariam se transformando em rejeitos a serem tratados, possam servir de matérias primas para outras, reduzindo assim, a disposição de resíduos na natureza. Da mesma forma, a sua utilização

como matéria prima reduz a demanda por novos recursos naturais e a depreciação do meio ambiente (FROSCHE; GALLOPOULOS, 1989).

O coprocessamento em fornos de clínquer na indústria cimenteira é uma prática para o aproveitamento de resíduos em larga escala. Os fornos utilizados para produção de cimento trabalham com temperaturas elevadas e longos ciclos produtivos, favorecendo o processamento de resíduos como SPL, pneus inservíveis e escória de alto forno, por exemplo. Em 2012, foram 58 milhões de pneus e um total de 1,2 milhões de toneladas de resíduos coprocessados pela indústria de cimento, em 37 plantas licenciadas para a prática em todo território nacional. O nível atual de substituição de matérias primas por resíduos na indústria cimenteira brasileira, em 9% atualmente, indica o potencial de crescimento para a prática (CNI, 2014).

Produzir alumínio primário implica em grande dispêndio energético e diversos aspectos ambientais associados. Cientes destas dificuldades os produtores têm feito uso de ciência e tecnologia para aprimorar o processo Hall-Hèruolt, como fica evidenciado neste capítulo.

8.3 VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS

A valorização (ou recuperação) energética é uma forma de tratamento e, muitas vezes, é considerada por especialistas como uma reciclagem que aproveita o potencial energético contido nos resíduos que não possuam formas mais eficientes de serem recuperados. Ela é uma forma complementar no sistema de gestão de resíduos, adotada por muitos países como estratégia para eliminá-los, nos casos em que eles não possam ser reutilizados e reciclados, em detrimento de seu envio a aterros. Cuidadosamente recolhido e selecionado, o lixo pode conter em média 10.000 KJ/kg de energia, o que significa que cada quilograma de resíduo pode acender uma lâmpada de baixo consumo de 12 W (lâmpada convencional de 60 W) durante 75 horas (CNI, 2014).

A valorização energética utiliza uma série de tecnologias avançadas que permitem fazer a recuperação de energia com baixos riscos e impactos ambientais. As diversas tecnologias existentes propiciam gerar energia dos resíduos por meio de sua queima ou da transformação de combustível para uso industrial, mais conhecido como Combustível Derivado de Resíduos (CDR). Essa tecnologia representa uma

nova oportunidade de negócios para as empresas, sendo já utilizada no mundo para geração de energia elétrica ou térmica.

No Brasil, um exemplo de valorização energética é a sua utilização no coprocessamento em fornos de clínquer para produção de cimento, mas apenas para alguns tipos de resíduos. Ela minimiza o uso de aterros sanitários e pode auxiliar municípios de maior porte a ter mais uma opção tecnológica para a gestão de seus resíduos, num arranjo de múltiplas soluções de destinação final (CNI, 2014).

Maringolo (2001) sugeriu um cálculo hipotético para a verificação da economia que o coprocessamento pode representar para uma fábrica de cimento: um forno de clínquer, produzindo 3000 t clínquer/dia, tem um consumo térmico de 800 kcal/kg clínquer, necessitando assim de 2,4 bilhões kcal/dia. Se o combustível utilizado for óleo, com poder calorífico aproximado de 9.500 kcal/kg, seriam necessárias 252,6 t óleo/dia. A substituição de 15% do combustível por resíduos resultaria em 2,04 bilhões kcal/dia, correspondentes a 214,7 t óleo/dia, resultando numa economia de 37,9 t óleo/dia.

Cálculo semelhante pode ser exercitado para o uso do SPL como a fonte de energia térmica secundária na fabricação de cimento, que segundo Pawlek, (2012) varia entre 1.200 Kcal/kg e 3.800 Kcal/Kg. A economia obtida seria entre 4,8 e 15,2 t óleo/dia.

8.4 PROGRAMA MINEIRO DE SIMBIOSE INDUSTRIAL - PMSI, UM EXEMPLO DE PROGRAMA DE SIMBIOSE INDUSTRIAL

De acordo com a *Revista Pollution Engineering* (PROGRAMA..., 2014, p.1)

na busca constante pelo desenvolvimento sustentável das indústrias, a Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais (FIEMG) desenvolve o Programa Mineiro de Simbiose Industrial (PMSI). A iniciativa utiliza a metodologia do britânico NISP (National Industrial Symbiosis Programme), cujo objetivo é promover interações lucrativas entre empresas de todos os setores da indústria.

Na prática, o Programa estabelece negócios a partir dos recursos subutilizados que estejam disponíveis. Ou seja, energia, água, materiais e resíduos provenientes das indústrias podem ser recuperados, reprocessados e reutilizados. Trata-se de uma grande oportunidade de negócios e todas as empresas, independente do tamanho ou do setor, podem participar. A adesão é voluntária e o trabalho em parceria é fundamental.

As oportunidades de simbiose são identificadas em encontros de empresas de diversos setores, quando são apresentadas as ofertas e demandas de materiais e recursos não utilizados para troca. O Programa contribui para a diminuição dos resíduos e o melhor aproveitamento dos recursos disponíveis das empresas participantes.

O projeto-piloto do PMSI foi implementado na região Centro-Oeste de Minas em 2009. Posteriormente, a iniciativa foi levada ao Vale do Aço. Entre as atividades do programa está a realização de workshops em que as empresas troquem ideias, compartilhem experiências, discutam oportunidades de negócios com base na disponibilidade de recursos e resíduos ofertados ou demandados.

Por meio do PMSI, pode-se alcançar uma redução significativa de custos, gerar vendas a mercados alternativos e contribuir para a criação de uma economia ambientalmente sustentável. Com a identificação das oportunidades nos workshops, a equipe técnica envolvida está trabalhando para a consolidação das principais sinergias.

Até dezembro de 2012, os resultados das negociações entre as empresas apresentaram os seguintes dados:

- a) 317 empresas participantes;
- b) 139.793 toneladas de resíduos desviados de aterros;
- c) 194.815 toneladas de redução no uso de matérias-primas virgens;
- d) 87.476 toneladas de redução das emissões de carbono;
- e) 13.650.000 m³ de águas reutilizadas;
- f) 8.768.683 de redução de custos para as empresas (PROGRAMA..., 2014, p.1).

Atualmente, foram identificadas mais de 280 possíveis sinergias, o que significa centenas de empresas em negociação. As oportunidades são referentes a paletes de madeira, carepa de ferro, madeira, fios elétricos, restos de alimentos, ensaios laboratoriais, lodo, tiras de tecido, sucatas de metais e outros (PROGRAMA..., 2014).

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A indústria de alumínio tem obtido progressos no gerenciamento do SPL. Atualmente existem algumas diferentes possibilidades para reaproveitamento de partes ou do todo deste resíduo. Por ser tóxico e perigoso, as abordagens quanto sua disposição e/ou destinação diferem entre os países produtores de alumínio, devido suas diferentes legislações. Entretanto, o coprocessamento do SPL em indústria de cimento Portland tem se mostrado uma opção viável e segura do ponto de vista ambiental e, em muitas situações, gerando economicidade. A disposição, seja em aterros ou galpões, sempre apresentará riscos e custos, pois haverá um passivo a ser gerenciado. Ao contrário, o coprocessamento em fornos de clínquer significa a destinação final do resíduo.

O SPL pode ser visto como uma mistura composta por carbono, tijolos isolantes e refratários. Seu poder calorífico é variável, pois existem diferentes formulações para a construção do catodo da célula eletrolítica. Contudo, valores entre 1.200 e 3.800 Kcal/Kg são citados. Esta característica torna o SPL como uma fonte de energia térmica secundária, possibilitando ser adicionado à fonte primária de energia térmica na fabricação do cimento.

A outra parte é rica em diversos constituintes desejáveis no processo de cimento Portland, exectuando-se o sódio que limita a adição do SPL ao processo. Entretanto, o fluoreto presente atua como mineralizador, possibilitando menor temperatura do forno, ou seja, menos energia térmica para a obtenção do mesmo resultado.

Inegavelmente, à produção do alumínio primário alguns aspectos ambientais se fazem presentes, destacando-se o alto consumo de energia elétrica, as emissões de fluoretos e gases do efeito estufa (caso dos Polifluocarbono – PFCs) e resíduos classe 1 (SPL). Todos estes aspectos têm sido foco da indústria de alumínio, pois impactam diretamente as grandes questões ambientais com que o planeta se depara, além de incidirem diretamente sobre os resultados financeiros.

O alumínio é um metal totalmente inserido na sociedade moderna, encontrando-se presente nos mais variados setores, como: transportes aéreo, rodoviário, ferroviário e marítimo, embalagens, eletrodomésticos, eletroeletrônicos e transporte de energia elétrica, dentre outros. Sua produção industrial data do final do

século XVIII, sendo considerada ainda uma indústria jovem. Embora nos dias atuais os avanços tecnológicos sejam incorporados a todas as etapas de sua cadeia produtiva, significativos aspectos ambientais encontram-se associados, destacando-se o elevado consumo de recursos naturais para sua obtenção, elevada demanda de energia elétrica, emissões de gases do efeito estufa e geração de resíduos sólidos. É fato que cada vez mais a indústria consegue produzir com mais eficiência, seja do ponto de vista do consumo de energia elétrica, quanto menores emissões e melhor gestão de resíduos. Dentre os resíduos gerados na indústria do alumínio primário, o SPL é seu maior problema, por conter cianetos lixiviáveis e fluoretos solúveis. O gerenciamento inadequado deste resíduo pode implicar em contaminação do solo e águas subterrâneas. Entretanto, este mesmo resíduo pode ser utilizado, total ou parcial, em outros processos produtivos. Seu emprego na indústria de cimento é verificado em diversos países, incluindo o Brasil, onde encontra-se instalada uma indústria moderna e dotado de legislações recentes que disciplinam a destinação de resíduos sólidos perigosos. O SPL é destinado à indústria de cimento Portland onde é coprocessado, visto que seus constituintes químicos são demandados por esta indústria. No SPL estão presentes, o carbono, fonte de energia térmica na etapa de clínquerização, diversos óxidos (alumínio, ferro, cálcio, silício) e fluoretos, sendo todos também demandados na produção do cimento Portland.

A disposição de resíduo sólido perigoso sobre solo, *landfill* e galpões representam riscos ao meio ambiente, enquanto sua destinação a outro processo industrial, desde que resguardadas as especificações técnicas, é eficiente método de gerenciamento e conhecido como simbiose industrial.

Na indústria moderna do alumínio primário, encontram-se presentes aplicações dos princípios de Produção Mais Limpa, verificados no menor consumo de energia elétrica e menores taxas de emissão dos gases do efeito estufa.

Enquanto perdurar a produção do alumínio primário pelo atual processo, *Hall-Hèroult*, os mesmos aspectos ambientais se farão presentes, sendo necessária uma busca contínua de suas minimizações.

REFERÊNCIAS

- ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **O alumínio**: alumínio primário. 2010a. Disponível em: <<http://www.abal.org.br>>. Acesso em: 10 jul. 2015.
- ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Documento de referência. Proposta de limites de emissões atmosféricas de fontes fixas, para fábricas existentes, da indústria brasileira de alumínio primário**. São Paulo: 2010a. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/BC1C2A2A/PropPadrEmisFontesFixasALUMINIO_23e24set10.pdf> Acesso em: 12 ago. 2015
- ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Estatísticas**. 2015. Disponível em: <<http://www.abal.org.br/estatisticas/nacionais/>>. Acesso em: 9 ago. 2015.
- ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Fundamentos e aplicações do alumínio**. São Paulo, 2007.
- ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Guia técnico do alumínio: Reciclagem**. São Paulo, 2008.
- ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Relatório da sustentabilidade**. São Paulo, 2012.
- ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Relatório de sustentabilidade da indústria brasileira do alumínio**. São Paulo, 2010b.
- ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. São Paulo, 2012.
- ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. [Portal institucional]. 2015. Disponível em: <www.abcp.org.br>. Acesso em: 23 abr. 2015.
- ABDI - AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL; MDIC - MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO; EXTERIOR FGV - FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS. **Nota Técnica Plano Indústria. Subsetor cimento**. São Paulo: Centro De Estudos Em Sustentabilidade – GVCES, 2012.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 1004**: resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- ALMEIDA, C. V. M. B. de. **Ecologia industrial**: conceitos, ferramentas e aplicações. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 18. ed. Washington D.C. 1992.
- ATKINS, P. ; JONES, L. **Princípios de química**: questionando a vida moderna. 3. ed. São Paulo: Bookman, 2007.

BERGSDAL, H. ; STROMAN, A. H. ; HERTWICH, E. G. The aluminium industry. Environment, Technology and Production. **Report**, n. 8, Trondheim, Norway: NTNU; IndEcol, 2004.

BERNARDO, A. C. de S. Mi. **Otimização estocástica multi-objetivos na produção de cimento Portland com co-processamento de resíduos e adição de mineralizadores**. 2009. 225 f. Tese (Doutorado)- Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Itajubá, 2009.

BRANT FILHO, A. C. et al. Use of spent pot lining in the red brick ceramic industry. **Light Metals**. p.731-734, 1998.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências**. 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 14 ago. 2015.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria Nº 36, de 19 de janeiro de 1990**. Disponível em: <http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/1990/prt0036_19_01_1990.html> Acesso em: 14 ago. 2015.

CBA - COMPANHIA BRASILEIRA DE ALUMÍNIO. **Fundamentos da metalurgia do alumínio**. [S. l.], 2010.

CEMBURAU - THE EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION. **Best available techniques for the cement industry**. 1999. Disponível em: <<http://www.cembureau.be>>. Acesso em: 3 jul. 2015.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Guia de coleta e preservação de amostras**. São Paulo, 1988.

CHANANIA, F. ; EBY, E. **Best Demonstrated Available Technology (BDAT) background document for spent aluminium potliners – K088**. E.U.A.: Environmental Protection Agency, Office of Solide Waste, 2000.

CNI - CONSELHO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Visão da indústria brasileira sobre a gestão de resíduos sólidos**. Brasília, 2014.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA Nº 20 de 18 de junho de 1986**. Brasília, 1986. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res2086.html>>. Acesso em: 29 abr. 2015.

FIRJAN - FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. **Manual de gerenciamento de resíduos**: guia de procedimento passo a passo. Rio de Janeiro: GMA, 2006.

FIRJAN - FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. [Portal institucional]. 2015. Disponível em: <www.firjan.org.br>. Acesso em: 27 abr. 2015.

FROSCH, R. A. ; GALLOPOULOS, N. Strategies for manufacturing. **Scientific American**, v. 261, n.3, p.144-152, 1989.

GOMES, V. et al. **Co-processing at cement plant of spent potlining from the aluminum industry, in essential readings in light metals**: electrode technology for aluminum production. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2013. v.4.

GULF ALUMINIUM COUNCIL. [Portal institucional]. 2015. Disponível em: <www.gac.ae/>. Acesso em: 22 abr. 2015.

GUZZO, T. J. ; BIVALACQUA, T. J.; SCHOENBERG, M. P. Bladder cancer and the aluminium industry: a review. **BJU international**, v. 102, n. 9, p. 1058-1060, 2008

HOLYWELL, R. ; BREAUULT, R. An overview of useful methods to treat, recover, or recycle spent potlining. **JOM**, v. 65, n. 11, p.1441-1451, 2013.

HOP, J. et al. Chemical and physical changes of cathode carbon by aluminium electrolysis. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOLTEN SLAGS FLUXES AND SALTS, THE SOUTH AFRICAN INSTITUTE OF MINING AND METALLURGY, 7., 2004. **Proceedings...** 2004.

HOP, J. G. **Sodium expansion and creep of cathode carbon**. 2003. Thesis. (Doctoral)- Institutt for Material Teknologi Norges Teknisk-Naturvitenskapelige, Universitet Trondheim, 2003.

IAI - INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. **Aluminium for Future Generation. Refining**. 2012. Disponível em: <<http://primary.world-aluminium.org/home.html>>. Acesso em: 22 set. 2015.

IAI - INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. **Aluminium for Future Generation. Refining. Smelting**. Disponível em: <http://primary.world-aluminium.org/home.html>. Acesso em: 22 abr. 2015.

IAI - INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. **The aluminium industry's sustainable development report**. London, 2003.

IAI - INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. **Fluoride Emissions**. 2015b Disponível em: <<http://www.world-aluminium.org/statistics/fluoride-emissions/#linegraph/>>. Acesso em: 29 set. 2015.

IAI - INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. **Industry Statistics. Primary Aluminium Production**. 2015a. Disponível em: <<http://www.world-aluminium.org/statistics/>>. Acesso em: 12 set. 2015.

IAI - INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. **Perfluorocarbon (PFC) Emissions**. 2015c. Disponível em: <http://www.world-aluminium.org/statistics/perfluorocarbon-pfc-emissions/#linegraph> Acesso em: 29 set. 2015.

IAI - INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. [Portal institucional]. 2015. Disponível em: <<http://primary.world-aluminium.org/index.php?id=286&L=0>>. Acesso em: 18 abr. 2015.

IAI - INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. **Primary aluminium smelting energy intensity**. 2015d. Disponível em: <http://www.world->

aluminium.org/statistics/primary-aluminium-smelting-energy-intensity/#linegraph. Acesso em: 29 set. 2015.

IMRIS, M. ; SOUCY, G.; FAFARD, M. Carbon cathode resistance against sodium penetration during aluminium electrolysis-an overview. **Acta Metallurgica Slovaca**, v 11, n. 2, p. 231- 243, 2005.

IPEA - INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Diagnóstico dos resíduos sólidos. Relatório de Pesquisa**. Brasília, 2012.

ISHIKAWA, Y. ; HERAT, S. Use of cement kilns for managing Hazardous waste in developing countries. In: WASTE to energy. Thessaloniki: Aristotle University of Thessaloniki, 2012. p.137-155.

KVANDE, H. Production of primary aluminium. In: LUMLEY, R. (Ed.) **Fundamentals of aluminium metallurgy**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2011. p. 49-69. Disponível em: <<https://books.google.com.br>>. Acesso em: 19 maio 2015.

LAZARINOS, J. G. C. **Tratamento de revestimentos gastos de cuba eletrolítica da indústria do alumínio**. 2007. 151 f. Dissertação (Mestrado)- Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC, Rio de Janeiro, 2007.

LECHTENBERG, D. Spent cell linings from the aluminium smelting process as an alternative fuel and raw material for cement production. **Global Cement Magazine**, p. 36- 37, 2009.

LUO, Z. ; SORIA, A. Prospective study of the world aluminium industry. **JRC Scientific and Technical Reports. EUR**, v. 22951, 2007.

MACEDO, R. S. et al. Estudo de argilas usadas em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 54, n. 332, p. 411-417, 2008.

MARÍNGOLO, V. **Clínquer co-processado**: produto de tecnologia integrada para sustentabilidade e competitividade da indústria de cimento. 2001. 174 f. Tese (Doutorado)- Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2001.

METSON, J. Production of Alumina. In: FUNDAMENTALS of aluminium metallurgy. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011. p. 23-43. Disponível em: <<https://books.google.com.br>>. Acesso em: 12 set. 2015.

MIRATA, M. ; EMTAIRAH, T. Industrial symbiosis networks and the contribution to environmental innovation: The case of the Landskrona industrial symbiosis programme. **Journal of Cleaner Production**, v. 13, p. 993-1002, 2005.

MOURA, L. A. A. de. **Qualidade e gestão ambiental**: sustentabilidade e implantação da ISO 14.001. 5. ed. São Paulo: Juarez de Oliveira, 2008.

NOVELIS DO BRASIL. **PGR – Plano de Gerenciamento de Resíduos**. Camaçari, 2010. (Documento Interno).

ØYE, H. A. Long life for high amperage cells. **Scandinavian Journal of Metallurgy**, v.30, p. 415- 419, 2001.

PARHI, S. S. **Gainful utilization of spent pot lining-A hazardous waste from aluminum industry.** 2014. Tese (Mestrado)-National Institute of Technology. Department of Chemical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, Odisha, India, 2014.

PATNAIK, P. **Propriedades nocivas das substâncias químicas:** guia geral. Tradução de Ricardo Maurício Soares Baptista. Belo Horizonte: Ergo, 2002.

PAWLEK, R. P. **Spent potlining:** an update light metals. [S. l.]: The Minerals, Metals and Materials Society, 2012.

PROGRAMA mineiro de simbiose industrial. **Revista Pollution Engineering**, n.220, maio 2014. Disponível em: <<http://www.revistape.com.br/artigo-tecnico/programa-mineiro-de-simbiose-industrial/220>>. Acesso em: 30 set. 2015.

RAHMAN, A. et al. **Industrial waste as alternative fuel in cement industry:** its impact in environment. Australia: Central Queensland University, School of Engineering and Built Environment, Faculty of Sciences, Engineering and Health, Rockhampton, 2013.

SANCHO, J. P. ; DEL CAMPO, J. J. ; GRJOTHEIM, K. G. **La metalurgia del alumínio.** Düsseldorf: Aluminium - Verlag, 1994.

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE CIMENTO. [Portal institucional]. 2015. Disponível em: <www.snic.org.br>. Acesso em: 23 abr. 2015.

SILVEIRA, B. I. et al. Characterization of inorganic fraction of spent potliners: evaluation of cyanide and fluorides content. **Journal of Hazards Materials**, p.177-183, 2002.

SØRLIE, M. ; ØYE, H. A. **Cathodes in aluminium electrolysis.** 2. ed. Dusseldorf: Aluminium – Verlag, 1994.

TOSTA, L. I.; SOUZA, A. C. de; SILVA, R. J. da. Gestão da energia na produção de cimento portland com uso de mineralizadores e combustíveis alternativos. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 26., 2007, Foz do Iguaçu. **Anais...** 2007.

TURNER, B. D. ; BINNING, P. J. ; SLOAN, S. W. A calcite permeable reactive barrier for the remediation of fluoride from spent potline (SPL) contaminated groundwater. **Journal of Contaminated Hydrology**, v. 95, p. 110-120, 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169772207001052>> Acesso em: 15 jul. 2015.

UNIDO - UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION. [Portal institucional]. 2015. Disponível em: <www.unido.org>. Acesso em: 23 abr. 2015.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral Commodity Summaries.** U.S.A: U.S. Department of the Interior. 2015.

WAO – WORLD ALUMINIUM ORGANIZATION. [Portal institucional]. 2015. Disponível em: <<http://www.world-aluminium.org>>. Acesso em: 12 abr. 2015.

WASTECH ENGENHARIA LTDA. **Procedimento para desmonte do silo de alucoque**. Candeias/Bahia. Fevereiro/2000. (Documento Restrito).

YOUNG, A. G. ; NORDWICK, S. ; FOOTE, M. Review of technologies and the development of a novel approach for spent pot lining remediation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATERIALS ENGINEERING FOR RESOURCES, 4., 2001, Akita, Japan. **Proceedings...** 2001.

YOUNG, C. A. Review of technologies and the development of a novel approach for spent pot lining remediation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATERIALS FOR RESOURCES, 4., 2001, Akita, Japan. **Proceedings...** 2001.

ZENG, L. ; SORIA, A. **Prospective Study of the World Aluminium Industry**. [S. l.]: Joint Research Centre – Institute for Prospective Technological Studies Scientific and Technical Reports. European Commission, 2008.