

**APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO
CICLO DE VIDA NA PRODUÇÃO DE POLPA DE
CONCENTRADO DE MINÉRIO DE FERRO**

Hélio Ferreira

**“APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO
CICLO DE VIDA NA PRODUÇÃO DE POLPA DE
CONCENTRADO DE MINÉRIO DE FERRO”**

Orientador

Profa. Dra. Mariangela Garcia Praça Leite

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade Socioeconômica Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título: “Mestre em Sustentabilidade Socioeconômica Ambiental – Área de Concentração: Desenvolvimento e Meio Ambiente”.

OURO PRETO, MG

2014

F383a	<p>Ferreira, Hélio.</p> <p>Aplicação da metodologia de avaliação do ciclo de vida na produção de polpa de concentrado de minério de ferro [manuscrito] / Hélio Ferreira – 2014.</p> <p>xix, 125 f.: il., color.; graf.; tabs.; fotos e fluxogramas.</p> <p>Orientadora: Profa. Dra. Mariangela Garcia Praça Leite.</p> <p>Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade Socioeconômica e Ambiental.</p> <p>Área de concentração: Desenvolvimento e Meio Ambiente.</p> <p>1. Meio ambiente - Teses. 2. Gestão ambiental - Teses. 3. Ferro – Minas e mineração - Teses. I. Leite, Mariangela Garcia Praça. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.</p>
	CDU: 502.14:622.341

Catálogo: sisbin@sisbin.ufop.br



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

PROÁGUA

**Programa de Pós-Graduação em
Sustentabilidade Socioeconômica Ambiental**



DECLARAÇÃO

Declaro, para os devidos fins de direito, que o aluno **HÉLIO FERREIRA** defendeu sua dissertação intitulada “**Aplicação da Metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida na Produção de Polpa de Concentrado de Minério de Ferro**”, do Mestrado Profissional em Sustentabilidade Socioeconômica Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto, no dia 22 de maio de 2014.

Ouro Preto, 22 de maio de 2014.

Prof. Dr. Antenor Rodrigues Barbosa Jr.
Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade Socioeconômica Ambiental
Coordenador

Universidade Federal de Ouro Preto

Mestrado em Sustentabilidade Socioeconômica Ambiental

**APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA NA
PRODUÇÃO DE POLPA DE CONCENTRADO DE MINÉRIO DE FERRO**

HÉLIO FERREIRA

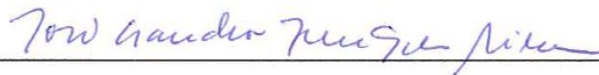
Dissertação defendida e aprovada, em 22 de maio de 2014, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:



Profa. Dra. Mariangela Garcia Praça Leite
Universidade Federal de Ouro Preto



Prof. Dr. Hernani Mota de Lima
Universidade Federal de Ouro Preto



Prof. Dr. José Cláudio Junqueira Ribeiro
Universidade FUMEC

Dedicatória:

Este trabalho é dedicado à minha mãe, D. Lucas, pela inspiração, à Olga, ao Lucas e ao Túlio por serem parte de mim mesmo e a Deus pelo Amor, Graça e Misericórdia com que tem nos abençoado a cada dia.

Agradecimentos

À Samarco Mineração pelo patrocínio durante todo o curso de Mestrado e na elaboração deste trabalho.

Ao Eng^o. Rodrigo Dutra, Gerente de Meio Ambiente, que viabilizou para mim esta oportunidade.

Aos profissionais da GEOCLOCK pela disponibilidade para a aplicação das ferramentas computacionais usadas neste trabalho.

Ao Eng^o. Thales Crivelli Nunes pela parceria em todas as etapas deste trabalho.

À Professora Dra. Mariângela Garcia Praça Leite pela orientação segura e exigente.

“De uma coisa sabemos. A terra não pertence ao homem: é o homem que pertence à terra, disso temos certeza. Todas as coisas estão interligadas, como o sangue que une uma família. Tudo está relacionado entre si. Tudo quanto agride a terra agride os filhos da terra. Não foi o homem quem traçou a trama da vida: ele é meramente um fio da mesma. Tudo o que ele fizer à trama, a si próprio fará.”

Cacique Seattle, 1854.

(Extraído do artigo de Henry Smith publicado no periódico “*The Seattle Sunday Star*”, em 20/10/1887)

Tradução: Equipe Floresta Brasil. <http://www.florestabrasil.org.br>. Acesso em 29/05/2013.

RESUMO

O controle efetivo dos problemas ambientais causados pela mineração implica no monitoramento e tratamento adequados dos diversos e variados impactos derivados desta atividade e do cumprimento da legislação pertinente. Para isso, novas estratégias e metodologias são necessárias, como é o caso da avaliação do ciclo de vida (ACV). Infelizmente, o setor de mineração ainda faz pouco uso desta ferramenta. Este estudo é uma das primeiras avaliações realizadas no Brasil. Ele adotou a abordagem “do berço ao portão”, avaliando os processos de lavra e beneficiamento de minério de ferro. O estudo foi baseado em dados primários do processo da Samarco Mineração, em sua unidade industrial de Germano, nos municípios de Mariana e Ouro Preto, em Minas Gerais, e para os processos à montante foram extraídos dados do Ecoinvent v2.0, ambos consolidados utilizando-se a ferramenta SimaPro 7. O principal resultado deste trabalho foi atestar a aplicabilidade da ACV para avaliação de impactos ambientais da mineração, observando sua capacidade de produzir informações sistêmicas acerca do impacto de um produto, e não meramente de um processo isolado. Os resultados obtidos sugerem que os processos de produção e de uso dos corpos moedores são fontes de impactos ambientais importantes na cadeia de produção do concentrado de minério de ferro, sendo contribuinte de destaque para quase todas as categorias de impactos avaliadas. Informação esta que não seria facilmente visível em ferramentas mais localizadas de avaliação de impactos, abrindo inclusive espaço para discussões de mais alto nível, como substituição de materiais. Além disso, o consumo de diesel nos equipamentos de atividade de lavra foi apontado como o principal contribuinte para o impacto sobre o esgotamento de combustíveis fósseis.

Palavras-chave: Meio Ambiente; Gestão Ambiental; Avaliação de Impactos Ambientais; Avaliação do Ciclo de Vida; Minério de Ferro.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE SIGLAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiv
1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Objetivos	18
1.2. Elaboração do texto	18
2. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)	20
2.1. Histórico	20
2.2. A Metodologia de ACV	23
2.3. Potencialidades e limitações da ACV	31
2.4. Exemplos de aplicação de ACV	33
2.4.1. Exemplos de aplicação de ACV no Brasil	33
2.4.2. Exemplos de aplicação de ACV no Setor Mineral	34
3. O MINÉRIO DE FERRO	37
3.1. O Minério de Ferro no Brasil	38
3.1.1. Histórico	38
3.1.2. Cenário Atual	42
3.1.3. Cenário Futuro	43
3.2. Impactos Ambientais da Produção de Minério de Ferro	44
3.2.1. Impactos devido ao uso e ocupação do solo	46
3.2.2. Impactos sobre os recursos hídricos	52
3.2.3. Impactos sobre os recursos atmosféricos	56
3.2.4. Impactos sobre o esgotamento dos recursos naturais	58
3.2.5. Outros Impactos	60
3.3. Minério de Ferro na Samarco	60
3.3.1. Processo de Produção	62
4. MATERIAIS E MÉTODOS	65
4.1. Fase 1 – Definição do Objetivo e do Escopo	65
4.2. Fase 2 - Inventário do Ciclo de Vida	69
4.3. Fase 3 - Impactos do Ciclo de Vida	76
4.4. Fase 4 - Interpretação dos Resultados dos Impactos do Ciclo de Vida	90
5. RESULTADOS	92
5.1. Interpretação do Ciclo de Vida	92
5.2. Comparação de Resultados	110
6. CONSIDERAÇÕES GERAIS E CONCLUSÃO	114
6.1. Considerações Gerais	114
6.2. Conclusão	115
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	118

LISTA DE FIGURAS

		Página
Figura 1.1	Aumento da População Mundial.	15
Figura 2.1	Diagrama representativo das Fases de uma ACV.	24
Figura 2.2	Diagrama ilustrativo de Limites de um sistema considerando as Fronteiras do Processo.	25
Figura 2.3	Fluxo de Entradas e Saídas nas Unidades de Produção de Cobre em minas no México.	27
Figura 2.4	Exemplo de Categorias de Impacto <i>Midpoint</i> e <i>Endpoint</i> para as emissões de gases CFC.	30
Figura 3.1	Diagrama Exemplificando o Ciclo do Minério da lavra ao Consumo final.	38
Figura 3.2	Cenário Futuro da Produção de Minério de Ferro no Brasil.	44
Figura 3.3	Atividade de Mineração e seus Impactos Ambientais.	45
Figura 3.4	Aspecto de uma Praça de Lavra de Minério de Ferro em Atividade.	46
Figura 3.5	Cava Exaurida antes do Início dos trabalhos de reabilitação ambiental.	47
Figura 3.6	Área de mineração em reabilitação ambiental.	47
Figura 3.7	Subsidência: uma seção de uma estrada destruída por subsidência geológica.	48
Figura 3.8	Subsidência: causada por rebaixamento do lençol freático em mina de ouro na Nova Zelândia.	48
Figura 3.9	Esquema de funcionamento de uma mina subterrânea.	49
Figura 3.10	Detalhe de uma galeria de mina subterrânea.	50
Figura 3.11	Desmonte mecânico de rochas no interior de uma galeria de mina subterrânea.	50
Figura 3.12	Depósito de rejeitos dos processos de beneficiamento de minério.	51
Figura 3.13	Depósito de estéril de minas de minérios de ferro em pilhas antes e depois do início do processo de reabilitação.	52
Figura 3.14	Barragem de tratamento/recuperação de água de processo.	54
Figura 3.15	Água consumida durante as atividades de umectação das praças de Lavra.	55
Figura 3.16	Água consumida durante as atividades de umectação das vias.	55
Figura 3.17	Via em área de mineração umectada por aspersão de água.	56
Figura 3.18	Água consumida pela evaporação na superfície dos lagos.	56
Figura 3.19	Geração de poeira e emissões atmosféricas pelos equipamentos de mineração – Aspersão de água para controle da poeira.	57
Figura 3.20	Emissão de gases de efeito estufa pelos equipamentos móveis durante as atividades de mineração.	58
Figura 3.21	Operação de lavra do minério de ferro nas minas de Alegria.	61
Figura 3.22	Vista Geral da Usina de Concentração 2, de Germano.	61
Figura 3.23	Principais clientes da Samarco.	63
Figura 3.24	Fluxograma esquemático do processo produtivo da Samarco.	64
Figura 4.1	Fluxograma do Processo Industrial da Unidade de Germano.	66

Figura 4.2	Limites do sistema de ACV para a produção do minério de ferro em Germano.	67
Figura 4.3	Fluxo esquemático para a produção da Unidade Funcional.	69
Figura 4.4	Fluxograma do Processo da Usina I.	71
Figura 4.5	Fluxograma do Processo da Usina II.	72
Figura 4.6	Ferramentas Computacionais usadas na Avaliação do Impacto ciclo de vida.	76
Figura 4.7	Representação esquemática dos três passos para a aplicação do Método Eco-Indicator 99.	80
Figura 4.8	Avanços da escassez de reservas minerais em relação ao seu teor.	87
Figura 4.9	Passos usados na elaboração do Inventário deste Estudo.	88
Figura 4.10	Fluxo produtivo estudado mostrando a necessidade de produção em cada etapa do processo para a produção de 1,00 tonelada de minério concentrado.	91
Figura 5.1	Fluxograma mostrando a descrição dos impactos à Saúde Humana referentes à emissão de Substâncias Inorgânicas Inaláveis.	93
Figura 5.2	Gráfico em barras mostrando a contribuição das diversas substâncias inorgânicas inaláveis para o impacto total.	94
Figura 5.3	Fluxograma mostrando a descrição dos impactos à Saúde Humana referentes à emissão de substâncias Carcinogênicas.	96
Figura 5.4	Gráfico em barras mostrando a contribuição para a Categoria de Impacto das Substâncias Carcinogênicas presentes nas emissões para o ambiente durante a produção de minério.	97
Figura 5.5	Fluxograma mostrando a descrição dos impactos à Qualidade dos Ecossistemas referentes à Ecotoxicidade.	99
Figura 5.6	Gráfico em barras mostrando a contribuição para a Categoria de Impacto de Ecotoxicidade das substâncias presentes nas emissões para o ambiente durante a produção de minério.	100
Figura 5.7	Fluxograma mostrando a descrição dos impactos à Qualidade dos Ecossistemas referentes ao Uso do Solo.	101
Figura 5.8	Gráfico em barras mostrando a contribuição das atividades da empresa, bem como as atividades de produção de insumos, para a Categoria de Impacto de Uso do Solo.	101
Figura 5.9	Fluxograma mostrando a descrição dos impactos aos Recursos Naturais referentes ao Esgotamento de Recursos Minerais.	103
Figura 5.10	Gráfico em barras mostrando a contribuição dos processos de extração mineral para a Categoria de Impacto de Esgotamento de Recursos Naturais.	103
Figura 5.11	Fluxograma mostrando a descrição dos impactos aos Recursos Naturais referentes ao Consumo de Combustíveis Fósseis.	105
Figura 5.12	Contribuição para a Categoria de Impacto de Esgotamento de Recursos Energéticos de origem fóssil relativa aos consumos de Combustíveis Fósseis nos processos de produção de minério e dos insumos utilizados.	106
Figura 5.13	Fluxograma mostrando a descrição dos impactos sobre o Aquecimento Global referente à Emissão de Gases de Efeito Estufa.	108
Figura 5.14	Gráfico em barras mostrando a contribuição para a Categoria de Impacto de Emissões de Gases de Efeito Estufa relativa à queima de Combustíveis nos processos de produção de minério e na produção dos insumos utilizados.	109

LISTA DE TABELAS

		Página
Tabela 2.1	Tipos de estudos de ACV.	23
Tabela 2.2	Exemplo de Modelo de Caracterização de Impacto.	29
Tabela 3.1	Oferta Mundial de Minério de Ferro em 2011.	43
Tabela 3.2	Distribuição das Reservas de Minério de Ferro no Brasil.	43
Tabela 3.3	Características médias do Concentrado do Minério produzido em Germano.	63
Tabela 4.1	Dados de Produção da Samarco.	69
Tabela 4.2	Componentes do balanço de massa utilizado no estudo.	70
Tabela 4.3	Balanço de Massa da Usina I.	70
Tabela 4.4	Balanço de Massa da Usina II.	71
Tabela 4.5	Dados combinados dos balanços de massa.	72
Tabela 4.6	Inventário do Ciclo de Vida da Etapa “Mineração”.	73
Tabela 4.7	Inventário do Ciclo de Vida da Etapa “Beneficiamento” – Entradas.	74
Tabela 4.8	Inventário do Ciclo de Vida da Etapa “Beneficiamento” – Saídas.	75
Tabela 4.9	Inventário do Ciclo de Vida da Etapa “Sistemas de Apoio”.	75
Tabela 4.10	Método IPCC – Potencial de Aquecimento Global para diversos Gases, tomando como referência kg CO ₂ equivalente.	90
Tabela 5.1	Resultados dos Danos associados às três Categorias de Impactos adotadas pelo Método Eco-Indicator 99.	92
Tabela 5.2	MIX de Produção da Energia Elétrica Brasileira.	95
Tabela 5.3	Valores da Energia Excedente Necessária para vários minérios.	104
Tabela 5.4	Resultados dos Danos associados às Mudanças Climáticas pelo Método IPCC-2007 100 anos.	107
Tabela 5.5	Comparação dos resultados da ACV da Samarco com outros estudos similares disponíveis na bibliografia consultada.	111

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Análise de Ciclo de Vida
AICV	Análise do Inventário de Ciclo de Vida
AMD	<i>Acid Mine Drainage</i>
ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviário
CBMM	Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração
CML	<i>Chain Management by Life Cycle Assessment</i>
COP 15	15ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas – Copenhague/2010.
CT	Comitê Técnico – ISO/ABNT
DALY	<i>Disabled Adjusted Life Years</i>
DIPLAN	Diretoria de Planejamento e Desenvolvimento da Mineração (DNPM)
DNPM	Departamento Nacional da Produção Mineral
EMPA	<i>The Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology</i>
EPS	<i>European Physical Society</i>
ETH	<i>Swiss Federal Institute of Technology Zurich</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
IBICT	Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i>
LCI	<i>Life Cycle Inventory</i>
MBR	Minerações Brasileiras Reunidas
MCT	Ministério de Ciência e Tecnologia
MHSPE	<i>Ministry of Housing Spatial Planning and the Environment</i>
MME	Ministério das Minas e Energia
NOEC	<i>Non Observed Effect Concentration</i>
NBR	Norma Brasileira
OMS	Organização Mundial da Saúde (<i>WHO</i>)

ONU	Organização das Nações Unidas
OPEP	Organização dos Países Exportadores de Petróleo
PAF	<i>Potentially Affected Fraction of Species</i>
PAG	Potencial de Aquecimento Global
PDF	<i>Potentially Disappeared Fraction of Species</i>
PIB	Produto Interno Bruto
PIPGE	Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia – USP
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (<i>UNEP</i>)
PRAD	Plano de Recuperação de Áreas Degradadas
PSI	<i>Paul Scherre Institute (Swiss)</i>
REPA	<i>Resource and Environmental Profile Analysis</i>
RIO + 20	Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável – Rio 2012
ROM	<i>Run of Mine</i>
SETAC	<i>Society of Environmental Technology and Chemistry</i>
TCLD	Transportador de Correias de Longa Distância
TR	<i>Technical Report (ISO)</i>
UF	Unidade Funcional
UNEP	<i>United Nations Environment Program (PNUMA)</i>
UNESCO	<i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i>
UNFPA	<i>United Nations Population Fund</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
UV	Ultra violeta
YLD	<i>Years Lived Disabled</i>
YLL	<i>Years of Life Lost</i>
WHO	<i>World Health Organization (OMS)</i>

LISTA de SÍMBOLOS

Al_2O_3	Alumina – Óxido de Alumínio III
CFC	Clorofluorcarboneto
CH_4	Gás Metano - Hidreto de Carbono
CO	Monóxido de Carbono
CO_2	Dióxido de Carbono
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
Fe	Ferro (elemento químico)
Fe_2O_3	Oxido de Ferro III (Hematita)
g	Gramas – unidade de peso – Sistema CGS
kg	Quilograma – unidade de peso – Sistema MKS
km	Quilometro
kWh	Quilowatt-hora
m	Metro - unidade de distância – Sistema MKS
MJ	Mega-Joule
MWh	Megawatt-hora
N_2O	Óxido Nitroso
NO_x	Óxidos de Nitrogênio
P	Fósforo (elemento químico)
PM-10	Partículas inaláveis, de diâmetro inferior a 10 micrometros
PM-2,5	Partículas respiráveis, de diâmetro inferior a 2,5 micrometros
PPC	Perda por Calcinação (Perda ao Fogo)
P_2O_5	Óxido de Fósforo-V
SE	Superfície Específica
SiO_2	Sílica – Dióxido de Silício
SO_2	Dióxido de Enxofre
SO_x	Óxidos de Enxofre
T, t ou ton.	Tonelada
t/d	Tonelada por dia
TMN/d	Toneladas Métricas Naturais por dia
TMS/d	Toneladas Métricas Secas por dia
#	<i>Mesh</i> – abertura de peneiras usadas em análises granulométricas – referem-se ao número de aberturas por polegada quadrada.

1. Introdução

Em outubro de 2011 a população mundial atingiu a notável marca dos 7 bilhões de habitantes (ONU, 2012, p. 1). O crescente aumento da população mundial bem como o acesso de grande parte desta população aos bens de consumo têm obrigado as empresas a produzir cada vez mais para atender a esta demanda. Por outro lado, este aumento de demanda tem gerado conseqüências indesejáveis, quer seja na fase de produção, ou na fase de uso e descarte de produtos e seus resíduos, que acabam por produzir degradação nos ambientes em que se encontram. Temas como aquecimento global, extinção de espécies, destruição de matas e florestas em grande escala, esgotamento de recursos naturais, epidemias e doenças no nível local ou regional decorrem principalmente do desenvolvimento industrial. Este desenvolvimento é feito, muitas vezes, mostrando uma supremacia do aspecto econômico sobre os social e, principalmente sobre o aspecto ambiental (UNEP, 2006, p. 8 e 9). Neste contexto, a avaliação de sustentabilidade de produtos ou tecnologias é normalmente vista como englobando os impactos em três dimensões: social, ambiental e econômica (Elkington, 1998 *apud* FINNVEDEN *et al.*, 2009, p. 2).

A **Figura 1.1** mostra as datas em que o número de pessoas vivas no planeta alcançou a marca de cada bilhão, segundo a ONU (UNPFA, 2011, p. 2 e 3). Uma análise desta figura mostra que se a população mundial precisou de 123 anos para passar de 1bilhão para 2 bilhões, levou apenas 12 anos para passar de 6 para os atuais 7 bilhões de habitantes.

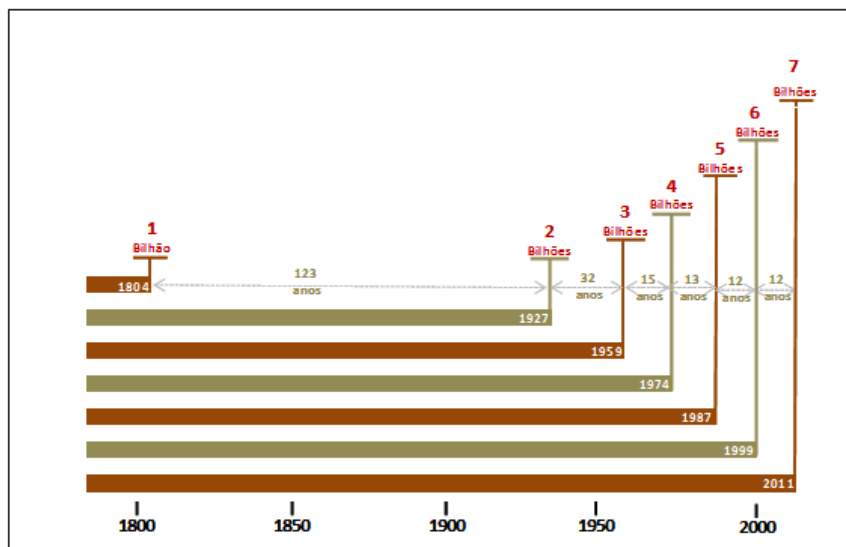


Figura 1.1 Aumento da População Mundial – em bilhões de habitantes.

Fonte: Adaptado de: UNPFA, 2011, p. 2 e 3.

Eventos internacionais, como a recente conferência sobre mudanças climáticas, a COP15 em Copenhague 2009 e Rio+20 em 2012, mostram não só uma preocupação política com a questão do desenvolvimento sustentável, mas principalmente demonstram a existência de um clamor das sociedades mais organizadas em repúdio ao desenvolvimento a qualquer preço. Há, então, uma necessidade urgente de se considerar as variáveis relativas ao meio ambiente em todas as atividades da vida moderna. Por este motivo, a avaliação de impactos ambientais mostra-se um tema importante a ser tratado pelas empresas levando-se em conta os três conceitos basilares do desenvolvimento sustentável. Hoje em dia, não basta conhecer as demandas do mercado, mas também adotar metodologias e processos que permitam saber como criar produtos para satisfazer estas demandas conhecendo todos os impactos ambientais associados à produção, ao seu uso e até a disposição final dos resíduos derivados de um produto. Do ponto de vista econômico este cuidado é também de grande valia especialmente para a empresa, pois, em diversos mercados, produtos e serviços projetados sob esta visão alcança grande vantagem competitiva. A atenção ao meio ambiente e a tudo que o cerca é sinônimo de boa imagem para as empresas e isso se justifica porque cada vez mais pessoas estão tomando conhecimento de que seus hábitos de consumo e suas atitudes podem prejudicar o meio ambiente, como mostra o estudo *Is the future yours?* feito em 2001, com jovens de 24 países, pela UNESCO – Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura, juntamente com o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – PNUMA / UNEP. Segundo este estudo 50% dos jovens considera o meio ambiente como um critério de compra (AKATU, 2001, p. 32 e 44), ou seja, dão preferência a produtos e serviços que agriram menos o meio ambiente.

O processo de globalização e a conseqüente abertura de novos mercados tornam a questão ambiental um fator de competição no comércio internacional, pondo em desvantagem, crescentemente visível, as empresas que não adotarem práticas sustentáveis em relação a processos produtivos e produtos (Lerípio, 2001 *apud* NUNES, 2007, p. 2). O estudo “A Cadeia da Sustentabilidade” realizado, em 2009, pela Empresa de Consultoria Deloitte, com mais de 100 empresas brasileiras de grande porte, mostrou que 84% apontaram a imagem da empresa como a grande favorecida pelo bom comportamento socioambiental. Já 59% apontaram a conquista de novos mercados e para 58% foi a produtividade. NUNES (2007, p. 2) salienta que as indústrias estão se

adaptando a estes novos padrões e certamente sua sobrevivência no mercado dependerá de oferecer o produto que cause o menor impacto ambiental possível. ENRIQUEZ (2008, p. 53) evidencia que o desenvolvimento sustentável pretende sustentar ou elevar, simultaneamente, a qualidade ambiental, o bem estar econômico e a justiça social, uma vez que na prática, atividades que mantêm ou elevam apenas o bem estar econômico ocorrem a expensas de degradação ecológica. A melhoria da qualidade ecológica, em algum ponto do tempo, implica em dispêndios de recursos financeiros que poderiam ser gastos para a melhoria do bem estar econômico ou da justiça social.

Assim, a sustentabilidade tem-se tornado a cada dia mais presente no gerenciamento das empresas. Metodologias como a “*Produção Mais Limpa*”, a “*Emissão Zero*” e o “*Sistema de Gestão Ambiental*” têm sido largamente usadas como parte das políticas das empresas com o objetivo de minimizar os impactos ambientais de seus processos produtivos (NUNES, 2007, p. 3). Hoje, no entanto, é importante não só ter um processo de produção ambientalmente adequado, mas também conhecer os impactos ambientais do produto durante o seu uso e até a sua disposição final. Desta forma todas as ferramentas que ajudem a conhecer o processo de produção e o produto acabado, bem como suas interações com o ambiente estão despertando o interesse das empresas. Isto não só pela nova cultura conservacionista que estamos vivendo, mas como forma de antever as tendências e garantir sua permanência no mercado. Estas metodologias de redução de impactos ambientais sugerem abordagens diferentes para se alcançar o mesmo objetivo que é a minimização dos impactos ambientais nos diferentes processos produtivos. Mas, embora a prevenção da poluição nos processos de produção seja uma boa prática, é preciso alertar que o produto acabado também causa impactos ambientais, tanto durante o seu uso quanto na sua disposição como resíduo (UNEP, 2006, p. 8). Em UNEP (2006, p. 9) encontramos a afirmação de que o conceito de *ciclo de vida do produto* é essencial no caminho para a sustentabilidade porque expande o foco do local de produção para todo o ciclo de vida do produto. Uma das ferramentas que vai no encontro deste conceito é a “*Análise do Ciclo de Vida*” (ACV), objeto desse estudo.

A metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida já encontrou uma boa receptividade nos países desenvolvidos e se mostra como uma ferramenta de avaliação de desempenho ambiental, completa e objetiva. Os recentes progressos alcançados por algumas empresas na adoção da Avaliação do Ciclo de Vida do Produto (ACV) e a publicação da NBR ISO 14040, vêm levando diversas empresas brasileiras a buscar esta nova forma de entender a gestão ambiental, visando efetivar seus compromissos com a

sustentabilidade. BLENGINI *et al.*, (2012, p.177) ressaltam que a sustentabilidade é uma meta oficial de muitas políticas da União Europeia, inclusive aquelas que estão direta ou indiretamente relacionadas com recursos minerais, além disso, o conceito de ciclo de vida pode ser considerado o núcleo para muitas destas políticas.

Assim, este trabalho apresenta um planejamento para a aplicação da ACV nos moldes, princípios e estruturas definidos pela Norma ISO 14040, para os processos de produção de minério de ferro da Samarco na Unidade de Germano, nos municípios de Mariana e Ouro Preto, Minas Gerais. Trata-se de um projeto pioneiro na área de mineração, sendo o primeiro com mineração de ferro no país.

1.1. Objetivos

Este trabalho pretendeu aplicar a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida – ACV, na produção da polpa de concentrado de minério de ferro, a partir de dados dos boletins de produção elaborados diariamente na Unidade Operacional de Germano - SAMARCO, que compreende as operações de lavra de mina e beneficiamento do minério para a produção de concentrado. Em outras palavras o objetivo principal deste trabalho foi estimar os impactos da mineração de ferro em lavra a céu aberto, adotando-se um sistema “do berço ao portão”, usando os princípios gerais da série de normas NBR-ISO 14040, para a avaliação do ciclo de vida de produtos e adaptá-los à situação peculiar para as operações com minério de ferro. Assim, o estudo buscou informações, ainda que em fontes gerais, sobre os impactos relevantes associados às operações de produção de suas principais matérias primas, insumos e equipamentos.

O estudo pretende com seus resultados contribuir para uma melhor compreensão das contribuições das fases de lavra e dos processos de beneficiamento para o impacto global do minério produzido. Além de verificar se a metodologia poderá ser aplicada em projetos e estudos de alteração e melhorias das unidades industriais permitindo que se conheçam, *a priori*, quais seriam os efeitos de tais mudanças sobre o meio ambiente.

1.2. Elaboração do texto

Como resultado final este trabalho apresenta o processo industrial alvo deste estudo, bem como os seus limites e o escopo do mesmo. Atenção especial foi dada à descrição dos balanços de massa e para cada sistema de produto identificado. Os resultados estão apresentados através das categorias de impacto e das unidades de medida associadas a

cada categoria presente nas etapas do processo em estudo. Assim, para cada etapa do processo as emissões para o meio ambiente são mensuradas para compor o inventário de impactos ambientais. Os resultados do inventário e da avaliação do ciclo de vida são apresentados no Capítulo 5. Estes resultados foram usados como base para se chegar às conclusões apresentadas no Capítulo 6, onde também se buscou verificar se a análise de impacto ambiental baseada na metodologia da ACV mostrou-se viável para permitir identificar quais das diversas fases do processo de produção de polpa de minério de ferro são potenciais fontes de impactos ambientais significativos.

2. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

Segundo SILVA (2005, p. 8) a ACV é um processo de avaliação das consequências das atividades de uma empresa, associadas ao produto e ao processo de produção, através da identificação e quantificação dos seus principais parâmetros de operação, tais como: energia empregada, materiais usados e emissões para a natureza. O conceito de avaliação de ciclo de vida deve ser entendido como um processo, pois a cada fase de sua implantação é necessário uma revisão das fases anteriores e, caso necessário, sua readequação.

A análise do ciclo de vida é uma ferramenta para avaliar o potencial de impacto sobre o meio ambiente e os recursos utilizados ao longo da vida de um produto, abrangendo desde a aquisição de matérias primas, passando pelas fases de produção e uso até a gestão dos resíduos finais deste produto (ISO, 2006 *apud* FINNVEDEN *et al.*, 2009, p. 1). Ou seja, a ACV é uma abordagem ambiental não só sobre as fases de produção, mas também sobre as fases anteriores de produção de insumos e matérias primas e sobre as fases posteriores de uso de um produto até o seu descarte como resíduo (GUINÉE *et al.*, 1993 e YELLISHETTY *et al.*, 2011, p.78).

2.1. Histórico

Acredita-se que o início da ACV está ligado à crise do petróleo nas décadas de 1960 a 1980, que devido ao boicote internacional promovido pela Organização dos Países Exportadores de Petróleo – OPEP – provocou um aumento drástico no preço do barril que chegou a cerca de 1500%, o que levou a economia mundial a uma crise sem precedentes (CHEHEBE, 2002, p. 1; VIANA, 2008, p. 9; CAMARGO, 2007, p. 7; RAMIREZ, 2009, p. 21). Foi durante este período conturbado que na década de 1970 as primeiras ideias que adotavam o conceito do que hoje chamamos de ACV surgiram a partir do desenvolvimento das “Análises de Perfil Ambiental e de Recursos – REPA” (Hunt, Sellers, Franklin, 1992 *apud* CAMARGO, 2007, p. 7), esta se tornou a designação histórica para os de ciclo de vida utilizados nos Estados Unidos na década de 1970 (FERREIRA, 2004, p. 7). Nesta fase são famosos os casos custeados exclusivamente pela iniciativa privada tais como o estudo desenvolvido para a *Coca*

Cola com a finalidade de estimar as emissões ambientais decorrentes do ciclo de vida de tipos diferentes de embalagens, além de comparar o seu desempenho em relação ao consumo de recursos naturais (DITSELE, 2010, p. 25; CHEHEBE, 2002, p. 2; RAMIREZ, 2009, p. 21; Curran, 1996 *apud* CAMARGO, 2007, p. 7 e Sonneman *et al.*, 2002 *apud* FERREIRA, 2009, p. 27).

A partir da década de 1980, entretanto os estudos relacionados ao conceito de ciclo de vida foram se reduzindo gradativamente devido a atenuação da crise do petróleo neste período (CAMARGO, 2007, p. 8). Foi apenas no final desta década com o aumento da preocupação com o destino dos resíduos produzidos, principalmente os diferentes tipos de embalagens, que ressurgiu o interesse por ferramentas de comparação e avaliação do desempenho ambiental (Vigon *et al.*, 1993 *apud* RIBEIRO, 2003, p. 13). Na metade da década de 1980 a Comunidade Europeia adotou a ACV como metodologia de auto-monitoramento das empresas, quanto aos seus consumos de matérias primas e energia (Christiansen, 1996; Fava *et al.*, 1990 *apud* RIBEIRO, 2003, p. 13). A partir desta tomada de posição, o interesse pela ACV foi crescendo, propiciando uma diversificação cada vez maior de seu uso e usuários. Em busca de uma base conceitual mais sólida e uniforme, diversas instituições têm empregado esforços e recursos. Destaca-se o papel desempenhado pela *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* – SETAC – com seus esforços para padronizar uma metodologia acerca dos estudos de ACV, criando modelos de análises de impactos ambientais que permitam a comparação entre processos e produtos (RIBEIRO, 2003, p. 13). Através de seus ramos na Europa e nos Estados Unidos a SETAC desempenha um papel fundamental em reunir profissionais, utilizadores e investigadores para colaborarem no melhoramento contínuo da metodologia de ACV (FERREIRA, 2004, p. 7).

Com a evolução do conceito de ciclo de vida e o reconhecimento de sua importância como ferramenta de gestão ambiental, era inevitável que houvesse um procedimento que sistematizasse a Análise do Ciclo de Vida (RIBEIRO, 2003, p.13).

Foi apenas no início da década de 1990 que a *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC) direcionou seus esforços para padronizar uma metodologia acerca dos estudos de ACV, criando modelos que sumarizasse a análise de impactos ambientais e possibilitar, portanto, a comparação dos resultados de diferentes estudos decorrentes do conceito de ciclo de vida (CAMARGO, 2007, p. 8; MARZULLO, 2007, p.19).

A padronização da metodologia ganhou um grande impulso com a adoção do tema pela Organização Internacional para a Normalização - ISO - que resultou na criação da família de normas ISO 14.040 (LIMA, 2007, p. 28). No Brasil, a *Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT* – como representante da ISO, tem divulgado e publicado estas normas em Português (RIBEIRO, 2003, p. 14).

Atualmente as seguintes normas que tratam da ACV encontram-se publicadas:

- ◆ NBR ISO 14040: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura;
- ◆ NBR ISO 14041: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Definição de Objetivo e Escopo e Análise de Inventário;
- ◆ NBR ISO 14042 - Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida;
- ◆ NBR ISO 14043 - Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Interpretação do Ciclo de Vida.
- ◆ NBR ISO 14064-1, Gases de efeito estufa – Parte 1: Especificação e orientação a organizações para qualificação e elaboração de relatórios de emissões e remoções de gases de efeito estufa.
- ◆ NBR ISO 14064-2, Gases de efeito estufa – Parte 2: Especificação e orientação a projetos para a quantificação, monitoramento e elaboração de relatórios das reduções de emissões os da melhoria das remoções de gases de efeito estufa.
- ◆ NBR ISO 14064-3, Gases de efeito estufa – Parte 3: Especificações e orientação a projetos para quantificação de declarações relativas a gases de efeito estufa.

Além destas os seguintes Relatórios Técnicos (TR/ISO) também estão disponíveis:

- ◆ TR ISO 14047: “*Illustrative Examples on How to Apply ISO 14042 – Life Cycle Assessment – Life Cycle Impact Assessment*”
- ◆ TR ISO 14048: “*Environmental Management – Life Cycle Assessment – Life Cycle Impact Assessment Data Documental Format*”
- ◆ TR ISO 14049: “*Environmental Management – Life Cycle Assessment – Examples of Application of ISO 14041 to goal and scope definition and inventory analysis*”.

ZACKRISSON *et al* (2010, p. 1520) enfatiza que as normas ISO definem um procedimento para a realização de uma ACV, mas não define exatamente como fazê-lo.

2.2. A Metodologia de ACV

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma abordagem ambiental que considera a quantificação dos consumos de recursos naturais e das emissões poluentes de um produto, não só nas fases de produção, mas também as fases anteriores de produção de insumos e matérias primas e as fases posteriores de uso deste produto até o seu descarte como resíduo (BLENGIN *et al.*, 2012. p.178). Segundo CHEHEBE (2002, p. 10) a ACV é um método técnico para avaliação dos aspectos ambientais e dos impactos potenciais associados a um produto, compreendendo etapas que vão desde a retirada dos recursos da natureza até a disposição do produto final. Esta é uma ferramenta abrangente para a quantificação e interpretação de impactos ambientais de um produto ou serviço a partir do berço até o túmulo, ou seja, desde a produção dos insumos até o descarte do produto como resíduos. No entanto, dependendo da natureza e objetivo pretendido de um estudo de ACV, os limites do sistema em estudo podem ser modificados resultando na avaliação de qualquer outro tipo de sistema, “do berço ao portão”, ou “do portão ao túmulo” (Tillman e Baumann, 1995 *apud* MARZULLO, 2007, p. 20). A **Tabela 2.1** exemplifica estes tipos de ACV.

Tabela 2.1: Tipos de estudos de ACV

FONTE: Adaptado de Tillman and Baumann, 1995 *apud* MARZULLO, 2007.

do Berço ao Túmulo (Cradle to Grave)	Extração e beneficiamento de recursos naturais	do Berço ao Portão da Fábrica (Cradle to Gate)
	Fabricação de produtos intermediários (Insumos, materiais, energia e equipamentos)	
	Fabricação do Produto Principal (Objeto do Estudo)	
	Distribuição do Produto no mercado	do Portão da Fábrica ao Túmulo (Gate to Grave)
	Utilização do Produto pelos usuários	
	Disposição final do Produto (Resíduos, sucatas, etc.)	

Conforme recomendado pela Norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2009. p. 08), a elaboração de uma ACV estabelece um protocolo padrão que compreende as quatro fases ilustradas na **Figura 2.1** e descritas a seguir.

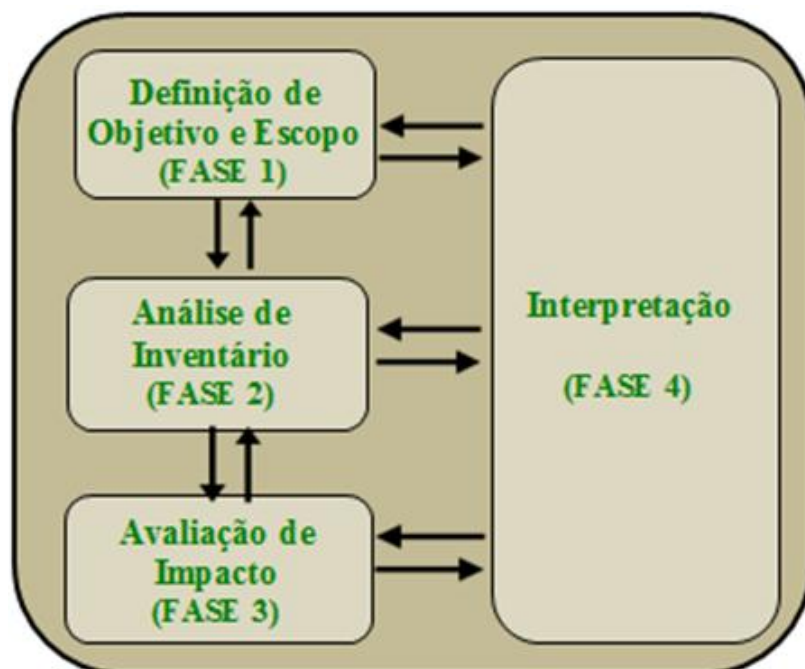


Figura 2.1 – Diagrama representativo das Fases de uma ACV
(Fonte: ABNT, 2009)

Fase 1 – Definição do Objetivo e do Escopo

A definição do Objetivo e do Escopo inclui a definição das razões para a realização do estudo, a aplicação pretendida e o público-alvo (ISO, 2006 *apud* FINNVEDEN *et al.*, 2009, p. 2). O *Objetivo do estudo* deve declarar a aplicação que se deseja do método, as razões para a sua condução e a quem deverá ser endereçado os seus resultados. (RIBEIRO, 2003, p. 16). Já o *Escopo do estudo* deve definir os limites do sistema que será avaliado para que o mesmo atenda completamente o *objetivo* do trabalho, bem como sua *Unidade Funcional* e os procedimentos de coleta de dados, definindo critérios para assegurar a qualidade desses dados (PRETTO, 2003, p. 69). O escopo deve ser suficientemente bem definido para assegurar que a profundidade e o nível de detalhamento do estudo sejam compatíveis com o *objetivo* (ABNT, 2009, p. 12). Segundo a norma na definição do *escopo* devem ser considerados aspectos metodológicos de ordem executiva, tais como o estabelecimento dos seguintes parâmetros:

Limites do Sistema: fronteira que encerra a base geográfica ou de processo que irá compor o estudo, seja, a interface entre um sistema de produto e o meio ambiente ou outros sistemas de produto. A **Figura 2.2** apresenta um sistema hipotético com suas fronteiras delimitadas.

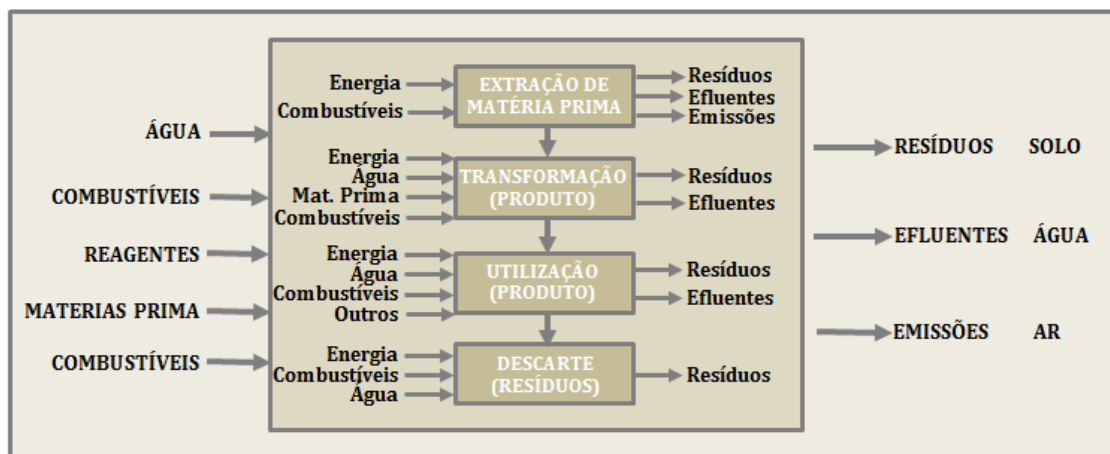


Figura 2.2 – Diagrama ilustrativa dos limites de um sistema considerando as fronteiras do processo.

Dependendo da natureza e objetivo pretendido de um estudo de ACV, os limites do sistema de estudo podem ser modificados resultando na avaliação de qualquer outro tipo de sistema (DITSELE, 2010, p. 5). Assim, em função do uso que se pretende dos resultados da ACV, os limites do sistema podem ser simplificados através da eliminação de algumas etapas do ciclo de vida ou algumas categorias de impacto (Curran, 1996 e Todd, 1996 *apud* DITSELE, 2010, p. 30). Ou seja, em vez de uma ACV total (avaliação “berço ao túmulo”), pode-se optar por eliminar alguns estágios do ciclo de vida a jusante e fazer uma avaliação do ciclo do “berço-a-porta”. Se o interesse for pela avaliação de um produto desde a extração das matérias-primas até o ponto onde o produto sai dos limites da unidade de produção. Outra versão simplificada é uma avaliação “porta-a-porta”, em que as liberações ambientais ou os impactos de interesse são apenas aqueles sentidos diretamente dentro dos limites da unidade de produção (DITSELE, 2010, p. 30). Neste caso os impactos dos processos a montante, tais como a produção das matérias-primas e insumos não são computados no estudo da ACV.

Unidade Funcional: é o desempenho quantificado de um sistema de produto para uso como unidade de referência num estudo de avaliação do ciclo de vida (ABNT, 2001, p. 03). FINNVEDEN (2009, p. 2) define que este parâmetro representa uma medida

quantitativa dos produtos ou serviços que estarão relacionados com a quantificação dos impactos avaliados. DITSELE (2010, p. 47) apresenta a seleção de Unidade Funcional em um estudo de ACV como um aspecto problemático, isto porque uma unidade funcional deve ser expressa em termos quantitativos e a Norma ISO 14041 não estabelece valores para ela. Assim sua definição fica inteiramente a cargo dos profissionais que elaboram o estudo de ACV. O referido autor cita a título de exemplo, seis estudos de ACV para a produção de eletricidade pela queima de carvão mineral, que foram elaborados utilizando cinco diferentes unidades funcionais, a saber, **1,0 kWh** (Froese *et al.*, 2010; Schreiber *et al.*, 2009 *apud* DITSELE, 2010); **1,0 MWh** (Sokka *et al.*, 2005 *apud* DITSELE, 2010) ; **1,0 TWh** (Maurice *et al.*, 2000 *apud* DITSELE, 2010); **1,0 MJe** (Kim e Dale, 2005 *apud* DITSELE, 2010) e **1000 kg de carvão queimado** (Babbitt e Lindner, 2005 *apud* DITSELE, 2010). Apesar de estes estudos estarem focando produtos similares, o uso de diferentes unidades funcionais tornam difícil uma comparação entre seus resultados (DITSELE, 2010, p. 47).

Requisitos de Qualidade dos dados: são características adotadas para os estudos que assegurem a qualidade e reprodutibilidade dos dados. Os requisitos de qualidade dos dados devem ser definidos para possibilitar que os objetivos e o escopo do estudo da ACV sejam alcançados (ABNT, 2001, p. 06). A norma sugere que se devam abordar entre outros os seguintes requisitos:

- período de tempo coberto: corresponde ao limite de tempo estipulado para a coleta dos dados que irão compor o inventário. Exemplo, dados coletados entre Janeiro/2000 e Dezembro/2000. Isto demonstra que os resultados atribuídos ao estudo, bem como, as recomendações advindas dele, se baseiam nas condições de produção, equipamentos instalados e tecnologias em uso naquele período de tempo.

- precisão, completeza e representatividade dos dados: fatos que demonstram o quanto as fontes dos dados são confiáveis e capazes de serem reproduzidos. Por exemplo: dados primários, dados estimados, dados calculados, etc.

- Impactos Ambientais: alterações na qualidade ambiental associadas às entradas e saídas do sistema de processo em estudo. Por exemplo: chuva ácida, eutrofização, toxicidade, aquecimento global, etc.

- Fonte de Dados: descrição da origem dos dados que serão utilizados no inventário. Por exemplo: literatura, relatórios de monitoramento e controle, etc.

Fase 2 – Análise do Inventário do Ciclo de Vida

Análise de inventário de ciclo de vida (AICV) é definida como uma fase da avaliação de ciclo de vida (ACV) envolvendo a compilação e a quantificação das entradas e saídas para um determinado sistema de produto durante sua produção, utilização e descarte (ISO 14040, 1998 *apud* SUH e HUPPES, 2005).

Nesta fase são identificadas e quantificadas todas as entradas e saídas do sistema de produtos, desde matéria prima, recursos materiais e energéticos (insumos), bem como todas as liberações ambientais para o ar, água e solo, ao longo do ciclo de vida de um produto (DITSELE, 2010, p.30). A escolha das fontes e da coleta dos dados para elaboração do inventário de ciclo de vida se constitui em importante etapa do projeto, uma vez que da qualidade destes dados depende todo o resultado do trabalho. Assim, os balanços de massa e energia que serão aplicados aos dados do inventário do ciclo de vida, estão baseados em dados de “Entrada e Saída”.

Os itens do inventário do ciclo de vida (ICV) são calculados como parte proporcional dos fluxos ambientais completos de cada processo com base na unidade funcional (Finnveden *et al.*, 2009 *apud* DITSELE, 2010, p.30).

A título de ilustração é apresentada na **Figura 2.3** um ICV com entradas e saídas, elaborado para a indústria metalúrgica do México, conforme apresentado em SUPPEN *et al.* (2006).

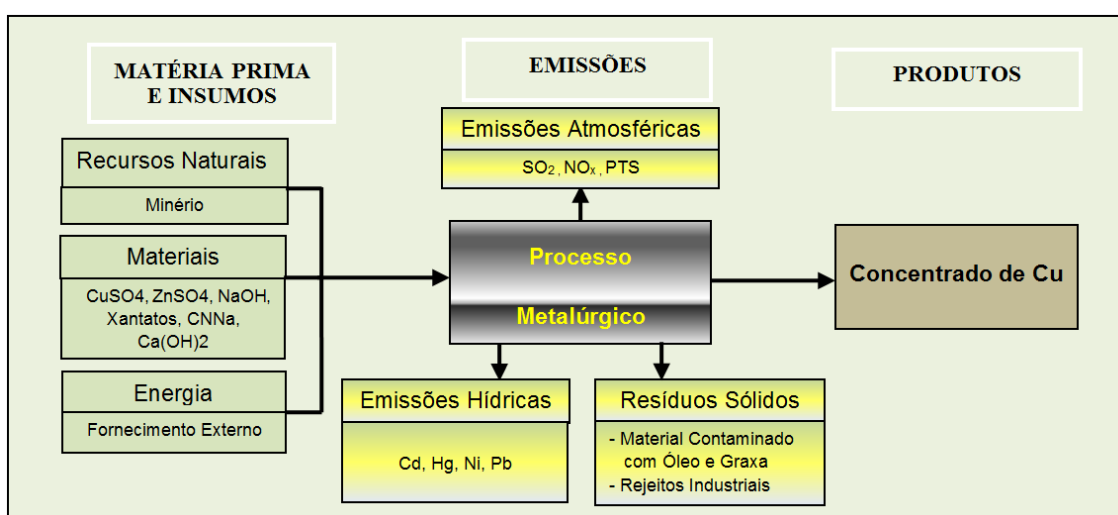


Figura 2.3 – Fluxo de entradas e saídas para a produção de cobre em minas do México.

(Fonte: Adaptado de SUPPEN *et al.*, 2006)

NOTA: O sentido das setas identifica “entradas” e “saídas” em relação ao Processo:
(Entradas → PROCESSO → Saídas).

Fase 3 – Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

A AICV visa compreender e avaliar a magnitude e importância dos impactos ambientais potenciais do sistema estudado (ISO, 2006a *apud* FINNVEDEN *et al.*, 2009, p.2). Nesta fase são obtidos de maneira qualitativa e quantitativa, os impactos ambientais potenciais decorrentes dos dados obtidos no Inventário do Ciclo de Vida (Fase 2). Para isso, estes dados precisarão ser tratados utilizando-se um dos métodos já consagrados para este fim no âmbito internacional, tais como: o ECOINDICATOR, o CML, o EPS 2000, o IMPACT 2002+ e as diferentes versões do IPCC 2001 GWP. Cada método possui especificidades com relação aos itens obrigatórios definidos na Norma ISO 14040, que são:

- ***Categorias de Impacto*** – conjunto de impactos ambientais que refletem um mecanismo comum de ameaça ambiental, tais como: saúde humana, danos aos ecossistemas, aquecimento global, escassez de recursos naturais, etc. Os impactos potenciais são avaliados agrupando-os nas categorias de impacto levando-se em conta os fluxos ambientais identificados na análise de inventário. Para isto é necessário uma classificação dos impactos que implica na atribuição das emissões do inventário em categorias de impacto em função da capacidade das substâncias para contribuir com diferentes problemas ambientais (Baumann e Tillman, 2004 *apud* DITSELE, 2010, p. 30 e 31). Por exemplo, o dióxido de enxofre (SO₂) pode ser associado à Categoria de Impacto “*contribuição de formação de chuva ácida*”. Já a liberação de dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄), pode ser associada à Categoria de Impacto denominada “*potencial de aquecimento global – PAG*” (ABNT, 2010, p. 01 e 10).

- ***Indicadores de Categorias*** – definem os parâmetros adotados para cada unidade comum que refletem uma Categoria de Impacto específica. Observando como estes poluentes interagem modificando o meio ambiente (cadeias de causa-efeito) escolhe-se um “*indicador*” para representar aquela categoria de impacto, a fim de dar um escore de impacto, expresso em uma unidade comum para todos os impactos dentro daquela categoria. Um “*parâmetro equivalente*”, tal como o “CO₂ eq”, pode representar o efeito sobre o aquecimento global, do SO_x, do CO ou do CH₄, além do próprio CO₂ (DITSELE, 2010, p.31). Por exemplo: apesar do CH₄ também contribuir para o aquecimento global, o parâmetro para esta *Categoria de Impacto* será o CO₂ equivalente (CO₂-eq), ou seja, as emissões do CH₄ estarão relacionadas à este indicador.

- **Modelos de Caracterização** - são as diferentes maneiras de se relacionar o Indicador de Categorias com as Categorias de Impacto. Após a classificação dos impactos nas diversas Categorias, modelos de caracterização são selecionados para modelar quantitativamente, o impacto de cada emissão.

Continuando na mesma linha do exemplo citado os Modelos de Caracterização estão ilustrados na **Tabela 2.2**.

Tabela 2.2 – Exemplo de Modelo de Caracterização de Impacto: Gases considerados de efeito estufa: Dióxido de Carbono, Metano e Óxido Nítrico.

Emissões	Categorias de Impacto	Indicadores de Categorias	Modelos de Caracterização
1 kg de CO ₂	Potencial de Aquecimento Global	CO ₂ eq.	1 kg de CO ₂
1 kg de CH ₄	Potencial de Aquecimento Global	CO ₂ eq.	21 kg de CO ₂ (*)
1 kg de N ₂ O	Potencial de Aquecimento Global	CO ₂ eq.	310 kg de CO ₂ (*)

(*) – Fonte: ABNT, 2010, p.19 – Tabela C.1 de PAG para uma perspectiva de 100 anos publicada no relatório de diretrizes para inventários nacionais de GEE de 1996, IPCC.

Modelos de Caracterização podem demonstrar o destino de poluentes no meio ambiente. Em outras palavras, os Modelos de caracterização podem demonstrar que componentes do meio ambiente serão afetados por aquela categoria de impacto. Segundo DITSELE (2010, p. 31), para intensidades diferentes: alguns modelos podem ser orientados para o problema (modelagem do ponto médio, ou *midpoint*) ou orientados para os danos (modelagem do ponto final, ou *endpoint*)

De acordo com BRINO *et al.*, (2012, p. 6), os métodos de ACV podem ser divididos de acordo com as categorias de impactos que são utilizadas para fazer a avaliação, podendo, portanto, ser do tipo *midpoint* e *endpoint*.

A **Figura 2.4** mostra um exemplo dos tipos de categoria para a emissão de gases CFC.

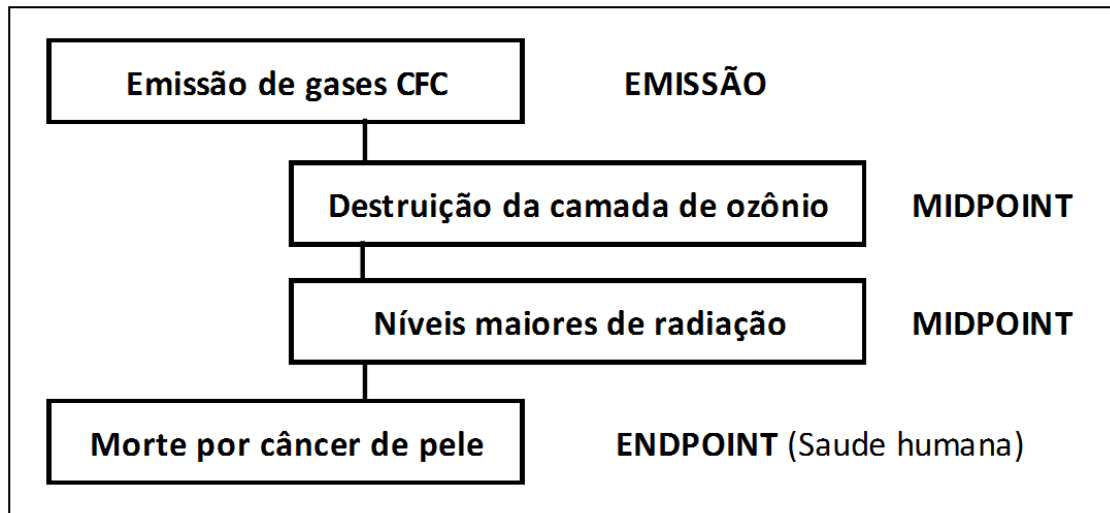


Figura 2.4 - Exemplo de categorias de impacto *midpoint* e *endpoint* para as emissões de gases CFC. (Fonte: Silva, 2010 apud BRINO *et al.*, 2012)

Para essas emissões a seguinte sequencia de impactos ambientais pode ser esperada:

1 – destruição da camada de ozônio;

Como é a camada de ozônio que bloqueia a radiação, este primeiro impacto pode provocar um segundo impacto ambiental;

2 – maiores níveis de radiação;

As pessoas recebendo esta radiação têm uma chance maior de sofrer um terceiro impacto ambiental:

3 – Câncer de pele podendo levar à morte (Categoria de Impacto: Danos à Saúde Humana).

Neste caso a morte por câncer de pele (Danos à Saúde Humana) aparece como categoria de impacto final, e é chamada de *endpoint*. As categorias intermediárias são chamadas de *midpoint*. (BRINO *et al.*, 2012, p. 6).

Fase 4 – Interpretação do Ciclo de Vida

Nesta fase ocorre a apresentação e a discussão do resultado da ACV com a graduação das categorias de impacto, mostrando as fases do processo produtivo onde se concentram os impactos ambientais de maior significância. Segundo CHEHEBE (2002, p. 87), o objetivo desta fase é analisar os resultados, tirar conclusões, explicar as limitações e fornecer recomendações para um estudo de inventário do ciclo de vida ou

uma análise completa do ciclo de vida. De todas as etapas da ACV a interpretação é a menos estudada até o momento (PIOTTO, 2003, p. 58).

Na Interpretação, os resultados das fases anteriores são avaliadas em relação ao objetivo e ao escopo, a fim de chegar a conclusões e recomendações (ISO, 2006a *apud* FINNVEDEN *et al.*, 2009, p.2)

É importante ressaltar que o método da ACV é interativo, objetivando o conceito de melhoria contínua do desempenho ambiental da empresa, portanto a fase de interpretação não é, necessariamente, a fase final, mas sim a fase que permite rever decisões passadas caso haja uma inconsistência no decorrer do trabalho. Se qualquer inconsistência for identificada, deve-se voltar às outras etapas e realizar as mudanças que forem necessárias para que o estudo tenha como um todo um resultado conciso. Em resumo nesta fase deve ser feita a identificação de emissões significativas e as etapas do processo – unidade de processo – que são ambientalmente importantes, permitindo assim um ranqueamento destas emissões que possa subsidiar conclusões e recomendações de melhorias para o processo e suas interações com o meio ambiente.

As conclusões e recomendações são então apresentadas no âmbito do objetivo e do escopo definidos previamente, e tendo em conta as limitações dos resultados.

2.3. Potencialidades e limitações da ACV

Segundo CHEHEBE (2002, p. 10) a Avaliação do Ciclo de Vida é uma técnica que permite avaliar os aspectos ambientais e impactos potenciais associados a um produto, analisando diversas etapas que vão desde a extração de matérias primas da natureza que entram no sistema produtivo, berço do produto, até a disposição final no meio ambiente, ou túmulo do produto. A norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2009, p. v), preconiza que a técnica de Análise de Ciclo de Vida quando bem aplicada, apresenta as seguintes potencialidades latentes:

- Identificação de oportunidades de melhoria do desempenho ambiental de produtos em diversos pontos de seus ciclos de vida,
- Fornecimento de informação aos tomadores de decisão na indústria e nas organizações governamentais visando o planejamento estratégico, à definição de prioridades e ao projeto ou re-projeto de produtos e processos,
- Seleção de indicadores de desempenho ambiental relevantes, incluindo técnicas de medição.

Caldeira-Pires *et al.* (2007) *apud* BARBOSA-JUNIOR *et al.* (2007, p. 3) destacam que no longo prazo, a avaliação do ciclo de vida pode prover mudanças tecnológicas fundamentais na produção e nos produtos, principalmente, devido ao efeito multiplicador ao longo da cadeia de produção, através do uso otimizado de energia e de materiais, bem como de adoção de linhas de reciclagem e de reuso nos processos.

Por outro lado a ISO 14040 (ABNT, 2001, p. 2) destaca que a ACV apresenta as seguintes limitações:

- A subjetividade na natureza das escolhas e suposições feitas na ACV, tais como no estabelecimento das fronteiras do sistema, na seleção das fontes de dados e categorias de impactos a serem analisadas;
- Os modelos usados para análise de inventário ou para avaliar impactos ambientais são limitados pelas suas suposições e hipóteses previamente admitidas e podem não estar disponíveis para todos os impactos potenciais ou aplicáveis;
- Os resultados de estudos de ACV enfocando questões globais ou regionais podem não ser apropriados para aplicações locais, isto é, as condições locais podem não ser adequadamente representadas pelas condições globais ou regionais;
- A exatidão dos estudos de ACV pode ser limitada pela acessibilidade ou disponibilidade de dados pertinentes, ou pela qualidade dos dados, por exemplo, falhas, tipos de dados, agregação, média, especificidades locais;
- A falta de dimensões espaciais e temporais dos dados do inventário usados para avaliar o impacto introduz incerteza nos resultados dos impactos. Esta incerteza varia de acordo com as características espaciais e temporais de cada categoria de impacto.

Já FERREIRA (2004, p. 11) adverte que a elaboração de um estudo de ACV necessita normalmente de muitos recursos e demanda um tempo razoavelmente longo. Além disso, as informações desenvolvidas por este estudo devem ser utilizadas como uma componente de um processo de decisão que conta com outras componentes, tais como: o custo e a performance do produto ou processo.

2.4. Exemplos de aplicação da ACV

Por se tratar de uma metodologia relativamente nova e pouco conhecida é de se esperar que sua aplicação ainda seja bastante restrita. Na verdade esta metodologia se caracteriza por ser uma forte tentativa de integração da qualidade tecnológica do produto, com a qualidade ambiental gerando um valor ecológico agregado para o consumidor, representando assim, uma mudança estratégica importante (BARBOSA-JUNIOR *et al.*, 2007, p. 4).

Embora o principal enfoque dos primeiros estudos de ACV tenha sido com relação a questão energética (CHEHEBE, 2002, p. 1), a partir do aprofundamento sobre o assunto obteve-se a uma diversificação do tema sendo a metodologia hoje adotada para vários aspectos ligados à questão ambiental, como emissões em geral, sólidas, líquidas e gasosas, a comparação entre produtos e processos e a definição de equipamentos a serem adotados e de insumos a serem usados para a produção de determinado produto.

2.4.1. Exemplos de aplicação de ACV no Brasil

Segundo LIMA (2007, p. 20), nos países em desenvolvimento em geral e no Brasil em particular a metodologia de ACV ainda é pouco conhecida, embora no meio acadêmico já se possa notar um grande movimento no sentido de explorar melhor esta ferramenta, através da capacitação de estudantes tanto do nível de graduação como de pós-graduação, gerando trabalhos, teses e dissertações de mestrado e doutorado. Com isso, órgãos do governo, entidades acadêmicas, empresa públicas e privadas têm demonstrado um interesse crescente de discutirem o assunto.

Pelos trabalhos já realizados pelas empresas nota-se que a aplicação da ACV no Brasil ainda necessita de um maior desenvolvimento, tanto na questão de esforço a ser feito quanto na experiência prática a ser adquirida, sendo necessária uma clareza e padronização da metodologia, bem como incentivos governamentais. No entanto, a adoção da ACV pode representar uma mudança estratégica importante, no auxílio tanto ao Sistema de Gestão Ambiental da empresa, como no ganho de produtividade reforçando assim os princípios de sustentabilidade. (BARBOSA-JUNIOR *et al.*, 2007, p. 1).

Nas empresas poucos trabalhos foram desenvolvidos usando a metodologia de ACV e as que o fizeram eram empresas pertencentes a grupos multinacionais, que já têm a prática em suas unidades em outros países (LIMA, 2007, p. 71).

Assim, podem-se encontrar exemplos de trabalhos publicados pelos setores de bio-combustíveis (MARZULLO, 2007; VIANA, 2008 e OMETTO *et al.*, 2009), da indústria química (SILVA, 2005; CAMARGO, 2007), de papel e celulose (NUNES, 2007 e PIOTTO, 2003) além da construção civil (FERREIRA, 2009) e da geração de energia hidroelétrica (RIBEIRO, 2003).

2.4.2. Exemplos de aplicação de ACV no Setor Mineral

A indústria de mineração é um dos setores onde se tem verificado que se faz relativamente menos uso de ferramentas baseadas em ACV e, conseqüentemente, há um consenso entre os estudiosos da ACV de que este é um setor que ainda precisa ser alcançado. (Awuah-Offei e Adekpedjou, 2011 *apud* BLENGINI *et al.*, 2012, p.178).

A técnica da ACV tem sido utilizada para avaliar os impactos ambientais associados com vários produtos. Infelizmente, o seu uso na avaliação de produtos e processos de Lavra e Beneficiamento de recursos minerais ainda é bastante limitado, como evidenciado pela parca literatura existente sobre as aplicações da ACV em mineração (DITSELE, 2010, p. 6). Esta situação é, particularmente, verdadeira para as operações com minério de ferro no Brasil.

Os sistemas de mineração são muitas vezes reduzidos a uma caixa-preta, dentro de outros sistemas produtivos de derivados do aço. Nos estudos de ACV, e nos mais recentes relatórios de ICV para a indústria de produtos de aço muito pouca ou nenhuma ênfase tem sido colocado sobre os impactos ambientais das operações de extração dos minérios e do manuseio dos resíduos destas atividades industriais (DURUCAN *et al.*, 2006, pp. 1057 e 1058). Em outras palavras, o sistema de mineração tem sido repetidamente reduzido a uma simples unidade operacional no fluxograma daquelas operações.

Nas sociedades modernas, é fácil ignorar o fato de que uma grande parte do total da economia continua a depender diretamente da extração e do aproveitamento dos recursos minerais (Field, 1997 *apud* DURUCAN *et al.*, 2006, p. 1057). Isto é particularmente verdade para a indústria de mineração, cuja reputação se funda em

exemplos de degradação ambiental do passado. Em seus esforços em busca da sustentabilidade, a indústria de mineração tem usado vários indicadores ambientais e econômicos para avaliar seu desempenho. Nos últimos anos, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), mostrou ser uma das abordagens mais atraentes para esta tarefa (DURUCAN *et al.*, 2006, p. 1057).

Como por definição, a ACV é um processo objetivo, que avalia os impactos ambientais associados a um produto, processo ou atividade, ela pode ser uma excelente ferramenta a ser usada para avaliar o desempenho ambiental e dar apoio à tomada de decisões no setor de mineração (Fava *et al.*, 1991 *apud* DURUCAN *et al.*, 2006, p.1057).

O minério de ferro está diretamente ligado a uma série de processos industriais que podem ser estudados através da ACV. Ele é um importante insumo para a siderurgia, que por sua vez, está associado a vários outros processos industriais, tais como, automóveis, eletrodomésticos, equipamentos móveis e de construção civil, além disso, o aço está presente em muitos aspectos da vida moderna, tanto em objetos simples, utilizados no cotidiano das pessoas, como em obras de engenharia, e em projetos de tecnologia avançada. Estes *links* existentes entre o inventário do ciclo de vida (ICV) para produtos de aço e as informações sobre a produção de minério são importantes para o entendimento da técnica de ACV em geral. Muitas vezes, os dados do inventário do ciclo de vida em processos de extração de minério formam lacunas para a integridade do ICV para a indústria siderúrgica, a produção de bens duráveis e outros processos industriais. (DURUCAN *et al.*, 2006, p.1057; NORGATE e HAQUE, 2010, p.266).

Desde a segunda metade da década de 1990, as indústrias do setor de mineração na Europa e nos Estados Unidos, têm investido em estudos de ACV com diferentes objetivos. A maior parte destes trabalhos, inicialmente focou no desenvolvimento de Inventários de Ciclo de Vida (ICV) das operações de mineração de forma a servir de base para os processos de produção de metais, ou seja, o seu uso como base para os estudos de ACV das indústrias de derivados do aço, ou ainda para ajudar na seleção de produtos de consumo (insumos e matérias primas) e apoio a novos projetos (DURUCAN *et al.*, 2006, p. 1058). Pode-se destacar as ACVs de Alumínio, Cobre e Ouro em vários países da Europa (TAN e KHOO, 2005; DURUCAN *et al.*, 2006; NORGATE *et al.*, 2007; LIU e MULLER, 2012; NORTHEY *et al.*, 2013), a mineração de Carvão com destaque em ACVs desenvolvidas nos Estados Unidos, México e África do Sul (MANGENA e BRENT, 2006; SUPPEN *et al.*, 2006) e estudos de ACVs para a produção de Ouro na Austrália (NORGATE *et al.*, 2007). Salienta-se também ACVs de

produção de Cobre em países como Austrália, Chile, Peru, Argentina, Laos, Papua Nova Guiné, África do Sul, Turquia, Finlândia, Estados Unidos e Canadá (NORTHEY *et al.*, 2013). Além destas, encontra-se também publicações sobre ACVs para a produção de ferro e aço na Austrália (YELLISHETTY *et al.*, 2011) e na China (CHEN *et al.*, 2011); além de NORGATE e HAQUE (2010) que apresenta um estudo sobre a produção de minério de ferro na Austrália. Porém nenhum em empresas de mineração no Brasil.

3. O Minério de Ferro

A mineração é uma das mais antigas atividades produtivas exercidas pela humanidade. De acordo com ENRIQUEZ (2008, p. 1), não é casual que a história da civilização adote as diferentes modalidades da atividade de mineração, como marcos divisórios de suas eras: idade da pedra lascada (paleolítico), idade da pedra polida (neolítico) e idade dos metais (cobre, bronze e ferro). Qualquer atividade industrial, seja no campo da metalurgia, da indústria química, da construção civil ou do cultivo da terra, utiliza os minérios ou seus derivados (Da LUZ *et al.*, 2004, p. 10). É cada vez maior a influência dos minérios sobre a vida e desenvolvimento de um país. É difícil imaginar o nível material alcançado por nossa civilização, sem o uso dos minérios (**Figura 3.1**). Consciente ou inconscientemente, o consumo de bens minerais está presente em quase todos os setores da vida moderna: de insumos para a agricultura até os sofisticados materiais para a indústria eletroeletrônica; de bens de consumo aos grandes equipamentos industriais; da produção de medicamentos e cosméticos até a indústria aeroespacial, entre tantos outros usos (ENRIQUEZ, 2008, p. 1). Para aquilatar a importância do minério de ferro na vida moderna basta olhar a nossa volta e meditar a respeito dos equipamentos que utilizamos em todas as nossas atividades normais do dia-dia.

O minério de ferro é a principal matéria-prima usada na fabricação do aço pelas usinas siderúrgicas. A produção de aço pode ser simplificada como a mistura de minério de ferro e carvões de vários tipos (coque pulverizado, etc.) em um alto forno (YELLISHETTY *et al.*, 2011, p. 80). O aço está presente em muitos aspectos da vida moderna, tanto em objetos simples, utilizados no cotidiano das pessoas, como em obras de engenharia, e em projetos de tecnologia avançada. Além disso, os objetos de aço quando perdem sua utilidade se transforma em sucata metálica. Toda sucata metálica pode ser reaproveitada pela siderurgia onde ela é refundida e convertida em aço líquido para a fabricação de novos objetos.

O minério de ferro é ainda um dos principais produtos da balança comercial brasileira, respondendo em 2012 por 16,6% do total de cargas pelas instalações portuárias brasileiras, além de ser o principal produto em termos de tonelagem com 62% da carga exportada (ANTAQ, 2013, p. 7 e 17). Estes números reforçam a ideia encontrada em ENRIQUEZ (2008, p. 363) salientando que sua importância vai além dos aspectos

econômicos ganhando corpo nos aspectos sociais junto às comunidades que atinge, como fator de melhoria da qualidade de vida, seja na geração de empregos, renda e impostos.



Figura 3.1 Diagrama exemplificando o ciclo do minério da lavra ao consumo final. Fonte: Acervo SAMARCO.

3.1. O Minério de Ferro no Brasil

Assim, como a mineração está intimamente ligada à história e a formação do Brasil, a mineração de ferro tem importante contribuição histórica para o desenvolvimento das populações dos estados que possuem este bem mineral em seu subsolo, como Minas Gerais e Mato Grosso.

3.1.1. Histórico

Com o declínio da produção açucareira a Coroa Portuguesa procurou desenvolver novas atividades econômico-produtivas no Brasil. Assim, por volta de 1650, o bandeirantismo paulista começou a receber incentivos oficiais para exploração sistemática de minerais preciosos. Entre 1700 e 1725, segundo MEDEIROS (2006), processou-se a ocupação do território mineiro, primeiramente pelas aglomerações populacionais que vieram a se constituir as Minas Gerais, compostas dos núcleos de São João Del Rei, Vila Rica,

Sabará, Vila do Príncipe, Arraial do Tejuco dentre outros núcleos menores. Uma segunda etapa ocupou parte do território do que seria, mais tarde, a capitania de Mato Grosso, na qual se descobriu jazidas de ouro, em 1718, em Caxipó-Mirim, contudo, em quantidade menor que nas Gerais. No entanto, em Mato Grosso, surgiram Cuiabá e Vila Bela, bem como, os fortes de Coimbra, de Príncipe da Beira, de Miranda e de Albuquerque. A terceira e derradeira etapa deu origem à mineração do ouro em territórios de Goiás, com a fundação de Vila Boa, em 1725.

O ouro por estas paragens era tanto que o naturalista francês Auguste de Saint-Hilaire, que percorreu a região do alto Rio Doce entre 1816 e 1822 assim o descreveu: “quando se arrancava uma touceira de capim, e se sacudiam as raízes, caía ouro em pó de mistura com a areia” (SAINT-HILAIRE, 1975 *apud* TEIXEIRA *et al.*, 2002, p. 36).

A lavra do ouro de aluvião era feita com técnicas bastante rudimentares, e o equipamento exigido para tal atividade era mínimo, com pouco investimento financeiro por parte do minerador, requerendo tão somente a mão de obra escrava. Isto propiciava que qualquer indivíduo não escravo, procedente da Colônia ou de Portugal, poderia se dedicar à extração do ouro, pois a princípio, qualquer um, rico ou pobre, branco ou até mesmo mestiço poderia se transformar num minerador. (MEDEIROS, 2006).

No período colonial, a partir de 1690, já havia centenas de lavras de ouro aluviar na região central do estado de Minas Gerais. De 1700 a 1780, o estado de Minas produziu cerca de 2/3 do ouro e boa parte das gemas e diamantes extraídos no Brasil. Essa produção mineral fomentou a abertura de estradas, a implantação de núcleos urbanos, a unificação do território, a criação de uma estrutura administrativa própria e a construção da Estrada Real. Cidades como Ouro Preto, Congonhas, Sabará, São João d’El Rei, Tiradentes, Diamantina, Serro e várias outras prosperaram em torno das minas (ALVES, 2008, p. 28).

Graças ao ouro e ao diamante que brotavam da terra, a população das cidades mineiras explodiu no século XVIII. O que se viu então é a migração de populações de diversos pontos da Colônia para as zonas mineradoras, motivadas pelo fascínio da possibilidade de enriquecimento rápido e estimuladas, inclusive, pelas facilidades oferecidas quanto à extração do ouro, dado às condições geológicas do território – em grande parte, ouro de aluvião - ocorrência que no geral, independente da situação financeira, poderia transformar estes aventureiros em ricos mineradores (MEDEIROS, 2006).

No auge de sua prosperidade, Vila Rica chegou a ser a maior cidade do Brasil, com 100.000 habitantes (GOMES, 2007, p. 119). No final do século XVIII, Minas Gerais se

tornou o maior núcleo populacional do país, atingindo a autossuficiência na produção de alimentos e iniciando a exportação de excedentes para mercados do Rio de Janeiro, Bahia e Pernambuco (CASTRO *et al.*, 2011, p. 34). GOMES (2007, p.112) confirma que no início do Século XIX, Minas Gerais era a província mais populosa, com pouco mais de 600.000 habitantes.

No período de 1820 a 1830, foram formadas seis empresas inglesas de mineração para explorar o ouro em Minas. Entre elas a St. John D’el Rey Mining Company, posteriormente transformada em Mineração Morro Velho, que atuou até o fim do século XX. (ALVES, 2008, p. 28).

O desenvolvimento da mineração do ouro possibilitou a descoberta dos depósitos de minério de ferro que propiciaram o surgimento da indústria de transformação desse bem mineral no Estado de Minas Gerais (ALVES, 2008, p. 29). O esgotamento do ouro aluvial obriga os mineiros a ir buscá-lo nas minas cavadas, primeiro a céu aberto e posteriormente, as subterrâneas. Pode ser verificado em diversas obras publicadas tais como, CASTRO *et al.* (2011), ALVES (2008), MEDEIROS (2006), TEIXEIRA (2002) e LAMOSO (2001) que partir de finais do século XVIII, a mineração de ferro torna-se uma atividade presente no centro mineiro. Apesar de menos rentável do que o ouro, ela veio responder a uma demanda por instrumentos, ferramentas e outros objetos, necessários inclusive para manter a exploração do ouro, e cuja importação era dispendiosa devido à distância dos portos e aos vários impostos a serem pagos. Nesse momento, o ouro se tornava cada vez mais escasso e a mineração cada vez mais laboriosa, necessitando ainda mais de tais instrumentos.

No início do século XIX, a mineração de ouro entrou numa grande decadência, dando lugar a várias outras atividades econômicas, principalmente as ligadas à agricultura e à pecuária; essas atividades já eram fortes no auge das mineradoras, mas nesta ocasião, elas se dispersaram por todo o território das Minas Gerais, modificando assim radicalmente a sua ocupação. A esta altura a paisagem local já estava tão alterada que viajantes na época a descreviam assim: “Eram regiões de terras devastadas pelo garimpo e pela atividade mineradora”; “Tanto quanto a vista alcança, esta terra toda revirada por mãos humanas, de tanto que o sonhado lucro excitou o desejo de trabalhar”, relatos feitos em livro publicado em 1824, pelo botânico francês Auguste de Saint-Hilaire ao percorrer o interior de Minas Gerais (GOMES, 2007, p. 120). “Por todos os lados, tínhamos sob os olhos os vestígios aflitivos das lavagens, vastas extensões de terra revolvida e montes de cascalhos” (Warren Dean, 1996 *apud* GOMES, 2007, p. 120).

Já na época do Brasil-Colônia sabia-se da grande ocorrência de ferro no solo brasileiro, mas Portugal havia proibido sua extração para não tirar o foco da lucrativa produção de ouro. Com a chegada da família real e a corte portuguesa em 1808, uma nova visão passou a orientar a economia com a abertura dos portos e incentivo à industrialização no Brasil. Assim, foi criada a primeira fábrica de ferro no Brasil, a Usina Ipanema localizada em Sorocaba. Para esta tentativa, em 1810, foram chamados trabalhadores e especialistas suecos. Menos de uma década depois, a fábrica estava desativada, enquanto a produção de ferro havia-se deslocado para Minas Gerais (HOLTEN *et al.*, 2011, p. 113 e 114).

O início da história da fabricação do ferro em Minas se dá nas últimas décadas do século XVIII quando, devido a descoberta de grande quantidade minério de ferro de alta qualidade, logo surgiram inúmeras forjas. Embora o controle português sobre o interior fosse precário, a ideia da siderurgia no Brasil sempre foi rechaçada, tanto que em 1785 as forjas (fornalhas) para a produção de ferro foram proibidas (CASTRO *et al.*, 2011). Duas décadas depois, com a chegada da corte de D. João VI ao Brasil esta política mudou, culminando com o incentivo à extração e manufatura do ferro, dando início à construção de diversas fábricas. A primeira delas começou a ser construída em 1809, na comarca do Serro (SAIN, 1842). Esta fabrica de ferro funcionou até 1831 (ARCELOR MITTAL, 2013). A fábrica mais bem sucedida de todas as empresas do Império foi estabelecida em 1827 pelo engenheiro francês Jean de Monlevade, no distrito de São Miguel do Piracicaba, município de Santa Barbara (CASTRO *et al.*, 2011, p. 39). Por volta de 1864, um relatório do governador da província registrava a existência de 120 fábricas de ferro em Minas (TEIXEIRA *et al.*, 2002, p. 80).

Nos primeiros anos do Século XX, foi formada a Itabira Iron Ore Corporation, empresa inglesa que adquiriu os direitos das minas de ferro de Itabira e participação na Estrada de Ferro Vitória-Minas (CASTRO *et al.*, 2011, p. 40). Na década de 1920, o presidente Arthur Bernardes lançou incentivo para a indústria siderúrgica nacional e a Companhia Siderúrgica Mineira transformou-se na Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira. Em 1940, os direitos das minas de Itabira foram transferidos para o governo brasileiro e, dois anos depois, foi constituída a Companhia Vale do Rio Doce. A década de 1960 foi marcada pela abertura do setor mineral brasileiro ao capital estrangeiro. Nesse contexto,

surgiram as empresas MBR, Samitri, Ferteco, Alcoa, CBMM e Usiminas, entre outras. (ALVES, 2008, p. 29).

No final da década de 1970, o perfil da mineração no Estado se modificou, com a associação da SAMITRI com a MARCONA (empresa peruana controlada pela americana Utah-International), para formação da primeira empresa dedicada ao aproveitamento de itabiritos pobres, a SAMARCO Mineração S.A. Estes minérios com teor de ferro considerado marginal na época (abaixo de 60%) até então não economicamente viáveis para a lavra, eram segregados em pilhas de estéril. A SAMARCO nasceu com o conceito de lavra e concentração conjugadas e como seu produto apresentava um alto valor agregado e baixa produção ele seria dedicado exclusivamente a produção de *pellets* visando unicamente o mercado externo (SAMARCO, 1996, p. 2-1 e 2-2). Atualmente, todas as grandes mineradoras do Quadrilátero Ferrífero Mineiro, detêm a técnica de concentração do minério de ferro e o aproveitamento das jazidas se dá quase que completamente, lavrando e beneficiando minério com teores em torno de 43 % de Fe.

A partir dos anos de 1970, com a descoberta de grande jazidas de ferro no Norte do Brasil, o mapa da produção de minério de ferro no país mudou radicalmente. Grandes investimentos foram feitos nesta região e complexos minerários como os de Carajás no Estado do Pará, se tornaram importantes polos de produção e exportação deste bem.

3.1.2. Cenário Atual

As reservas mundiais de minério de ferro, em dados de 2011, mostraram-se da ordem de 170 bilhões de toneladas. As reservas brasileiras totalizam 29,6 bilhões de toneladas e estão localizadas, em sua quase totalidade, nos estados de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Pará (**Tabela 3.2**). A produção mundial de minério de ferro em 2011 foi de cerca de 2,8 bilhões de toneladas. A produção brasileira representou 14,2% da produção mundial. Minas Gerais (69,1%) e Pará (27,7%) foram os principais estados produtores (DNPM, 2012, p. 71). Dados sobre a situação mundial dos maiores produtores de minério de ferro são apresentados na **Tabela 3.1**.

Tabela 3.1 Oferta Mundial de Minério de Ferro em 2011.

Discriminação	Reservas ⁽²⁾		Produção ⁽²⁾	
	Países	10 ⁶ t	%	10 ³ t
BRASIL⁽¹⁾	29.604	17,4	398.131	14,2
CHINA	23.000	13,5	1.200.000	42,9
AUSTRÁLIA	35.000	20,6	480.000	17,1
ÍNDIA	7.000	4,1	240.000	8,6
RÚSSIA	25.000	14,7	100.000	3,6
UCRÂNIA	6.000	3,5	80.000	2,9
Outros Países	44.396	26,1	301.869	10,8
TOTAL	170.000	100,0	2.800.000	100,0

Fonte: DNPM/DIPLAM; USGS – Mineral Commodity Summaries – 2012 – (DNPM, 2012, p.71)

(1) Reservas Lavráveis (2) Dados estimados, exceto Brasil

A **Tabela 3.2** mostra a distribuição atual das reservas de Minério de Ferro no Brasil.

Tabela 3.2 Distribuição das reservas de minério de ferro no Brasil.

Estados	Reserva	Teor do Minério
	%	% Fe
Minas Gerais	79,7	51,4
Mato Grosso do Sul	9,9	55
Pará	9,1	67
Outros Estados^(*)	1,3	-
Total	100	Teor Médio: 52,95 % Fe

Fonte: DNPM, 2012 - Sumário Mineral, 2012, p. 71.

(*) Bahia, Ceará, Amazonas, Paraná, Pernambuco, São Paulo e Alagoas.

3.1.3. Cenário Futuro

De acordo com o Plano Nacional de Mineração 2030 (MME, 2011, p. 82) a produção de minério de ferro no Brasil apresentará o crescimento mostrado na **Figura 3.2**.

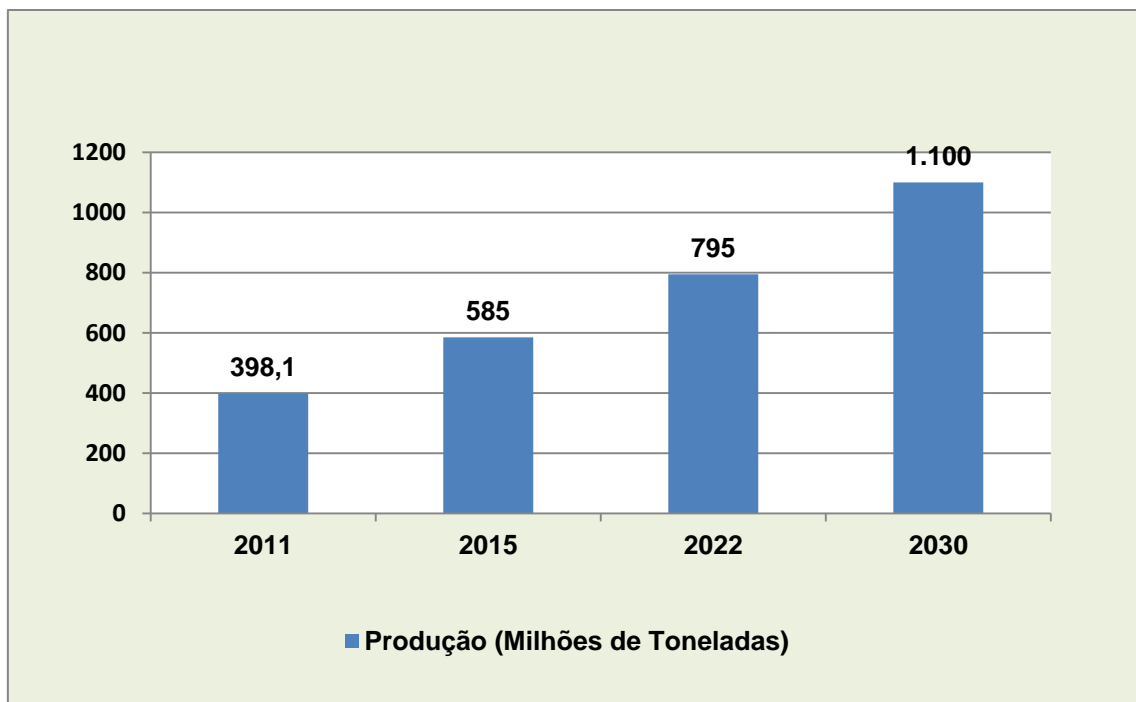


Figura 3.2 Cenário Futuro da Produção de Minério de Ferro no Brasil.

Fonte: MME, 2011, p.82. – Exceto Ano 2011: DNPM, 2012, p. 71.

3.2. Impactos Ambientais da Produção de Minério de Ferro

Para YELLISHETTY *et al.*, (2011, p. 83) a atividade minerária faz um uso muito intensivo da terra e por esta causa o impacto gerado na natureza é altíssimo e irreversível. Isso se dá por conta do processo de exploração e retirada do minério, que inclui remoção da vegetação natural e da camada superficial do solo, provocando alterações espaciais, químicas e ecológicas no solo e nos cursos d'água (CASTRO *et al.*, 2011, p. 22). Além disso, nos locais das minas se formam enormes cavas que modificam para sempre paisagem da região.

Como uma das mais antigas atividades produtivas exercidas pela humanidade, durante séculos a mineração movimentou e continua movimentando a economia de muitos países. No entanto, ela também provocou e ainda provoca graves distúrbios ecológicos e sociais nas regiões onde atua. Os efeitos dos empreendimentos minerários, normalmente, são de amplo alcance, abarcando desde a comunidade local até os grandes mercados financeiros internacionais (ENRIQUEZ, 2008, p. 91).

Devido à sua natureza, a extração e o beneficiamento de minérios tem grande potencial para causar uma série de encargos ambientais se estas atividades não forem executadas dentro de um planejamento e práticas gerenciais adequados. Assim as atividades de

mineração e de processamento mineral podem causar interferências diretas nos três importantes compartimentos ambientais do meio físico, como ilustrado na **Figura 3.3**.

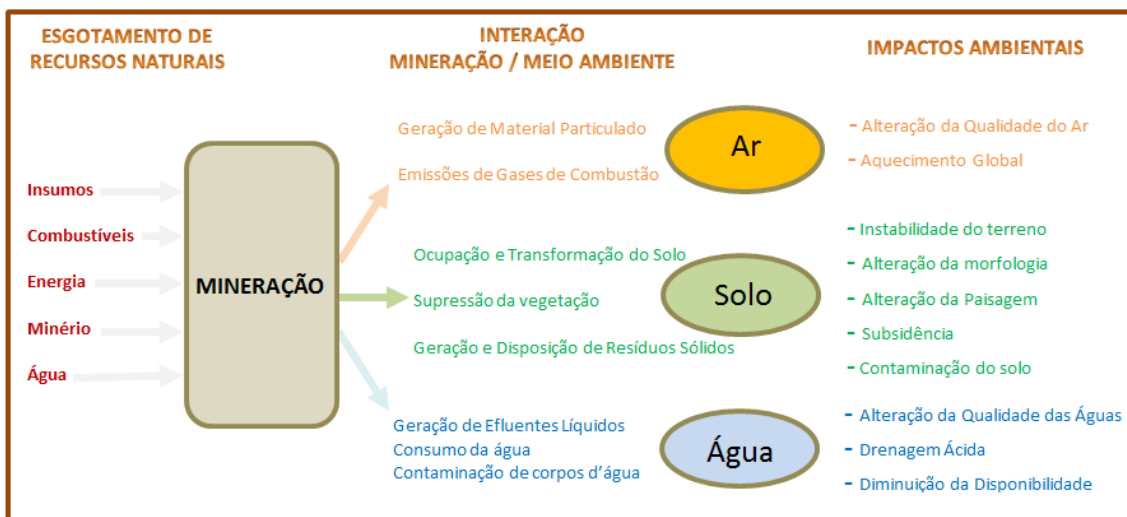


Figura 3.3 Atividade de Mineração e seus Impactos Ambientais.

Fonte: (Adaptado de van Huytreen, 1998 *apud* BORMA e SOARES, 2002).

Estes impactos podem ser apresentados em quatro grupos gerais:

- Impactos devido ao uso e ocupação de solo,
- Impactos sobre a qualidade dos recursos hídricos,
- Impactos sobre a qualidade dos recursos atmosféricos; e
- Impactos sobre o esgotamento dos recursos naturais extraídos.

A **Figura 3.4** a seguir mostra o estado geral de uma área de mineração em atividade, onde se salienta a extensa área ocupada pelas atividades envolvidas e o estado em que o solo se apresenta durante estas atividades. O fato de se extrair toda a cobertura vegetal para se processar a lavra expõe esta grande área ao vento e à chuva podendo causar o carreamento, pelas águas de chuvas, do material solto em direção aos corpos d'água da região. Os recursos atmosféricos poderão ser prejudicados tanto pela ação eólica sobre o solo solto, quanto pela produção de fumaça pelas máquinas e equipamento devido a queima de combustíveis. Finalmente, a própria extração do minério impacta as reservas deste bem mineral contribuindo para o seu esgotamento.



Figura 3.4 Aspecto de uma Praça de Lavra de Minério de Ferro em atividade.
Fonte: Acervo SAMARCO.

A legislação ambiental é abrangente na defesa da manutenção da qualidade destes recursos naturais e a sociedade como um todo vem se mostrando cada vez mais atenta aos conceitos de sustentabilidade no sentido de garantir saúde e bem-estar humanos e dos ecossistemas em geral para as gerações presente e futura.

3.2.1. Impactos devido ao uso e ocupação do solo.

A atividade de mineração é específica de local (rigidez locacional) e a extração mineral faz um uso muito intensivo da terra, assim pode causar danos consideráveis para o solo local e para a biodiversidade da região, afetando significativamente os recursos naturais (YELLISHETTY *et al.*, 2011, p.83). Estas modificações variam com o tipo de operação de mineração ou método de lavra.

Mineração a Céu Aberto: este tipo de mineração é praticado onde as jazidas de minério formam um bloco localizado e coberto com uma camada de terra relativamente fina, denominada estéril. Este tipo de Mineração é essencialmente uma operação de movimentação de terras, que normalmente inclui o desmonte da camada superficial do solo com o uso de explosivo e a utilização de tratores e outros equipamentos para o transporte e disposição do minério lavrado e do estéril. A **Figura 3.5** mostra o aspecto geral de uma cava após o encerramento da atividade de mineração.



Figura 3.5 Cava exaurida antes do início dos trabalhos de reabilitação ambiental.

Fonte: Acervo SAMARCO.

Embora a legislação determine que as empresas sejam obrigadas a reabilitar as áreas alteradas por suas atividades, a topografia da região será irremediavelmente afetada. Ou seja, esta nova conformação poderá propiciar a erosão do solo, bem como reduzir o seu potencial de produtividade agrícola e florestal. A **Figura 3.6** mostra um exemplo de recuperação de uma área de mineração, mostrando o aspecto geral da topografia em bancadas, bastante diferente das ondulações encontradas em terrenos naturais.



Figura 3.6 Área de mineração em reabilitação ambiental.

Fonte: Acervo SAMARCO.

Mineração subterrânea: quando o minério é formado em jazidas profundas sua extração é feita geralmente utilizando os métodos de mineração subterrânea. O principal

impacto da mineração subterrânea para a topografia da região é a subsidência (MANGENA e BRENT, 2006, p.1072). Isto pode resultar da intervenção da atividade de mineração abalando as estruturas espeleológicas da região ou mesmo sobre as cavidades ou galerias subterrâneas formadas após a remoção do corpo mineral, que frequentemente induz o colapso dos estratos de rocha sobrejacente (desmoronamento das galerias). As **Figuras 3.7 e 3.8** mostram exemplos de subsidência com o abaixamento da topografia causando a inutilização da área devido aos riscos de desmoronamentos no local.



Figura 3.7 Subsidência: uma seção de uma estrada próximo à Castleton, UK, destruída por subsidência geológica. Este episódio levou ao fechamento desta estrada. Fonte: <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:SubsidedRoad.jpg> – (Acesso em:08/02/2012)



Figura 3.8 Subsidência: causada pelo rebaixamento do lençol freático em uma mina de ouro na Nova Zelândia. Fonte: <http://www.google/Image> – (Acesso em:12/12/2013).

Estes desmoronamentos de galerias dependem da situação de mina e da sua configuração geológica e, portanto, têm diferentes impactos sobre o solo superficial. Os impactos incluem, mas não estão limitados a um abaixamento da topografia, aparecimento de poços profundos, e aparecimento de rachaduras e fissuras, bem como de ravinamentos e formação de encostas íngremes. A ocorrência destes impactos pode tornar a área inutilizável devido aos riscos de segurança associados com ela (Bell *et al.*, 2001 *apud* MANGENA e BRENT, 2006, p.1072).

A **Figura 3.9** mostra um desenho esquemático das atividades e equipamentos usados em uma mina subterrânea em atividade.

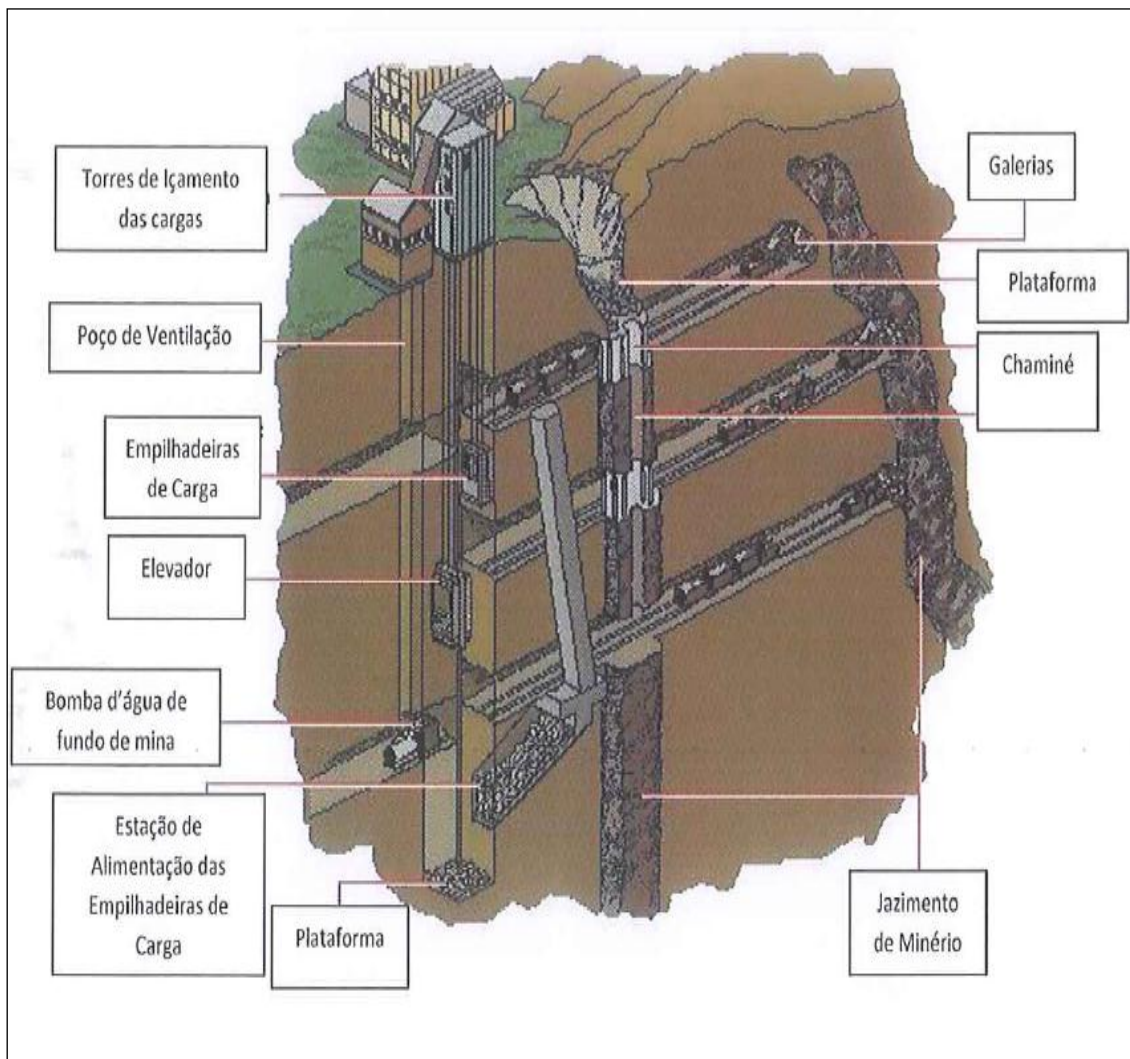


Figura 3.9 Esquema de funcionamento de uma mina subterrânea.

Fonte: <http://www.telefonica.net/web2/msolana/palazuelo/html/mineria.htm> - Imagem extraída do Livro: "Una historia en mágenes" de Alfonso García Rodríguez. - Sociedad Anónima Hullero Vasco-Leonesa, 1993. (Adaptado). (Acesso em:08/02/2012)

As **Figuras 3.10 e 3.11** mostram o interior de uma galeria de mina subterrânea construída seguindo os moldes de estabilidade e segurança necessários para o bom andamento das atividades em seu interior.



Figura 3.10 Detalhe de uma galeria de mina subterrânea.

Fonte: <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/mina-carvao-vira-mina-hidrogenio>

[Imagem: Rodríguez/Díaz] (Acesso em:08/02/2012)



Figura 3.11 Desmorte mecânica de rochas em uma galeria de mina subterrânea.

Fonte: www.valor.com.br/empresas - (Acesso em:12/12/2013).

Barragens de Rejeitos e Pilhas de Estéril

As pilhas de estéril formadas durante a operação de mineração, bem como as barragens de disposição dos rejeitos oriundos dos processos de beneficiamento do minério, também afetam os solos nas áreas próximas as operações de mina. MANGENA e BRENT (2006, p. 1072) exemplificam este impacto salientando que a camada superficial de terra e o material descartado da planta de processamento podem conter sais solúveis, que se dissolvem durante a estação chuvosa, assim causando a acidificação e contaminação dos solos da região.

A **Figura 3.12**, mostra a grande área necessária para a implantação de uma barragem de rejeitos (ocupação do solo). Normalmente estas estruturas são formadas em vales profundos para garantir uma grande capacidade de armazenamento de sólidos.



Figura 3.12 Depósito de rejeitos dos processos de beneficiamento de minério.

Fonte: www.google.com/imagem/barragemmineração (Acesso em:12/12/2013)

A **Figura 3.13**, mostra o impacto causado pela formação das pilhas onde são depositados todos os materiais estéreis retirados das áreas de lavra e ilustra o processo de recuperação destas áreas, mostrando que a nova conformação do terreno modifica permanentemente a topografia local, fazendo-a completamente diferente dos aspectos

que tinha antes da atividade de mineração, mesmo depois de recuperada ambientalmente.

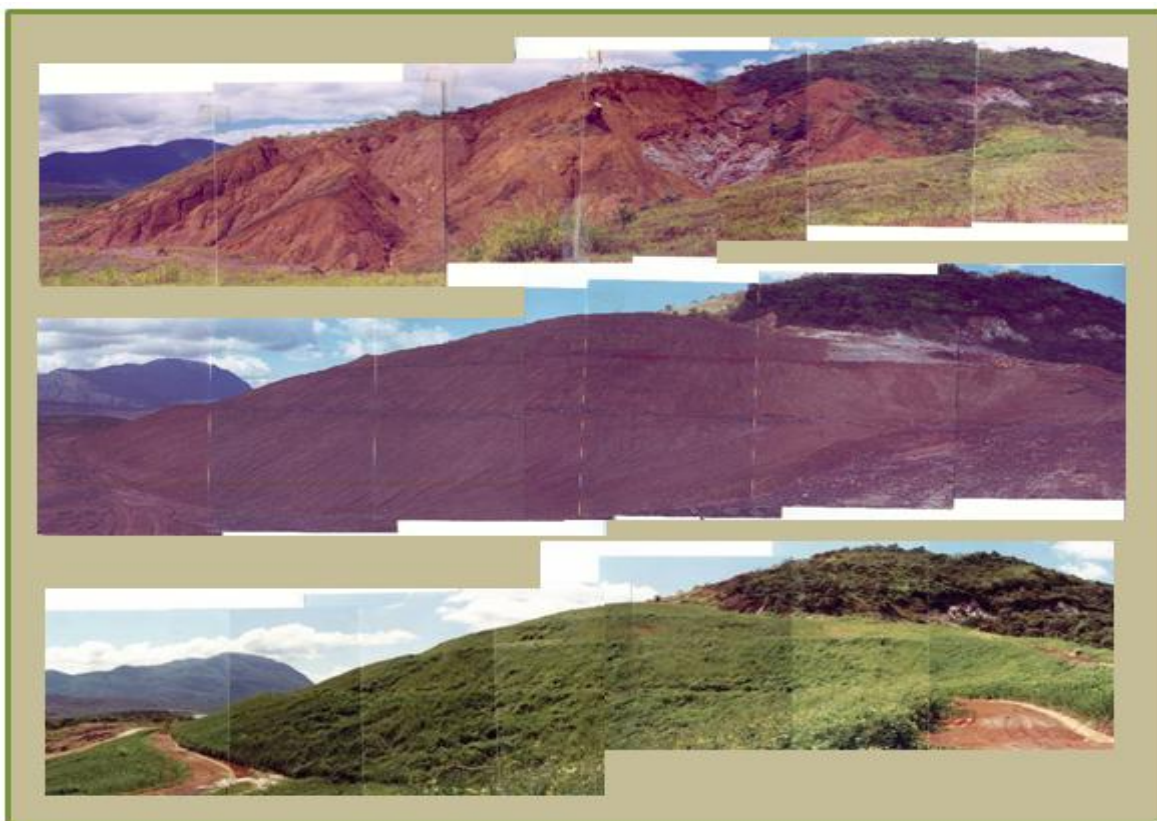


Figura 3.13 Depósito de estéril de minas de minério de ferro em pilhas, antes e depois do início de processo de reabilitação. Fonte: Acervo SAMARCO.

3.2.2. Impactos sobre os recursos hídricos

Como vimos, a atividade de mineração é altamente modificadora da topografia da área onde atua. Sendo assim, os solos superficiais tanto das áreas de lavras quanto dos locais de disposição de estéril e depósitos de minérios ficam desta forma bastante propensos à erosão e esta, por sua vez, pode aumentar o carreamento de sedimentos para as águas superficiais (rios, córregos e lagos). O carreamento de sedimentos pode ser agravado por fluxos sem controle de águas pluviais (enxurradas) nas áreas alteradas pela mineração. Dependendo dos seus usos a montante da atividade, a carga de sedimentos pode ter efeitos negativos na qualidade da água, devido a um aumento na concentração de sólidos totais em suspensão, o que pode representar um perigo para a vida aquática, humana e animal.

SUPPEN *et al.* (2006, p. 1112) fazem uma análise sobre o planejamento da disposição dos rejeitos em barragens e indicam que se não gerenciados adequadamente, representam sérios problemas ambientais para as operações de mineração.

Drenagem Ácida de Mina: Os impactos sobre os recursos hídricos podem ser agravados para o caso particular de alguns minerais sulfetados que sofrem oxidação quando expostos à presença de oxigênio e água (MANGENA e BRENT, 2006, p.1072). A presença de sulfetos nestes minérios pode produzir o fenômeno conhecido como drenagem ácida de mina. Para AKCIL *et al.*(2006, p.1139) a drenagem ácida está entre os problemas ambientais mais graves provenientes da indústria de mineração pois podem causar prejuízo a longo prazo para cursos de água e a biodiversidade, mesmo após o encerramento da atividade. A drenagem ácida é causada pela oxidação do enxofre provocando um aumento na acidez da água e sua ocorrência é mais comum nas minerações que envolvem a exploração comercial de minerais como cobre, níquel, urânio, carvão e ouro. BORMA e SOARES (2002, p.244) definem drenagem ácida de mina como a solução gerada quando minerais sulfetados presentes em resíduos de mineração (rejeito e estéril) são oxidados em presença de água. Esta solução age como agente lixiviante dos minerais presentes no resíduo produzindo um percolado rico em metais dissolvidos e ácido sulfúrico. Caso o percolado alcance corpos hídricos próximos pode contaminar suas águas tornando-as impróprias para uso por muito tempo mesmo depois de cessadas as atividades de mineração na região. A atividade de mineração pode provocar a abertura dos caminhos de fluxo de água de chuva, para a drenagem ácida e a consequente contaminação das reservas hídricas (águas superficiais e subterrâneas) dependendo da permeabilidade da rocha.

A formação da drenagem ácida de mina está ligada à ocorrência de alta concentração de sulfetos metálicos em seus resíduos, tanto no estéril de mina, como no rejeito do beneficiamento. De acordo com UBALDO *et al.*(2006, p. 07) a geração das drenagens ácidas resulta na contaminação das águas superficiais e subterrâneas, inviabilizando o uso dessas para fins recreativos, agrícolas e de consumo. No fechamento de áreas mineradas que apresentam problemas de produção de acidez, dois aspectos devem ser levados em conta: primeiro, o fato de que seus impactos não se restringem à área minerada, podendo atingir corpos hídricos superficiais e subterrâneos distantes do empreendimento e, segundo, que as reações químicas envolvidas no processo ocorrem por muitos anos, mesmo depois de esgotado o depósito mineral.

Lixiviação de metais: outro impacto da mineração sobre a hidrologia da região é a lixiviação de metais, que pode ocorrer com precipitação (chuva) através do minério, do estéril descartado (pilhas de estéril) ou barragens de rejeitos. A lixiviação de metais depende das características químicas da água (contaminantes) atuando através de material sólido e das características dos metais presentes (se estão na forma solúvel ou não solúvel) na matriz sólida da rocha que sofre a lixiviação. Em áreas com problemas com chuva ácida e onde ocorre a oxidação de minerais de sulfetos, o problema da lixiviação pode ser agravado.

A **Figura 3.14**, mostra uma barragem de rejeito no ponto onde a água verte para o meio ambiente (vertedouro). Se neste ponto a qualidade da água não estiver restabelecida dentro dos padrões adequados os corpos d'água (rios, córregos ou lagos) que estiverem à jusante poderão sofrer o impacto desta descarga.



Figura 3.14 Barragem de tratamento/recuperação de água de processo.

Fonte: Acervo SAMARCO.

Consumo de água no processo: o consumo de água constitui por si só um importante impacto das atividades de mineração e dos processos de beneficiamento de minérios. Esta importância tende a aumentar com o aumento de escassez de água em todo o mundo. A água está presente em praticamente todas as etapas da atividade minerária. As plantas de beneficiamento de minérios são em sua maioria em meio aquoso, o que obriga a maioria das empresas a manter um bom acompanhamento de seu balanço hídrico, inclusive com a adoção da recuperação e recirculação da água no processo. O consumo de água (água nova), portanto, varia de acordo com a quantidade de água que retorna para a planta vinda das barragens de lamas (rejeitos), ou seja, quantidade de água recuperada ou recirculada no processo. Um consumo adicional de água pode

ocorrer devido à evaporação nas atividades de umectação das vias de acesso e na irrigação de aterros, bem como, no espelho d'água das barragens de rejeitos (lamas).

As **Figuras 3.15 a 3.18** apresentadas a seguir, exemplificam consumos comuns de água no dia-a-dia da atividade de mineração.



Figura 3.15 Água consumida durante a atividade de umectação das praças de lavras. Fonte: Acervo SAMARCO.



Figura 3.16 Água consumida durante a atividade de umectação das vias. Fonte: Acervo SAMARCO.



Figura 3.17 Via em área de mineração umectada por aspersão de água.

Fonte: www.valor.com.br/empresas (Acesso em: 12/12/2013).



Figura 3.18 Água consumida pela evaporação nas superfícies dos lagos.

Fonte: <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycleportuguese>. (Acesso em: 08/02/2012).
(Crédito: Kidzone Fun Facts).

3.2.3. Impactos sobre os recursos atmosféricos

Outro impacto ambiental bastante presente nas atividades de mineração é a alteração na qualidade do ar (poluição atmosférica), com efeitos que podem ser locais, regionais ou

globais. Os principais poluentes atmosféricos associados à mineração de um modo geral são os materiais particulados (poeiras), óxidos de enxofre (SO_x), óxidos de azoto (NO_x), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), compostos orgânicos voláteis (COV), outros gases orgânicos como o metano e alguns metais pesados como o chumbo. (Allganier, 1997 *apud* MANGENA e BRENT, 2006, p.1073).

De todos os poluentes do ar acima referidos, os materiais particulados são, sem dúvidas a maior preocupação para a indústria de mineração (MANGENA e BRENT, 2006, p.1073). Os impactos típicos decorrentes deles são as doenças respiratórias crônicas, redução da visibilidade na região, irritação dos olhos e garganta, etc. Os particulados são emitidos em grandes quantidades durante todos as etapas das operações de mineração, particularmente nas atividades de movimentação de terras nas minas à céu aberto e estradas de acesso aos locais das lavras. Uma quantidade significativa de poeira também pode ser emitida durante o desmonte, transporte e armazenamento de minérios e estéreis, por correias transportadoras ou por caminhões (**Figura 3.19**). Nas pilhas de homogeneização de minérios ou de disposição de estéril, a emissão de particulados se dá devido à erosão eólica. Aplicação de sprays de água e de agentes depressores de poeira, tais como os compostos surfactantes, reduz as emissões de poeira de vias de transporte e pilhas de estocagem. No caso da mineração subterrânea é usado especialmente o sprays de água no controle das emissões de poeira ambiente.



Figura 3.19 Geração de poeira e emissões atmosféricas pelas atividades de lavra.

Fonte: www.valor.com.br/empresas (Acesso em: 12/12/2013).

SO_x, NO_x, CO e compostos orgânicos voláteis são emitidos durante a etapa queima do minério em forno de pelotização, que podem ser aquecidos por combustíveis fósseis (carvão mineral, gás natural e óleos derivados de petróleo). Estas emissões, no entanto, são bem controladas através de eficientes filtros e equipamentos de controle das emissões das chaminés do forno, tais como os precipitadores eletrostáticos. Assim sendo, a principal fonte destas emissões em atividades de mineração são as descargas de veículos de transporte e máquinas que são usadas para extração de minério. (**Figura 3.20**). Os impactos destes poluentes no meio ambiente incluem precipitação ácida, particularmente de SO_x e NO_x, as doenças respiratórias e a produção de “smog”. (Buchanan e Brenkley, 1994 *apud* MANGENA e BRENT, 2006, p.1073).

Aquecimento global pode ser atribuído a certos poluentes que são emitidos pela atividade de mineração. Metano (NH₄) e dióxido de carbono (CO₂) são conhecidos por contribuir significativamente para o aquecimento global ou o efeito de estufa. (ABNT, 2010, p. 1).



Figura 3.20 Emissões de gases de efeito estufa pelos equipamentos móveis durante as atividades de mineração. Fonte: Acervo SAMARCO.

3.2.4. Impactos de esgotamento dos recursos naturais

Espera-se que os teores do minério irão sempre diminuir uma vez que os minérios de alto teor serão sempre minerados preferencialmente (Mudd, 2010 *apud* NORTHEY *et*

al., 2013, p.119). A redução do teor do minério tem grandes implicações sobre os potenciais impactos ambientais da produção de ferro. Com o declínio do teor do minério a quantidade de minério extraído e processado por tonelada de metal produzido aumenta e, assim, também aumenta a energia específica necessária para a produção do metal (Norgate e Rankin, 2000 *apud* NORTHEY *et al.*, 2013, p.119), ou seja, a energia necessária para produzir uma tonelada de ferro.

A extração de minério implica no esgotamento de reservas minerais não renováveis. O esgotamento das jazidas de mais fácil exploração poderá provocar a busca de mais minério em uma área maior e mais profunda de extração e, com isto, o desaparecimento de mais florestas e de mais terras cultiváveis e, portanto, mais danos aos ecossistemas e a biodiversidade (YELLISHETTY *et al.*, 2011, p. 83). O Departamento Nacional de Produção Mineral, DNPM, estima que a reserva mundial de minério de ferro seja de 170 bilhões de toneladas (DNPM, 2012, p. 71), e as reservas brasileiras sejam da ordem de 29,6 bilhões de toneladas, estas estimativas foram feitas com base na produção global do minério em 2011. A produção anual brasileira é de 398 milhões de toneladas e espera-se para as próximas décadas um aumento de cerca de 300% até 2030, conforme dados do Ministério das Minas e Energia no Plano Nacional de Mineração 2030, publicado em 2011 (MME, 2011, p. 82).

A importância do minério de ferro para a humanidade é inquestionável, sendo a base de todos os grandes desenvolvimentos nas indústrias, na infraestrutura e nos transportes. Minérios em geral e aço em particular, historicamente têm sido associados com o desenvolvimento industrial e a melhoria das condições de vida e portanto, desempenha um papel importante nas sociedades modernas (YELLISHETTY *et al.*, 2011, p.87). No Brasil os recursos minerais e, em particular o minério de ferro, são de grande importância na economia, pois se constitui no fator mais importante das exportações do país e como constituinte do PIB brasileiro (ANTAQ, 2013, p. 7 e 17). Sendo assim, embora seja um recurso não renovável, por razões macro-econômicas, dificilmente o ritmo da extração de minério de ferro irá deixar de crescer no futuro, na tentativa de preservá-lo. Além disso, não existem perspectivas de um substituto a altura para o minério de ferro que venha suprir as necessidades da humanidade em um futuro previsível. Além do que, os principais problemas ambientais dos processos envolvidos com a indústria de mineração estão razoavelmente, controlados pelo atual nível de conhecimento científico.

3.2.5. Outros Impactos

Além dos impactos descritos, os seguintes aspectos ambientais são comuns aos locais de mineração, com potencial para gerar aqueles e outros impactos:

- supressão da vegetação nas áreas onde se implanta as minas, com a conseqüente exposição do solo às intempéries e supressão de habitats;
- consumos de energia elétrica na iluminação, nas correias transportadoras e nos equipamentos industriais;
- consumo de combustíveis nos equipamentos de mineração e geradores elétricos;
- consumo de insumos nos processos de beneficiamento do minério (Amido, Amina, Soda, etc.).

No entanto, se gerenciada de maneira responsável, a atividade minerária pode reduzir seus impactos nos sistemas naturais e na sociedade ao mínimo possível, acompanhando-os ao longo da existência da mineração e após cessar as suas atividades. O setor mineral tem importante contribuição socioeconômica para o país e o mundo. Ele responde por boa parte do crescimento do nosso Produto Interno Bruto (PIB), possibilita investimentos em infraestrutura, em desenvolvimento de tecnologia e no aprimoramento da qualificação profissional. Os recursos advindos da mineração, na forma de *royalties* e impostos, se adequadamente aplicados, favorecem o desenvolvimento das comunidades em seu entorno (CASTRO *et al.*, 2011, p. 22). Isto é particularmente verdade no contexto das economias em desenvolvimento onde atividades de mineração são bem-vindas por ser responsável pelo aumento de impostos relacionados as exportações que são fontes de receitas para os governos locais dando oportunidade de criação de emprego elevando o nível de vida, além de contribuir para o desenvolvimento regional (Davis e Tilton, 2008; ICNN, 2006 e Tanzer, 1980 *apud* YELLISHETTY *at al.*, 2011, p. 84).

3.3. Minério de Ferro na Samarco

As operações da SAMARCO compreendem atividades de Lavra, Beneficiamento e Pelotização do minério de ferro. O minério é extraído das minas de Alegrias, na Unidade de Germano, em Mariana-MG e o produto final, dedicado exclusivamente à exportação, é escoado por terminal marítimo próprio na Unidade de Ponta Ubú,

município de Anchieta-ES. O transporte do Concentrado de Germano para Ubú é feito através de duas linhas de Mineroduto com 400 km de extensão.

A **Figura 3.21**, apresenta um flagrante da vida em uma mineração, onde caminhões e carregadeira atuam na atividade de desmonte mecânico e transporte de estéril.



Figura 3.21 Operação de lavra do minério de ferro nas minas de Alegria.

Fonte: SAMARCO, 2011, p. 15.

A **Figura 3.22**, abaixo, mostra a magnitude das instalações usadas nas usinas de beneficiamento de minério de ferro na Samarco.



Figura 3.22 Vista Geral da Usina de Concentração 2, de Germano.

Fonte: SAMARCO, 2010, p. 22.

3.3.1. Processo de Produção

Minério é geralmente definido como sendo toda rocha constituída de um mineral ou agregado de minerais contendo um ou mais minerais valiosos, possíveis de serem aproveitados economicamente (Da LUZ *et al.*, 2004, p.3). Estes mesmos autores definem que *Mineral* é todo corpo inorgânico de composição química e de propriedades físicas definidas, encontrados na crosta terrestre. E eles ainda ressaltam que o mineral ou conjunto de minerais não aproveitados de um minério é denominado *ganga* ou *estéril*. A extração do minério da SAMARCO é feita na Unidade de Germano, em Mariana-MG, através de tratores e pás carregadeira, eventualmente, pode-se executar o desmonte por detonação (explosivos). Depois de extraído, o minério é conduzido até às Usinas de Concentração por meio das correias transportadoras de Longa Distância (TCLD). O transporte de estéril até os locais de empilhamento destes resíduos é feito exclusivamente por caminhões fora de estrada. As Usinas de Beneficiamento são compostas de: estação de britagem e peneiramento, moinhos de bolas, baterias de ciclonagem, células de flotação, espessadores e tanques de estocagem de polpa. Nas usinas de beneficiamento o minério itabirítico, que possui baixo teor de ferro (cerca de 43%), é concentrado, ou seja, tem suas impurezas retiradas através de processos de flotação e o seu teor de ferro elevado para o nível de hematita (Fe_2O_3) para ser comercializado no mercado internacional. A polpa de minério de ferro concentrado resultante deste processo é composta de, aproximadamente, 70% de sólido e 30% de água, composição esta que oferece a densidade de polpa ideal para o bombeamento por mineroduto. A Samarco possui dois minerodutos em atividade que ligam a Unidade de Germano até a Unidade de Ponta Ubu, em Anchieta, no Espírito Santo, onde a polpa é filtrada e o sólido é transformado em pelotas de minério de Ferro (*pellets*), produto usado em siderurgias para a fabricação do aço. Toda a produção de pellets da Samarco é destinada à exportação e o embarque é feito em porto próprio. A produção atual da Samarco é de 23 milhões de toneladas ano de pellets o que representou em 2012 um faturamento da ordem de US\$ 6,6 bilhões (SAMARCO, 2013, p. 17). A cadeia de clientes da Samarco está essencialmente no exterior – 97 % da sua produção é destinada à exportação. Em 2012 foram 34 clientes em 25 países e os principais destinos do produto da Samarco estão mostrados na **Figura 3.23** (SAMARCO, 2013, p. 11).

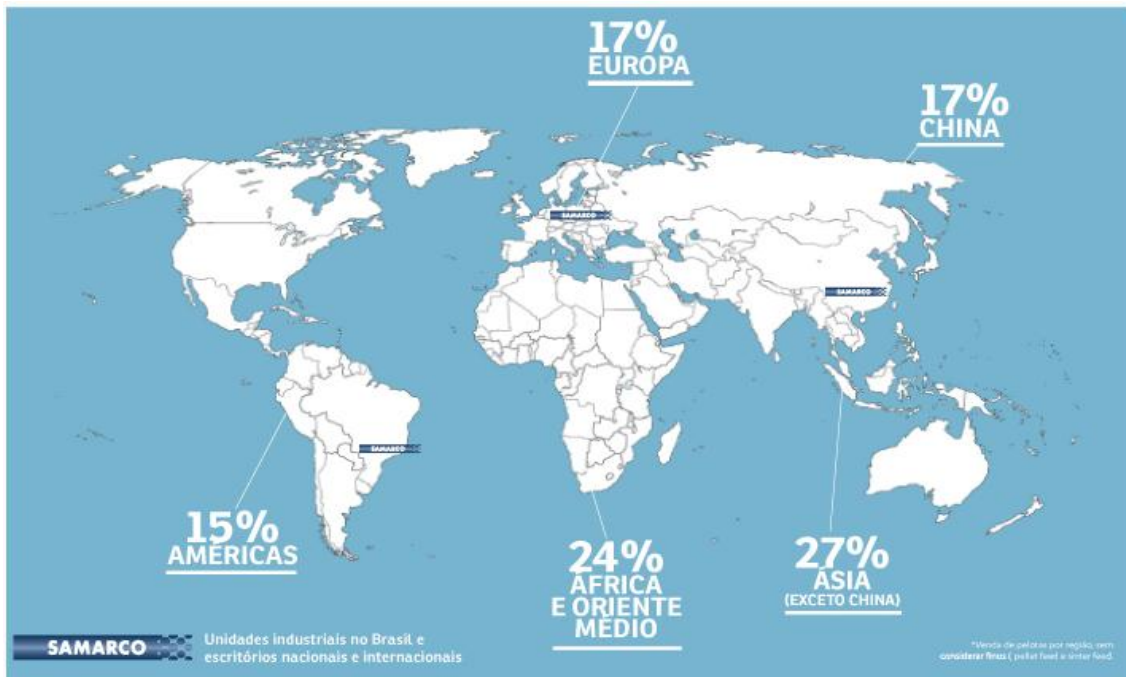


Figura 3.23 Principais clientes da Samarco.

Fonte: SAMARCO, 2013, p. 12.

Esta figura mostra que, a exemplo do que acontece com o mercado mundial de minério de ferro, o mercado comprador asiático representa no total, mais de 40% das vendas da Samarco.

A **Tabela 3.3** apresenta as características físico-químicas médias, segundo dados de produção de Germano nos meses de Janeiro a Maio de 2011.

Tabela 3.3. Características médias do Concentrado de Minério produzido.

Análise Química:	
67,0%	de Fe (95,81% de Fe ₂ O ₃)
1,2%	de SiO ₂
0,35%	de Al ₂ O ₃
0,040%	de P (0,09% de P ₂ O ₅)
2,50 %	de PPC
Análise Granulométrica:	
0,10%	maior que 65# (retido)
0,32%	maior que 100# (retido)
1,05%	maior que 150# (retido)
2,45%	maior que 200# (retido)
7,43%	maior que 270# (retido)
10,17%	maior que 325# (retido)
89,83%	menor que 325# (passante)
Índice Blaine:	
SE	= 1.700 cm ² /g

Fonte: Samarco - Gerência de Beneficiamento – Boletins Diários de Produção.

Nota: PPC = Perda por Calcinação ou perda ao fogo (humidade presente no minério).

SE = Superfície Específica do Minério (também denominada Índice Blaine).

= MESH (unidade de abertura das peneiras “Série Tyler”, usadas em Análises Granulométricas de Laboratório).

A **Figura 3.24** ilustra o fluxo do processo produtivo da Samarco, destacando-se as atividades das Unidades de Germano, Minerodutos e Ponta Ubu.

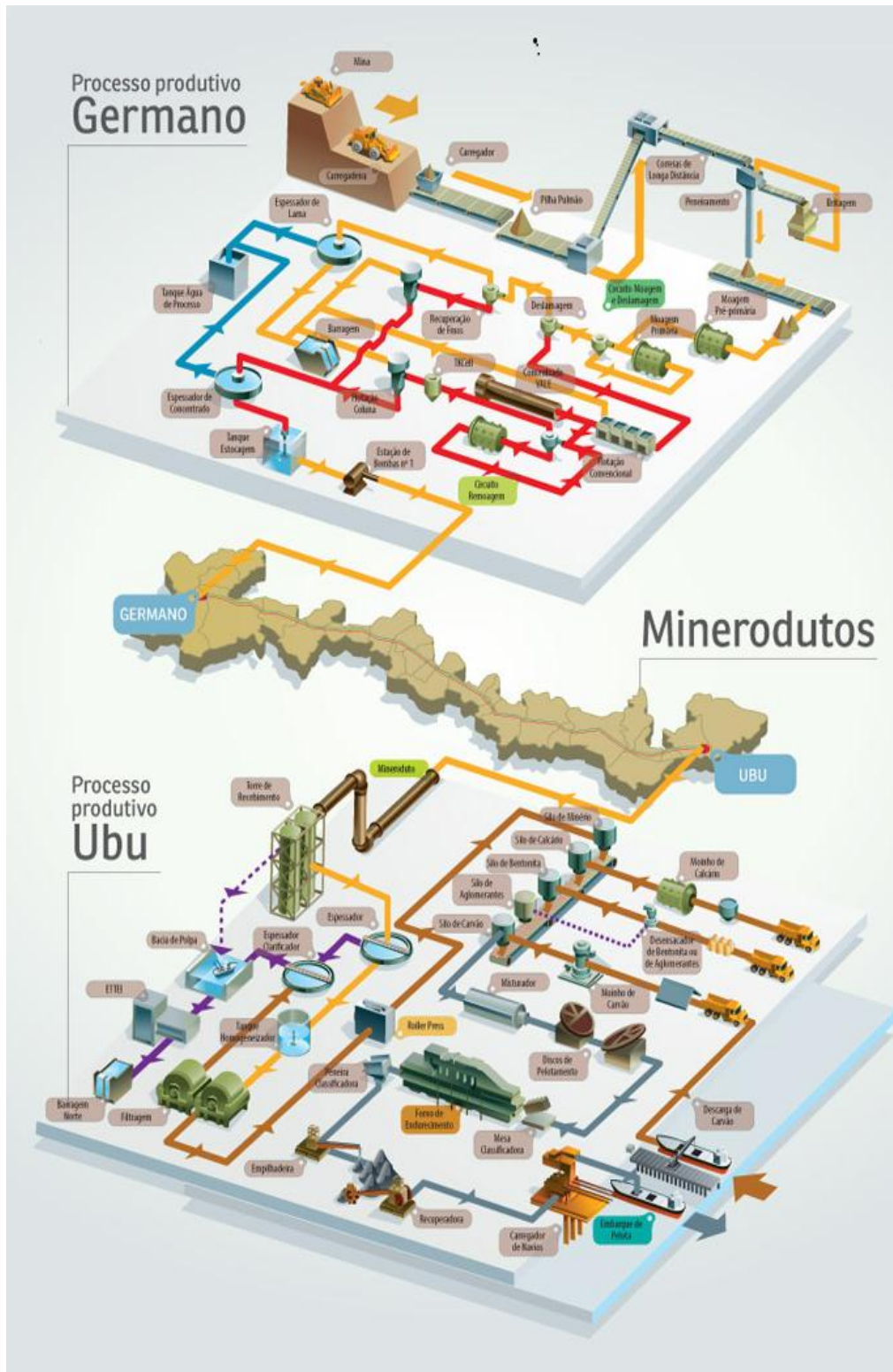


Figura 3.24 Fluxograma esquemático do processo produtivo da Samarco.
 Fonte: SAMARCO, 2010, p. 41.

4. Materiais e Métodos

Neste capítulo serão apresentadas as metodologias usadas na elaboração do Inventário do Ciclo de Vida (ICV), bem como as ferramentas utilizadas para avaliação dos impactos, e a forma pela qual os resultados desta avaliação serão apresentados.

4.1. Fase 1 – Definição do Objetivo e do Escopo

4.1.1 *Objetivo do Estudo*

O objetivo deste estudo foi estimar os impactos do ciclo de vida “do berço ao portão”, associados às operações em mineração de ferro de lavra, a céu aberto e seu beneficiamento para a produção de concentrado utilizando os padrões e princípios gerais da série de normas NBR ISO 14040, adaptando-os sempre que necessário.

Especificamente, o estudo teve como objetivos:

- a. Coletar dados sobre consumo de insumos (amido, amina, soda cáustica, cal, combustíveis e energia elétrica), consumo de recursos naturais (água, minério, etc.) e uso do solo;
- b. Conduzir uma avaliação das emissões para o ambiente (ar, água e solo), necessários para a produção de concentrado de minério de ferro pelas operações em estudo;
- c. Avaliar o ciclo de vida da produção de concentrado de minério de ferro para as seguintes categorias de impactos: impactos sobre a saúde humana, sobre os ecossistemas, sobre a disponibilidade de recursos naturais; bem como, sobre as mudanças climáticas.

4.1.2. *Escopo do Estudo*

Este estudo foi desenvolvido para o caso específico do minério das Minas de Alegria, pertencentes à Samarco Mineração S.A., nos Municípios de Mariana e Ouro Preto (MG) e o seu processo de beneficiamento para a produção de Concentrado de minério de ferro, conhecido como “*pellet feed*”, representado de forma sucinta no fluxograma da **Figura 4.1.**

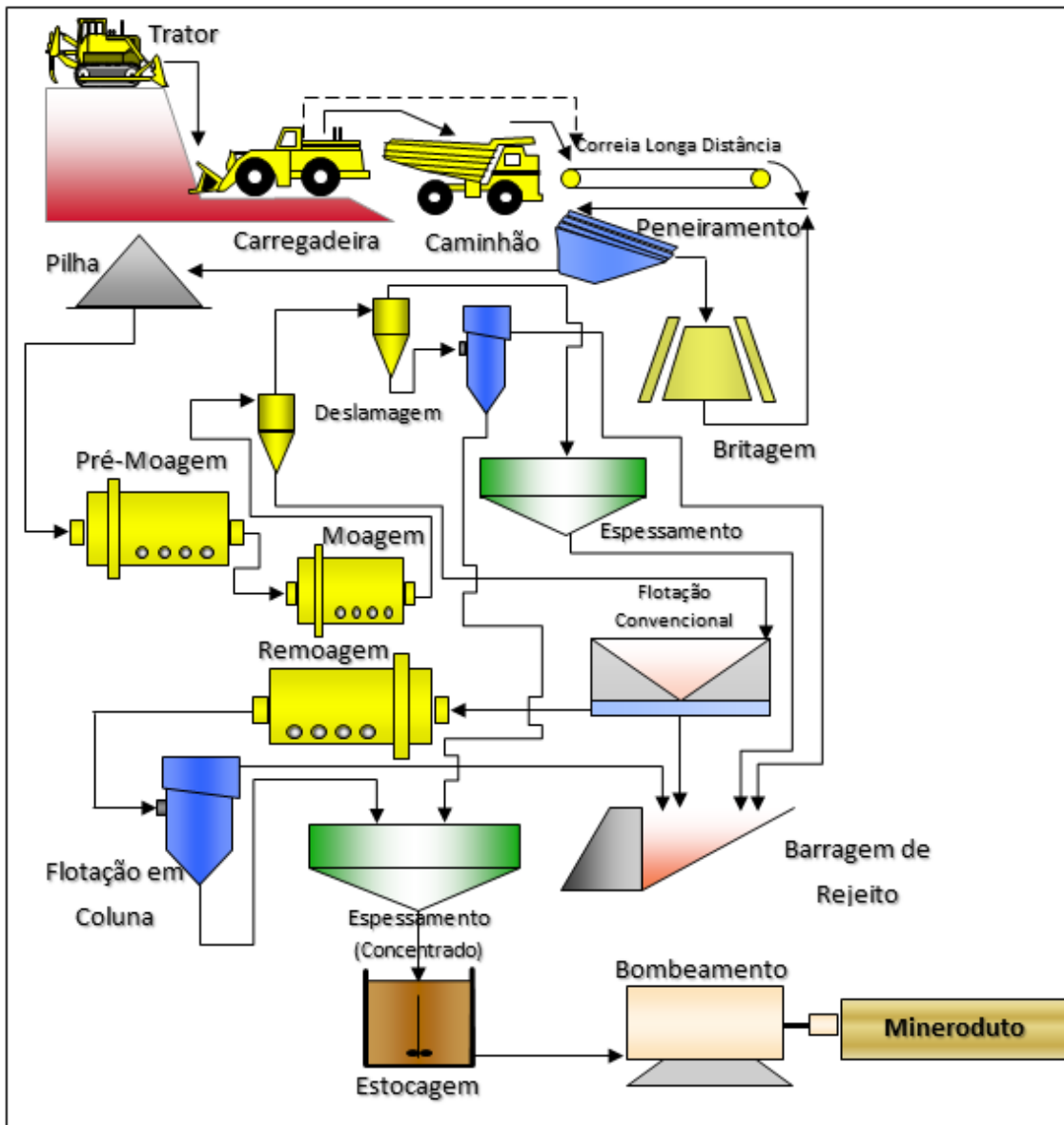


Figura 4.1 Fluxograma do Processo Industrial da Unidade de Germano-Samarco.

Fonte: Acervo Samarco.

Limites do Sistema

Conforme já destacado no item de definição do Objetivo deste estudo, a abordagem adotada para este trabalho foi “do berço ao portão”, significando que foram considerados todos os impactos desde as etapas de lavra do minério (berço) à entrega do minério já concentrado para ser transportado pelo mineroduto (portão). Compreendem-se também por “berço”, as atividades anteriores às operações da Samarco, tais como: a extração e produção e transporte até a Unidade de Germano das matérias primas, insumos e equipamentos, além da geração de energia elétrica e sua transmissão até à Samarco.

A título de ilustração, a **Figura 4.2** mostra esquematicamente os limites do sistema.

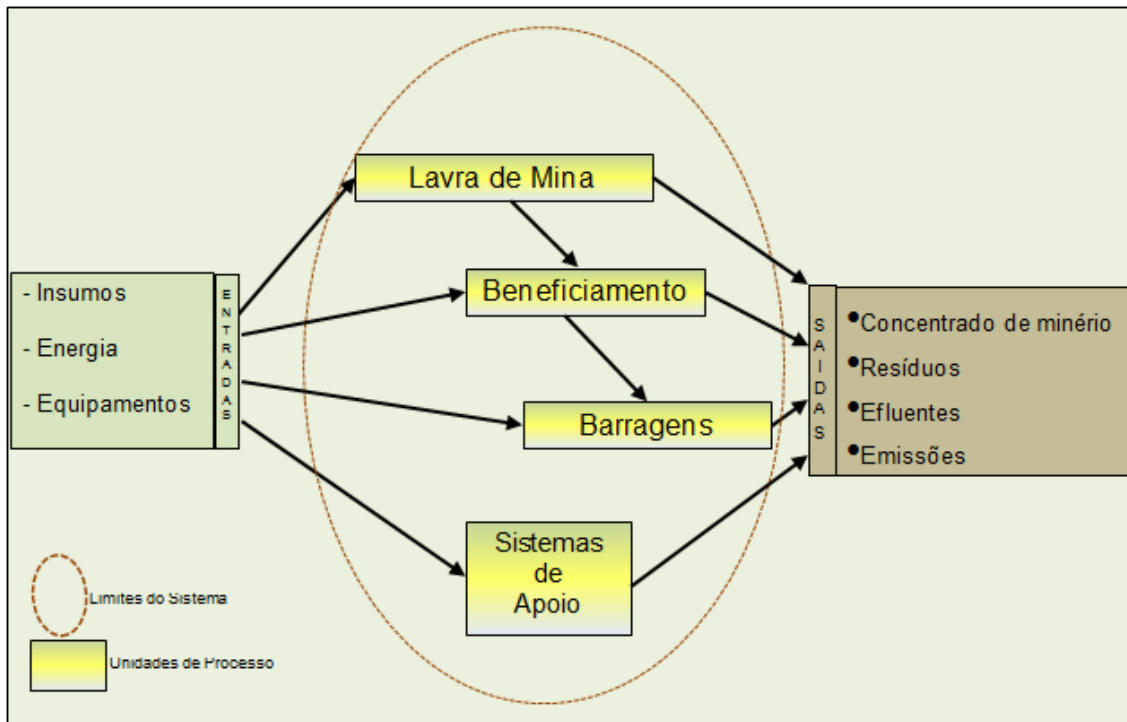


Figura 4.2 Limites do sistema de ACV para a produção do minério de ferro em Germano – SAMARCO.

Na etapa de “Lavra de Mina”, consideraram-se os processos de desmonte, carregamento e transporte do minério até a etapa de “Usina de Beneficiamento”. Na etapa aqui denominada de “Usina de Beneficiamento” foram incluídos todos os processos de tratamento do minério que o transformam em polpa de Concentrado, ou seja: britagem, moagem, deslamagem (ciclomag), flotação e espessamento (**Figura 4.1**). Esta etapa é responsável pelo produto principal da Unidade de Germano, a polpa de minério concentrado.

Além dos processos industriais, outros processos foram considerados no fluxo, como restaurantes, oficinas, laboratórios e áreas administrativas e suas respectivas contribuições – Sistemas de Apoio.

As “entradas” do sistema são constituídas de: Insumos, Energia e os Equipamentos que são utilizados nos diversos processos e que foram produzidos externamente. No que tange as “saídas” do sistema proposto, foram considerados todos os resíduos produzidos nos diversos processos estudados, entre estes podemos destacar: os efluentes hídricos da Usina (rejeitos do beneficiamento) que são conduzidos para as barragens, o estéril proveniente da etapa de “Lavra de Mina”, depositado nas pilhas de estéril dentro dos

limites da empresa, e os resíduos industriais (sucatas metálicas, madeira, borracha, etc.) e resíduos recicláveis (papel e plástico) encaminhados para reutilização e/ou reciclagem, além dos resíduos não recicláveis que são encaminhados para o aterro sanitário.

Uma vez que todas as operações unitárias apresentadas encontram-se em funcionamento, não foram consideradas as atividades necessárias à construção e início de operação de todo o processo. Entretanto, o uso do solo e sua transformação para abrigar as atividades foram considerados.

Unidade Funcional

A Unidade Funcional definida para este trabalho foi a produção de polpa de minério de ferro equivalente a 1 (uma) tonelada de concentrado deste minério na Unidade de Germano. Ou seja, os resultados da análise de ciclo de vida fornecidos neste estudo, se referenciam à “*produção de 1 (uma) tonelada de concentrado de minério de ferro*”.

Requisitos de Qualidade

Os principais requisitos de qualidade de dados propostos para este trabalho foram:

- **Período de tempo coberto**: dois fatos foram determinantes para a escolha do período de tempo da coleta dos dados usados para a análise neste trabalho. Primeiramente, a entrada em operação de uma planta nova (Usina de Beneficiamento II) em Germano em Junho de 2008, como parte de uma expansão de produção da empresa, com isso, todos os processos correntes sofreram um aumento significativo de fluxo de massa e energia em sua operação. Em segundo lugar, o fato de ter havido alternâncias operacionais no período de outubro de 2008 a Junho de 2009, quando a crise na siderurgia mundial obrigou a empresa à redução de sua produção. Assim sendo, os dados que foram utilizados neste trabalho abrangem a produção da Samarco no período de Julho/2009 a Junho/2010, período em que a unidade de Germano produziu em condições normais para todas as suas operações.
- **Fonte e representatividade dos dados**: Foram usados como fontes de dados os banco de dados internos da empresa, ressaltando-se que estes são gerados e gerenciados por profissionais de cada área de produção e são apresentados através de inventários e/ou relatórios de rotina e de estudos realizados. Ou seja, os dados que foram utilizados para a ACV são dados oficiais da empresa, que constam de seus balanços diários de produção e já testados e adequados, ao longo de 36 anos de operação.

- Impactos ambientais: Todas as entradas e saídas do sistema foram estudadas, porém algumas não foram consideradas devido à sua pouca significância para os resultados de impacto global, tais como, impactos decorrentes de situações emergenciais e que não são quantificáveis, como, por exemplo: vazamentos acidentais (de polpa de minério, água, óleos, etc.), deslizamentos de taludes, etc.

4.2 . Fase 2 – Inventário do Ciclo de Vida

Considerando a produção de uma (1,0) tonelada de concentrado de minério, foram definidas as seguintes Unidades de Processo:

- Mineração: compreendendo todas as atividades de lavra e disposição de estéril;
- Beneficiamento: compreendendo as Usinas I e II e a disposição de rejeitos industriais em barragens.

A **Figura 4.3** apresenta esquematicamente a relação entre estas unidades de processo e a unidade funcional adotada. Já a **Tabela 4.1** mostra a produção da Samarco em cada fase do processo e a equivalência da produção de cada Unidade de Processo com a Unidade Funcional.

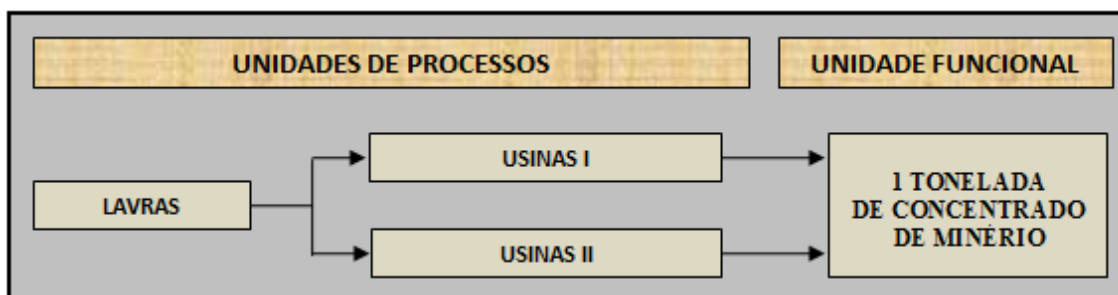


Figura 4.3 Fluxo esquemático para a produção da unidade funcional.

Tabela 4.1 Dados de Produção da Samarco – 01/Jul/2009 a 30/Jun/2010.

Produção Total			
Minério Concentrado		23.004.855 TMS	1 TMS
Produção Beneficiamento			
USINA I	Concentrado Samarco I	13.472.858 t/ano	0,586 t
	Concentrado VALE	1.800.567 t/ano	0,078 t
USINA II	Concentrado Samarco II	7.731.430 t/ano	0,336 t
Produção Mineração			
Minério Lavrado SAMARCO		32.702.005 TMS	1,760 T
Minério Recebido de Fazendão-VALE		7.778.579 TMS	0,568 T

4.2.1. Balanço de Massa do processo da Unidade de Germano

Com o objetivo de fundamentar o inventário dos impactos ambientais em função das entradas e saídas do sistema em estudo, foi elaborado um balanço de massa baseado nos dados de produção da Samarco relativos ao período de julho de 2009 a junho de 2010. Devido às particularidades dos fluxos de cada usina em operação, optou-se pela elaboração de um fluxo para cada Usina de Beneficiamento e por consequência a elaboração de dois balanços de massa.

Os balanços de massa foram elaborados em base diária, conforme a **Tabela 4.2**.

Tabela 4.2 Componentes do balanço de massa utilizados no estudo

Parâmetro	Unidade	
Minério Total	TMN/d	Toneladas Métricas Naturais por Dia
Umidade	%	Porcentagem de Umidade no Minério
Minério Base Seca	TMS/d	Toneladas Métricas Secas por Dia
Água	t/d	Toneladas de Água usada no processo por Dia

4.2.2. Balanço de Massa da Usina I

O processo de produção da Usina de Beneficiamento I de Germano é suprido de minério das Minas de Alegria (Norte e Sul) e da mina de Fazendão (VALE). Além disso, também é suprido com concentrado adquirido da Companhia VALE (Concentrado VALE). A Usina I recebe água da captação do rio Piracicaba e da recirculação da água da barragem de Santarém. Toda a produção de concentrado desta Usina é bombeada pelo Mineroduto I até a Unidade de Ponta Ubú. Finalmente, todos os rejeitos industriais são conduzidos para a barragem de Germano. A **Figura 4.4** ilustra o fluxo da Usina I e a **Tabela 4.3** mostra o seu balanço de massa.

Tabela 4.3 – Balanço de Massa da Usina I

Material	Unidade	Extração Mina (Minério)	Concentrado VALE (Minério)	Captação Rio Piracicaba (Água)	Rejeitos	Recirculação Barragem (Água)	Effluente Final (Água)	Água de Processo Recuperada	Água de Alimentação do Processo	Água para a Mina	Concentrado (Minério)
Total	t/d	70.775	7.465	10.960	93.646	64.279	29.948	154.527	228.386	1.379	61.029
Umidade	%	6,1	34,3	100	68,6	-	-	-	-	-	31,4
Água	t/d	4.317	2.560	10.960	64.241	64.279	29.948	154.527	228.386	1.379	19.184
Minério	TMS/d	66.458	4.905	-	29.405	-	-	-	-	-	41.845

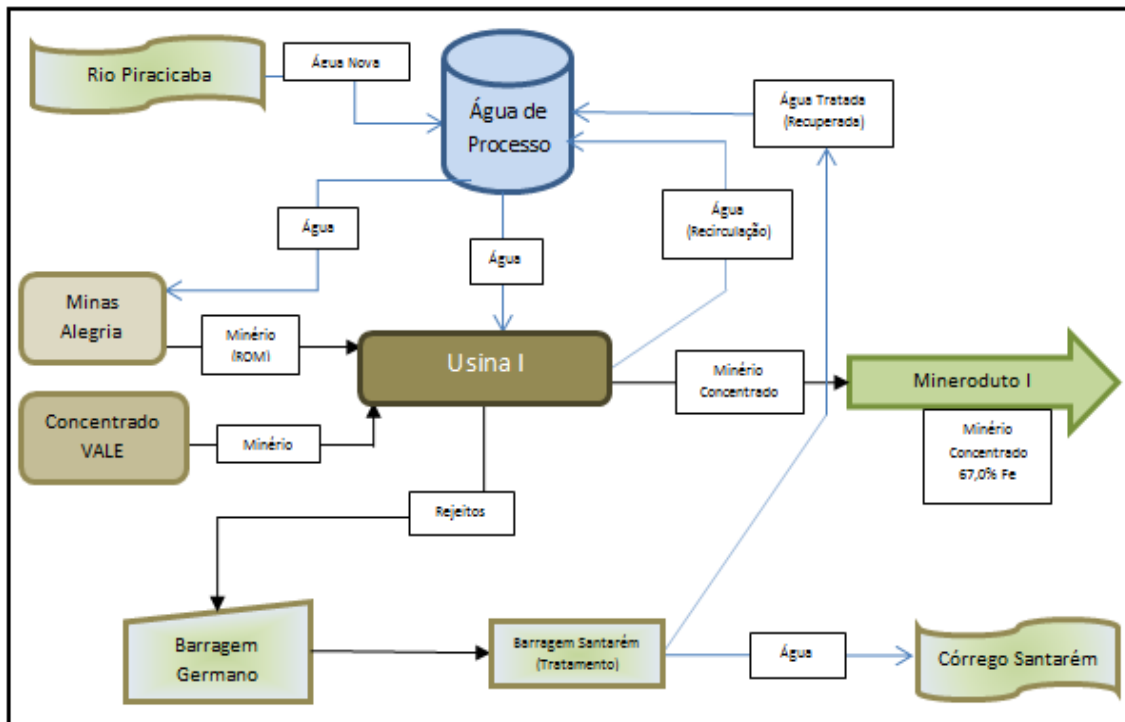


Figura 4.4 – Fluxograma do Processo da Usina I.

4.2.3. Balanco de Massa da Usina II

O processo de produção da Usina de Beneficiamento II de Germano é suprido por minério das Minas de Alegria (Norte e Sul) e da Mina de Fazendão (VALE). A **Usina II** recebe água da captação do rio Gualaxo do Norte e da água de subsuperfície obtida do aquífero na própria mina de Alegria. Toda a produção de concentrado desta Usina é bombeada pelo Mineroduto II até a Unidade de Ponta Ubú. Finalmente, todos os rejeitos industriais são conduzidos para a barragem de Germano. A **Figura 4.5** ilustra o fluxo da Usina II e a **Tabela 4.4** mostra o balanço de massa da Usina II.

Tabela 4.4 – Balanço de Massa da Usina II

Material	Unidade	Extração Mina (Minério)	Captção Lençol Alegria (Água)	Captção Rio Gualaxo (Água)	Rejeitos	Água de Processo Recuperada	Água de Alimentação do Processo	Concentrado (Minério)
Total	t/d	40.139	10.800	28.800	49.040	112.433	152.033	30.699
Umidade	%	6,4	100	100	66,5	100	100	31
Água	t/d	2.557	10.800	28.000	32.640	112.433	152.033	9.517
Minério	TMS/d	37.582	-	-	18.145	-	-	21.182

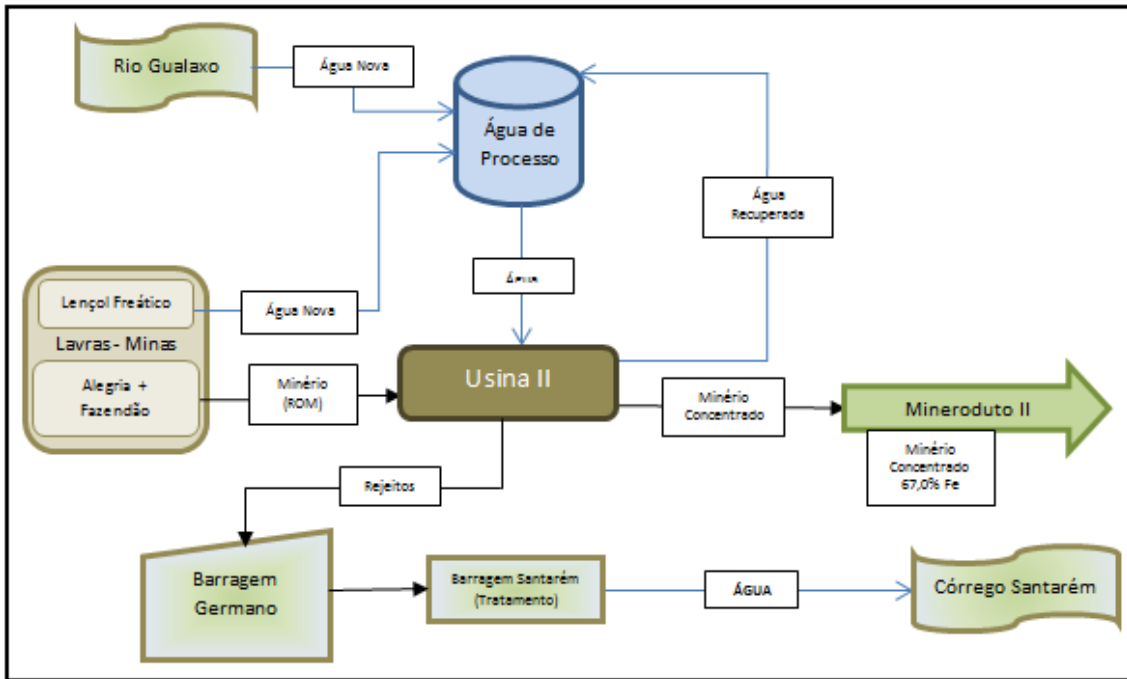


Figura 4.5 – Fluxograma do Processo da Usina II.

A Tabela 4.5 combina dados das tabelas acima:

Tabela 4.5 Dados combinados dos balanços de massa

Produção de Concentrado	t/d	Produção de 1 TMS	Concentrado Samarco	Concentrado VALE
Total	63.027	1,0	-	-
USINA I	41.845	0,664	0,586	0,078
USINA II	21.182	0,336	0,336	-

Como pode ser observado na Tabela 4.5, cada tonelada de minério concentrado produzido na Unidade de Germano, 0,664 toneladas foram processadas na Usina de Beneficiamento I, sendo 0,586 toneladas de concentrado Samarco e 0,078 toneladas de concentrado VALE. Esta Tabela mostra também que de cada tonelada de minério concentrado produzido na Unidade de Germano, 0,336 toneladas foram processadas na Usina de Beneficiamento II.

4.2.4. Apresentação das Tabelas do Inventário do Ciclo de Vida

Cada unidade de processo foi estudada em separado, através do levantamento dos fluxos de Entrada (Insumos) e de Saída (Produtos e Emissões) visando à elaboração do Inventário de Ciclo de Vida. Assim, serão apresentados a seguir os inventários relativos às atividades associadas a cada Unidade de Processo.

As **Tabelas 4.6 a 4.9** apresentam o Inventário do Ciclo de Vida (Entradas e Saídas) das Unidades de Processo estudadas, baseados em dados primários da empresa.

Tabela 4.6 Inventário do Ciclo de Vida da Etapa “Mineração”

MINERAÇÃO	
Lavras da Mina de Alegria	Fechamento de Mina
Consumo de Diesel	Área Transformada
$2,1 \times 10^{-4}$ kg diesel / kg minério	$1,21 \times 10^{-8}$ m ² / kg minério
$8,87 \times 10^{-3}$ MJ / kg minério	Diesel
	$8,87 \times 10^{-3}$ MJ / kg minério
Correias Transportadoras de Bancadas	
$4,73 \times 10^{-9}$ m / kg minério	
$1,13 \times 10^{-3}$ kwh / kg minério	
Detonação	
0,00878 kg explosivo / kg minério	
Equipamentos de Mina	
$2,387 \times 10^{-10}$ kg equipamento / kg minério	
Uso do Solo	
Ocupação do solo com Lavra	
$9,05 \times 10^{-7}$ m ² .a / kg minério	
Área Transformada em área de Lavra	
$1,21 \times 10^{-8}$ m ² / kg minério	
Ocupação do solo com Intralações	
$9,31 \times 10^{-7}$ m ² .a / kg minério	
Área Transformada em área Instalações	
$1,24 \times 10^{-10}$ m ² / kg minério	
Impacto das Instalações	
$4,77 \times 10^{-11}$ m ² / kg minério	

Tabela 4.7 Inventário do Ciclo de Vida da Etapa “Beneficiamento” - Entradas

BENEFICIAMENTO ENTRADAS	
USINA I	USINA II
Minério Lavra Samarco	Minério Lavra Samarco
1,19 kg / kg Concentrado	1,61 kg / kg Concentrado
Água	Água
$2,97 \times 10^{-4}$ m ³ / kg Conc.	$1,87 \times 10^{-3}$ m ³ / kg Conc.
Eletricidade	Eletricidade
$3,33 \times 10^{-2}$ kWh / kg Conc	$3,70 \times 10^{-2}$ kWh / kg Conc
Insumos	Insumos
Aminas	Aminas
Monoamina $2,55 \times 10^{-5}$ kg / kg Conc.	Monoamina $2,55 \times 10^{-5}$ kg / kg Conc.
Monoamina PA-14 F 30% $4,21 \times 10^{-6}$ kg / kg Conc.	Monoamina PA-14 F 30% $4,21 \times 10^{-6}$ kg / kg Conc.
Diamina Tomh DA-1630 $9,10 \times 10^{-5}$ kg / kg Conc.	Diamina Tomh DA-1630 $9,10 \times 10^{-5}$ kg / kg Conc.
Anti-incrustante	Floculante
Bulab 7099 $6,84 \times 10^{-6}$ kg / kg Conc.	Flonex 920 VHM $6,97 \times 10^{-6}$ kg / kg Conc.
Floculante	Flonex 4540 VHM $5,95 \times 10^{-6}$ kg / kg Conc.
Flonex 920 VHM $6,97 \times 10^{-6}$ kg / kg Conc.	Magnafloc 10 $3,63 \times 10^{-7}$ kg / kg Conc.
Flonex 934 VHM $5,95 \times 10^{-6}$ kg / kg Conc.	Magnafloc 351 $1,60 \times 10^{-6}$ kg / kg Conc.
Flonex 954 VHM $1,64 \times 10^{-5}$ kg / kg Conc.	
Magnafloc 10 $3,63 \times 10^{-7}$ kg / kg Conc.	Coagulante
Magnafloc 351 $1,60 \times 10^{-6}$ kg / kg Conc.	Magnafloc LT 7990 $1,67 \times 10^{-6}$ kg / kg Conc.
Coagulante	Amido
Magnafloc LT 7990 $1,67 \times 10^{-6}$ kg / kg Conc.	Amido de Mandioca $4,04 \times 10^{-4}$ kg / kg Conc.
Amido	Amido de Milho $7,63 \times 10^{-4}$ kg / kg Conc.
Amido de Mandioca $4,04 \times 10^{-4}$ kg / kg Conc.	Soda Cáustica
Amido de Milho $7,63 \times 10^{-4}$ kg / kg Conc.	Líquida $6,86 \times 10^{-4}$ kg / kg Conc.
Soda Cáustica	Cal Virgem
Líquida $6,86 \times 10^{-4}$ kg / kg Conc.	Cal Virgem $9,73 \times 10^{-4}$ kg / kg Conc.
Cal Virgem	Corpo Moedor
Cal Virgem $9,73 \times 10^{-4}$ kg / kg Conc.	Bola moinho aço-C 3" $8,78 \times 10^{-5}$ kg / kg Conc.
Corpo Moedor	Bola moinho aço-C 3" $8,78 \times 10^{-5}$ kg / kg Conc.
Bola moinho aço-C 3" $8,78 \times 10^{-5}$ kg / kg Conc.	Cylpeb 22mm $1,69 \times 10^{-4}$ kg / kg Conc.
Cylpeb 60mm c/ FeCr $1,97 \times 10^{-4}$ kg / kg Conc.	Bola moinho fofo 20mm $1,07 \times 10^{-4}$ kg / kg Conc.
Cylpeb 60mm s/ FeCr $1,58 \times 10^{-4}$ kg / kg Conc.	Bola moinho fofo 25 mm $9,41 \times 10^{-5}$ kg / kg Conc.
Cylpeb 22mm $1,69 \times 10^{-4}$ kg / kg Conc.	Bola moinho aço-C 60mm $2,07 \times 10^{-4}$ kg / kg Conc.
Bola moinho fofo 20mm $1,07 \times 10^{-4}$ kg / kg Conc.	Bola moinho fofo 60mm $1,31 \times 10^{-4}$ kg / kg Conc.
Bola moinho fofo 25 mm $9,41 \times 10^{-5}$ kg / kg Conc.	
Bola moinho aço-C 60mm $2,07 \times 10^{-4}$ kg / kg Conc.	
Bola moinho fofo 60mm $1,31 \times 10^{-4}$ kg / kg Conc.	

Tabela 4.8 Inventário do Ciclo de Vida da Etapa “Beneficiamento” - Saídas

BENEFICIAMENTO SAÍDAS	
USINA I	USINA II
Minério Lavra Fazendão (VALE) 0,40 kg Minério Lavrado / kg Concentrado	Minério Lavra Fazendão (VALE) 0,16 kg Minério Lavrado / kg Concentrado
0,40 kg / kg Concentrado	0,16 kg / kg Concentrado
Concentrado VALE	
Concentrado VALE 0,117 kg / kg Conc.	
Produtos	
Minério Concentrado	Minério Concentrado
Conc. Samarco 0,883 kg	Conc. Samarco 1,00 kg
Conc. VALE 0,117 kg	
Conc. Total 1,000 kg	Conc. Total 1,00 kg
Efluentes Líquidos	
Rejeitos Industriais 0,70 kg / kg Conc.	Rejeitos Industriais 0,86 kg / kg Conc.

Tabela 4.9 Inventário do Ciclo de Vida da Etapa “Sistemas de Apoio”

SISTEMAS DE APOIO	
Transporte de Pessoas	Gerenciamento de Resíduos Sólidos
Transporte externo de Funcionários (Ônibus) 0,031 km Percorrido/TMS Conc.	Transporte interno de Resíduos (Coleta interna com Caminhões) 0,09 MJ / TMS conc.
Transporte interno de Funcionários (Picapes e Vans) 0,085 km Percorrido/TMS Conc.	Resíduos de Matéria Orgânica Compostagem $1,35 \times 10^{-3}$ kg / TMS conc.
Transporte executivo de Funcionários (Veículos a Gasolina) 0,031 km Percorrido/TMS Conc.	Resíduos industriais não-metálicos Resíduos de Borracha $1,03 \times 10^{-2}$ kg / TMS conc.
	Resíduos industriais não-metálicos Resíduos de Construção Civil $5,44 \times 10^{-3}$ kg / TMS conc.
	Resíduos industriais de Óleo / Graxa Resíduos para Incineração $2,0 \times 10^{-3}$ kg / TMS conc.

Emissões atmosféricas: os impactos resultantes deste aspecto ambiental, devido a ausência de populações no raio de alcance destas emissões, são tratados na SAMARCO como aspectos de Saúde Ocupacional. Assim, não são monitoradas as fontes destas emissões, portanto, seus resultados para este trabalho foram calculados, como uma aproximação, através de metodologia específica para estudos de ACV – Eco-Indicator 99 – conforme será descrito mais a frente neste capítulo.

4.3. Fase 3 - Impacto do Ciclo de Vida

Os aspectos ambientais dos fluxos auxiliares (processos de produção dos insumos, equipamentos e energia) foram considerados e modelados a partir de bases de dados internacionais, adaptadas quando necessárias, utilizando-se de um software de apoio a estudos de ACV (SimaPro). Neste estudo foi utilizada a base de dados de ACV do Ecoinvent, criado e mantido pelo governo da Suíça e que, atualmente se constitui na maior base de dados do mundo, com cerca de 4000 inventários individuais de empresas de variados produtos. A avaliação geral dos impactos do ciclo de vida foi feita através do Método do Eco-indicator 99, já as avaliações dos impactos sobre a geração de gases de efeito estufa foi realizada pelo Método IPCC 2007, ambos consagrados internacionalmente, em estudos de ACV de produtos. A elaboração das planilhas com os dados da Samarco e sua utilização nos softwares citados, bem como a emissão dos relatórios de impactos foram realizados pela empresa de Consultoria GEOKLOCK, que possui licença para a utilização destas ferramentas em estudos de ACV no Brasil, através de um contrato de consultoria com a Samarco.

Estas ferramentas relacionam-se conforme a **Figura 4.6**.

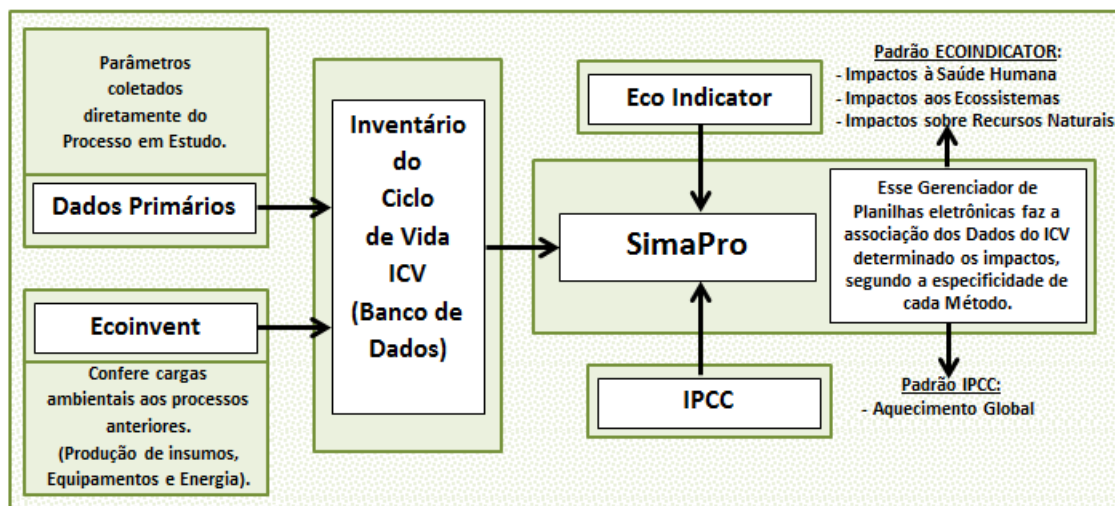


Figura 4.6 Ferramentas Computacionais usadas na Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida.

Dados primários da Samarco e dados extraídos do banco do Ecoinvent v2.0 (Sistemas Auxiliares ou *Background*) formam o ICV. Estes dados são inseridos no SimaPro7, que além de gerenciá-los e organizá-los, faz ainda a sua conversão em impactos através do método do Eco-indicator. Estas ferramentas serão discutidas com maior profundidade

nos itens que se seguem. Para GEE utilizou-se o método do IPCC no lugar do Eco-indicator.

- **O Gerenciador de Planilhas SimaPro 7**

O texto que se segue é uma descrição desta ferramenta e foi inteiramente baseada em GOEDKOOOP *et al.*, (2010), que é um manual para sua utilização. Como discutido em capítulo anterior, a elaboração de uma ACV segue uma estrutura pré-definida de etapas, denominadas “fases da ACV”, conforme orientações da ISO 14040 para o sequenciamento de atividades (Fases de 1 a 4). Existe uma grande variedade de softwares que se prestam a este fim, cada um com sua especificidade. A escolha da ferramenta é uma opção do analista e depende das características de cada estudo.

O SimaPro 7 é um dos softwares mais utilizados em nível mundial para a execução de projetos de ACV, como pode ser verificado em VIANA (2008); CHEN *et al.*(2011); OMETTO *et al.*(2009); GONZALEZ-GARCIA *et al.* (2012); UPADHYAYULA *et al.* (2012) e VALDERRAMA *et al.* (2012). Ele permite gerir de maneira devida a documentação dos dados primários levantados, o rastreamento dos dados do Ecoinvent e uma variada gama de oportunidades de análise e Avaliação do Impacto de Ciclo de Vida do projeto.

De fato, o SimaPro 7 funciona como um programa que gerencia planilhas, onde os dados do ICV são concatenados através de operações protocoladas (como por exemplo, o método de AICV do Eco-indicator 99 que será explicado mais adiante), e tendo como *output* os resultados de impacto ambiental em diversos relatórios padrão. De maneira simplificada, pode-se dizer que uma vez estabelecido os dados de um ICV, basta escolher qual metodologia de AICV será utilizada para que o software realize os cálculos automaticamente, e o resultado possa ser expresso de diversas formas: em fluxogramas, por impacto, por categoria de impacto, por substância no fluxo, entre outras. Em outras palavras, o software SimaPro 7 permite a gestão completa de um projeto de ACV, principalmente no que toca as questões de rastreamento e documentação de dados e informações, e facilita enormemente a execução das etapas puramente mecânicas (cálculos e demonstração de resultados), além de garantir segurança às matrizes resultantes.

Deve ser salientado que estes cálculos são extremamente trabalhosos, por dois motivos principais: 1) geralmente um ICV é composto de centenas de valores de entrada e saída, e 2) cada um destes valores deve ser tratado de uma maneira específica quando se

considera a ACV como todo, incluindo exaustivos cálculos em cadeias, ou *loops*. Além disso, existem diferenças entre métodos de AICV e suas particularidades (emissões de SO_x, por exemplo, no método “Eco-indicator 99”, são direcionadas às “categorias de impacto ao ecossistema” e “ de impactos à saúde humana”. Já em outro método, o “IPCC 2007”, estas emissões são direcionadas para a categoria de impacto “mudanças climáticas”). Desta forma, cabe ao analista escolher corretamente entre estas ferramentas qual aquela que mais se adequa aos objetivos traçados pelo estudo de ACV, para que ele possa gerar os resultados que irão subsidiar as conclusões e recomendações concretas do trabalho.

- **O Banco de Dados do Ecoinvent v2.0**

Segundo GOEDKOOOP *et al.* (2010, p. 14) a etapa que mais demanda recursos num projeto de ACV é a coleta e adequação de dados. Neste trabalho os dados relevantes para o fluxo do produto “minério” foram todos extraídos de programas de monitoramento da Samarco Mineração. Já os dados denominados *background* foram retirados do banco de dados denominado Ecoinvent v2.0. Entenda-se como dados de *background* aqueles ligados aos processos auxiliares, tais como dados de produção de um insumo, de energia, equipamentos, transporte e gestão de resíduos.

Tomando um exemplo apresentado em GOEDKOOOP *et al.* (2010, p. 14), se o projeto é uma ACV para o produto “lavadora de pratos”, deve-se considerar o caminhão que faz a entrega desta lavadora como um dado *background*. Não há nada de especial com o caminhão, e não há necessidade de coletar mais do que a distancia e a capacidade de carga do caminhão. As emissões do mesmo foram adotadas a partir de bancos de dados padrão. Entretanto, se a ACV é do caminhão, não se pode usar o caminhão padrão. Deve-se neste caso identificar os consumos e as emissões do caminhão. É por este motivo que este trabalho reflete apenas o estudo do minério da Samarco Mineração, e não se aconselha utilizar seus resultados como um banco de dados padrão para processos de mineração e beneficiamento de minério de ferro.

O banco de dados Ecoinvent v2.0 teve origem no final dos anos 1990, quando muitos bancos de dados públicos estavam disponíveis de maneira pulverizada, tanto em termos de setores inventariados como em termos de instituições responsáveis por publicar e atualizar estes dados na Europa. Paralelo a isso, a ACV ganha mais atenção da indústria e das autoridades como, por exemplo, uma importante ferramenta para políticas integradas de produto, avaliação de tecnologia e *design* sustentável. Assim surgiu a

necessidade de se organizar estes dados esparsos em um banco de dados integrado, confiável e que garantisse sua atualização. Construiu-se então o projeto do Ecoinvent, liderado pelo Instituto Federal de Tecnologia da Suíça (ETH), Paul Scherrer Institute (PSI) e o Laboratório Federal para Testagem de Materiais e Pesquisa (EMPA). Em 2003 foi lançada a versão 1.01 do banco e, em 2007, uma nova versão revisada foi publicada (FRISCHKNECH e JUNGBLUTH, 2007, p. 1). Atualmente o banco de dados Ecoinvent v2.0 se constitui na maior base de dados de ACV do mundo, com cerca de 4000 inventários individuais de empresas de variados produtos.

Uma vez que todos os fluxos do minério, que são o objetivo fim deste estudo, foram retirados de dados primários da Samarco, é aceitável que se usem dados referenciados internacionalmente para os sistemas e fluxos *background*. Pela própria conceituação de dados *background* para ACV, entende-se que pouco seria agregado ao sistema e ao próprio resultado da ACV em termos de refinamento. A utilização deste banco de dados em trabalhos de ACV encontra-se hoje consagrada conforme se pode ver em outros estudos, a exemplo de JOHNSON (2006); REID *et al.* (2009); ZACKRISSON *et al.* (2010) e GONZALEZ-GARCIA *et al.*(2012).

- **O Método do Eco-indicator 99**

Segundo a metodologia da ACV, apresentada na Figura 2.1, na Fase 3 deve-se aplicar um método de avaliação de impactos do ciclo de vida, para efetivamente conferir um resultado prático das suas consequências ambientais.

O método escolhido para este trabalho foi o Eco-indicator 99. Este item foi escrito com base na referência MHSPE (2000), por tratar-se do manual deste método.

Este método foi desenvolvido em 1997 por um grupo de cientistas da empresa Pré-Consultants e foi publicado no ano de 1999 como Eco-indicator 99, desde então vem ganhando destaque. Conforme BRINO *et al.* (2012, p. 65), este é um método *endpoint* ou “orientado para o dano” (*damage-oriented*), o que significa que avalia os danos causados nas áreas de proteção, que são os pontos finais das categorias de impacto (ver Figura 2.4),

O Eco-indicator 99 mostra-se hoje o método mais aplicado em estudos completos de ICV e representa o estado da arte em aplicação em metodologias de ACV, como pode ser visto em CHEN *et al.* (2011); KORONEOS *et al.* (2012); UPADHYAYULA *et al.* (2012) e VALDERRAMA *et al.* (2012). Neste trabalho não foi descrito em detalhes o

método, mas será feita uma breve explanação do seu funcionamento, visando o entendimento e análise dos seus resultados.

Para se calcular o impacto do ICV segundo este método, aplicam-se 3 passos:

- Levantamento em inventário de todas as emissões relevantes, todas as extrações de recursos e todos os usos de solo em todos os processos que formam o ciclo de vida considerado;
- Avaliação dos impactos causados a estes fluxos em relação à três categorias: saúde humana, qualidade dos ecossistemas e disponibilidade dos recursos naturais;
- Ponderação destas três categorias de danos.

A **Figura 4.7**, a seguir mostra de maneira gráfica estes três passos:

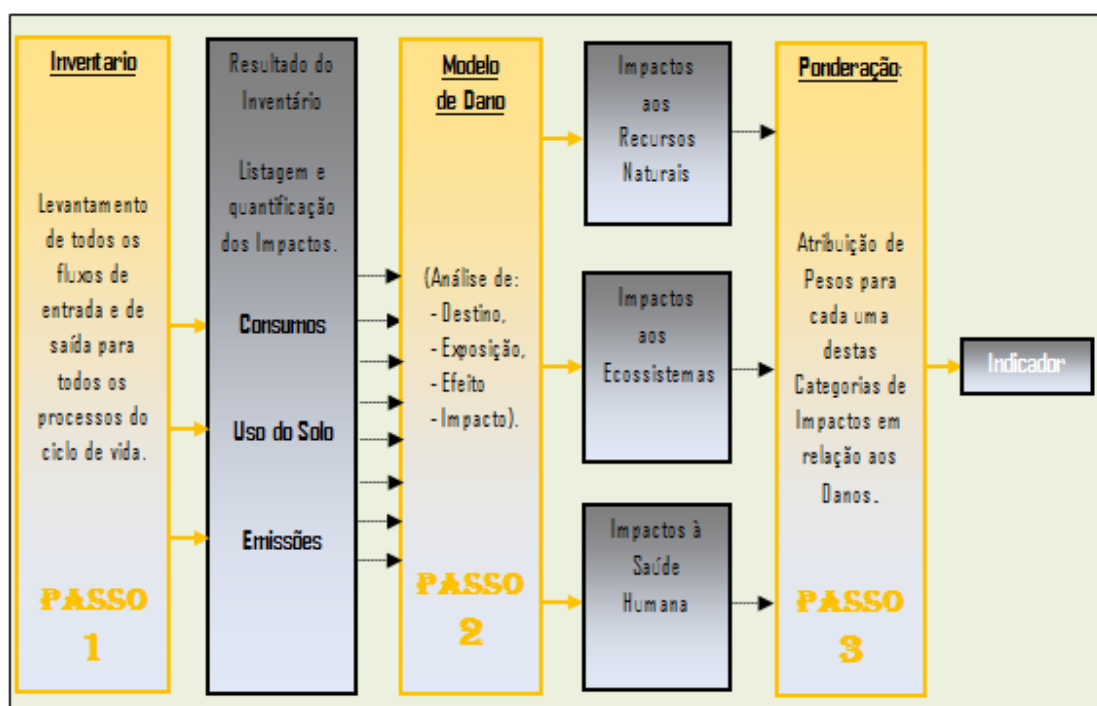


Figura 4.7 Representação esquemática dos três Passos para aplicação do Método Eco-Indicator 99. Fonte: Adaptado de MHSPE (2000, p. 23).

Nota-se que os passos 1 e 2 são procedimentos padrão da avaliação do ciclo de vida, já o passo 3 é uma etapa não obrigatória segundo a ISO 14040 (DITSELE, 2010, p.30).

Neste trabalho optou-se por não utilizar a ponderação, portanto, foram executados somente os passos 1 e 2.

O Passo 1 é a própria criação do ICV do projeto em questão, que para o objetivo deste estudo, já foi explicitado. Com relação ao Passo 2 – ou seja, a análise particular de cada emissão para se estabelecer os modelos de impacto, quatro etapas foram executadas. Seguem abaixo as mesmas detalhadas:

Etapa 1: análise do destino

Quando uma substância química é liberada no ambiente, ela acha seu destino através dos chamados compartimentos ambientais: ar, água e solo. Para onde esta substância vai, e de igual importância, quanto tempo ela permanecerá neste compartimento, depende das propriedades da substância e dos compartimentos. Uma substância facilmente solúvel fatalmente irá achar seu caminho pela água e sendo orgânica, terá uma permanência limitada neste compartimento. Numa análise de destino, estas transferências e seus impactos são modelados e a concentração resultante pode ser calculada. (MHSPE, 2000, p. 25).

Etapa 2: análise de exposição

Baseando-se nas concentrações calculadas pode-se determinar o quanto uma substância realmente é ingerida por seres humanos, animais, plantas ou outras formas de vida. Por exemplo, sabe-se que a concentração de um determinado poluente em um rio, resultante da análise de destino daquele poluente para o compartimento água, atinge níveis que serão responsáveis pela contaminação da fauna aquática proporcionalmente à sua concentração naquela água. (MHSPE, 2000, p.25).

Etapa 3: análise de efeito

Uma vez que a exposição de uma substância é conhecida, é possível prever os tipos e frequências de doenças e outros efeitos. Continuando o exemplo da etapa 2, é possível verificar quais os efeitos desta exposição, ou seja, se há possibilidade daquela contaminação efetivamente tornar-se uma doença e reduzir o número de espécies ou indivíduos da fauna aquática estudada. (MHSPE, 2000, p. 25).

Etapa 4: análise de impacto

Três são as categorias de impacto neste método: impactos à saúde humana (1), impactos aos ecossistemas (2) e impactos à disponibilidade de recursos naturais (3). Ou seja, cada impacto deve ser analisado em relação a, pelo menos, uma das três categorias.

(1) Impactos à Saúde Humana:

A Organização Mundial da Saúde (OMS) define Saúde Humana como “um estado de completo desenvolvimento físico, mental e bem-estar social, e não meramente a ausência de doença ou enfermidade”. Entretanto, a OMS nesta definição inclui tanto os efeitos patológicos provocados diretamente por produtos químicos, radiações e por alguns agentes biológicos, como por efeitos indiretos na saúde e no bem-estar físico e psicológico, provocados no ambiente social e estético, devido ao desenvolvimento habitacional e urbano, assim como o uso do solo e as políticas de transporte (WHO, 1995 *apud* GOEDKOOOP e SPRIENSMA, 2001, p. 29).

Em trabalhos de ACV só podemos lidar com alguns desses aspectos, uma vez que a ACV representa apenas as emissões antrópicas em água, ar e solo. Assim sendo, ela não aborda:

- as condições insalubres nos locais de trabalho e residências, acidentes de trânsito, e os efeitos de bebida ou do cigarro sobre a saúde da população.
- os problemas de saúde causados por desastres naturais e por micro-organismos.
- os aspectos econômicos, assim, as consequências da baixa renda da população não são levadas em conta.

Estas limitações no âmbito de uma ACV levam a uma definição da Categoria de Impacto “Saúde Humana” de maneira muito mais restritiva do que a OMS o faz.

Saúde Humana no escopo de uma ACV significa a ausência de morte prematura, ausência de doenças ou de restrições físicas causadas por emissões industriais ou agrícolas para o ar, a água e para o solo (GOEDKOOOP e SPRIENSMA, 2001, p. 29).

No nível internacional um indicador simples para quantificar a carga total de doença foi desenvolvido por Murray para o estudo *Global Burden of Disease* (Carga Global de Doenças) realizada por uma colaboração entre o Banco Mundial e a OMS. A intenção é que este indicador seja usado como uma ferramenta de Políticas de Saúde, com o

objetivo de alocar recursos financeiros para cuidar da saúde das populações (WORLD BANK, 1993 *apud* GOEDKOOOP e SPRIENSMA, 2001, p. 29).

Este indicador de saúde, expresso como o número de anos de vida vivido com alguma incapacidade (*DALY = Disability-Adjusted Life Years*), mede a quantidade total de problemas de saúde, devido à alguma incapacidade física ou fisiológica e até mesmo a morte prematura, atribuível a doenças e/ou lesões específicas (GOEDKOOOP *et al.*, 2001, p. 29).

Assim, o conceito do DALY, compara tempo vivido com o indivíduo portando alguma deficiência, “Anos Vividos Com Mobilidade Condicionada” (*YLD: Years Lived Disabled*) e o tempo de vida perdido devido à morte prematura do indivíduo, “Anos de Vida Perdidos” (*YLL: Years of Life Lost*) (GOEDKOOOP e SPRIENSMA, 2001, p.29).

O Indicador de Saúde simplesmente trabalha adicionando os dados referentes a cada indivíduo. Ou seja, duas pessoas cada uma perdendo 10 anos de vida livre de deficiência são tratados por este indicador como uma pessoa perdendo 20 anos (MURRAY *et al.*, 1996, *apud* GOEDKOOOP e SPRIENSMA, 2001, p.29).

Na metodologia do Eco-indicator 99 este método de quantificação para a categoria de impacto “Saúde Humana” é usado para atribuir valores para diferentes deficiências causadas por impactos ambientais. A escala de saúde é usada para estimar DALYs devido a uma doença causada por condições ambientais.

Por exemplo, se é sabido que certo nível de exposição causa um número de casos extras de certo tipo de câncer, podem-se descobrir dados da média de idade de pessoas que contraem este câncer e a chance média de que estas pessoas morrerão por este motivo. Com base nestes dados, podem-se calcular quantos anos de vida são perdidos ou quantos anos de vida são vividos com alguma disfunção física. A unidade definida pelo Método Eco-indicator 99 para a categoria de impacto “danos à saúde” é o DALY (*Disabled Adjusted Life Years*).

Portanto, o DALY pode ser entendido como a unidade que quantifica o número de Anos vividos por um indivíduo, portando alguma deficiência/incapacidade.

(2) Danos à Qualidade dos Ecossistemas:

Quando estamos interessados na Categoria de Impacto “Qualidade dos Ecossistemas” recomenda-se um cuidado especial, pois praticamente todos os grupos de espécies biológicas podem ser afetados pela atividade antrópica. Ao mesmo tempo não se pode monitorar todos estes grupos. Assim o analista de ACV está diante de dois problemas:

- Que grupos de espécies (flora e fauna) melhor representam a Qualidade do Ecossistema?
- Que tipo de danos à espécie escolhida é relevante: A extinção total da espécie ou o desaparecimento temporário da espécie devido à um stress tóxico que perdure por algum tempo?

De fato pode-se assumir que a extinção completa de uma espécie normalmente ocorre como resultado de muitos fatores diferentes. Isto significa que nenhum ciclo de vida de produto causa sozinho, a extinção de espécies, mas ela é resultado dos efeitos de todos os ciclos de vida de produtos juntos (GOEDKOOOP e SPRIENSMA, 2001, p. 53 e 54).

O segundo tipo de impacto causado por um ciclo de vida de produto resulta em um stress temporário sobre o ecossistema. Este stress pode ser um dos fatores que causam a extinção total de uma espécie, mas não se pode ter certeza disto. O stress causado por um ciclo de vida de produto é temporário e dura o tempo que a unidade funcional for utilizada (GOEDKOOOP e SPRIENSMA, 2001, p. 53). Uma ACV resulta em emissões que são expressas como uma carga de massa e uma ocupação temporária de uma área. Mesmo se os habitat são destruídos pela transformação da área assume-se que este impacto estará restaurado assim que cessar a atividade.

Em estudos de ACV dois parâmetros são utilizados para descrever os impactos sobre a Qualidade dos Ecossistemas:

- Para **Toxicidade** usa-se o **PAF** (*Potentially Affected Fraction of Species*), ou seja: a **Fração de Espécies Potencialmente Afetada**. O PAF é usado para expressar o efeito sobre organismos que vivem na água e no solo, tais como peixes, crustáceos, algas, micro-organismos e várias espécies de plantas. O PAF pode ser interpretado como a fração de espécies que está exposta a uma concentração igual ou maior que a Concentração máxima na qual o Efeito Não é Observado - NOEC – *Non Observed Effect Concentration* (GOEDKOOOP e SPRIENSMA, 2001, p. 53).

- Para *Acidificação, Eutrofização e o Uso do Solo* usa-se o **PDF** (*Potentially Disappeared Fraction*). Este parâmetro pode ser entendido como a **Fração de Espécies Potencialmente Desaparecidas**. O PDF é usado para expressar os efeitos sobre as populações de organismos pouco desenvolvidos, como algumas plantas, presentes na área. O PDF pode ser interpretado como a fração das espécies que têm uma alta probabilidade de não ocorrência na região devido às condições não favoráveis. Isto significa que a fração de espécies que não ocorre pode também ser descrita como a fração de espécies que desapareceu (GOEDKOOOP e SPRIENSMA, 2001, p. 54).

Para este estudo o conceito de PDF será também usado para o Uso do Solo. O impacto da mudança na cobertura do solo sobre os ecossistemas é muito significativo. Na maioria das regiões do planeta esta influência talvez seja mais importante do que qualquer outra categoria de impacto (MULLER-WENK, 1998-2 *apud* GOEDKOOOP e SPRIENSMA, 2001, p. 63).

Ao contrário do que possa parecer à primeira vista, as alterações na cobertura do solo não têm somente efeitos locais, mas toda a região de entorno pode ser afetada. Além disso, temos de distinguir os impactos provenientes da ocupação do solo e da transformação da terra.

Diferente de outros modelos de impactos, os dados necessários para modelagem de uso da terra são baseados em dados empíricos, como observações de números de espécies em diferentes tipos de cobertura do solo, em vez de modelamentos matemáticos e computacionais a partir de dados de laboratório. Segundo GOEDKOOOP e SPRIENSMA (2001, p. 63) estes aspectos têm algumas consequências importantes para o modelo:

- O número observado de espécies é o resultado de muitas influências diferentes, tais como a concentração de produtos químicos tóxicos e o nível de nutrientes e de acidez, ou mesmo a influência do aumento dos padrões UV ou das mudanças climáticas. Isto quer dizer que é impossível separar o efeito de uma mudança no uso do solo de outras categorias de impactos.
- Existem muitos diferentes tipos de cobertura de solo e o número de espécies presentes em cada um deles pode variar completamente para cada diferente região do Planeta.

- Existem dois grandes problemas com relação à disponibilidade de dados em observações de campo:
 - Apenas alguns poucos tipos de uso de solo dispõem de dados suficientes.
 - Os tipos de uso de solo para os quais há dados disponíveis nem sempre são adequados para aplicação prática em ACV.

A metodologia usada no Eco-indicator 99 foi desenvolvida originalmente para o efeito regional e como uma aproximação para refletir o efeito local do uso do solo (GOEDKOOOP e SPRIENSMA, 2001, p. 63). Então o impacto sobre a Qualidade dos Ecossistemas pode ser expresso como: “*a redução relativa do número de espécies (fração) * área * tempo*”. Ou seja, a unidade para a categoria de impacto: “danos ao ecossistema por **Acidificação, Eutrofização e o Uso do Solo**” é [PDF*m²*t], ou seja, Percentual de Espécies Desaparecidas em determinada área, em um determinado tempo.

(3) Danos pelo uso de Recursos Naturais

Ao contrário das categorias de impacto “Saúde Humana (DALY)” e “Qualidade de Ecossistemas (PAF e PDF)”, não encontramos uma unidade padrão internacionalmente aceita para expressar os impactos sobre os recursos naturais. Assim, um novo conceito teve que ser desenvolvido para a complementação da metodologia Eco-Indicator.

Segundo GOEDKOOOP e SPRIENSMA (2001, p. 75) o modelamento deste novo padrão levou em consideração que os impactos sobre os recursos naturais têm relação com duas componentes básicas:

1. A diminuição da concentração dos recursos devido a sua extração.
2. A dificuldade crescente de se extrair e beneficiar estes recursos à medida que sua concentração cai.

O modelo adotado se baseia no conceito de “energia excedente”, ou seja, a quantidade “a mais” de energia em relação ao que é gasto hoje, que será necessário para extrair no futuro a mesma quantidade de um determinado recurso.

O conceito de recursos naturais é bastante amplo, pois sua definição deverá abordar todo o espectro de recursos ambientais. Assim, na metodologia Eco-Indicator 99 os únicos grupos de recursos que foram modelados são os “recursos minerais” e os “combustíveis fósseis”.

O método Eco-Indicator 99 considera que a extração de minérios e combustíveis fósseis reduz a qualidade dos recursos remanescentes. Isso porque a humanidade sempre irá extrair o melhor recurso antes, deixando os de menor qualidade para as gerações futuras. Pode-se traduzir este fato em teor de minérios. Por exemplo, uma jazida de minério com teor mais alto será sempre lavrada primeiro, e da mesma forma um poço de petróleo mais acessível será explotado antes que um de mais difícil acesso (**Figura 4.8**). Então, as gerações futuras terão que dispendir maior energia para extrair o mesmo valor absoluto de recursos (MHSPE, 2000, p. 27). A unidade definida pelo Método Eco-indicator 99 para esta categoria de impacto é: *MJ-Surplus*, ou seja, a energia (em Mega-Joules) a mais que será necessária para se explorar as reservas remanescentes.

A **Figura 4.8**, mostrada a seguir, exemplifica para vários minérios como as reservas minerais diminuem à medida que os minérios mais ricos vão sendo extraídos. No **Eixo dos “yy”** é representada a “quantidade extraída” e no **Eixo dos “xx”** o “teor” do minério remanescente na jazida, ou seja, a sua concentração.

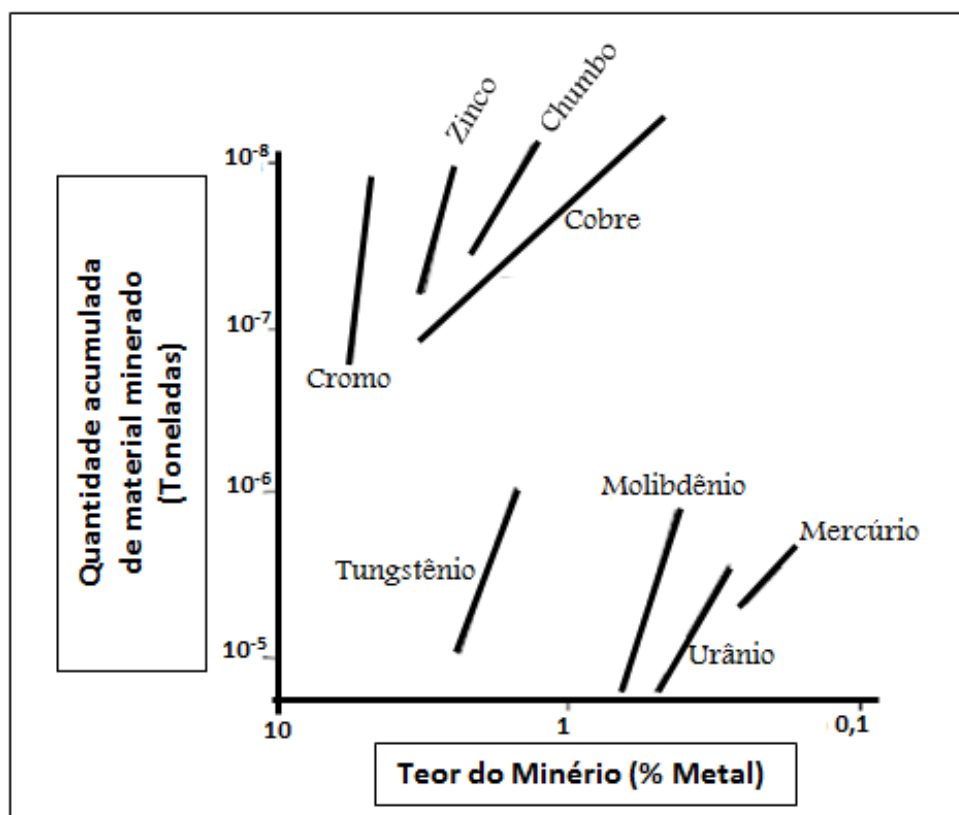


Figura 4.8 Avanço na escassez das reservas minerais em relação ao seu teor.
 (Fonte: Adaptado de Chapman e Roberts, 1983 *apud* MHSPE, 2000, p. 27).

O fluxograma da **Figura 4.9** apresenta um resumo dos passos trilhados para a aplicação do método para a elaboração do inventário de Impactos de uma ACV.

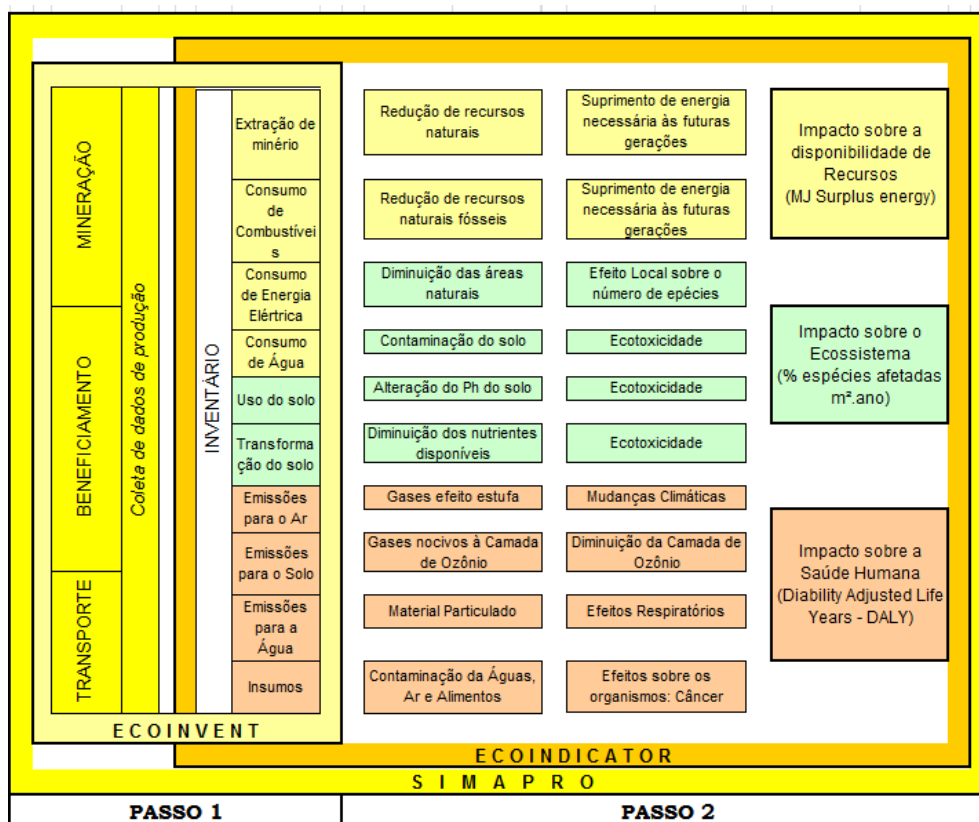


Figura 4.9 Os Passos usados na elaboração do Inventário deste estudo.
(Adaptado de MHSPE, 2000, p. 25)

(4) Avaliação dos Gases de Efeito Estufa

O método usado neste estudo para avaliação dos impactos ambientais foi o Eco-indicator 99, que classifica os impactos em três categorias:

- disponibilidade de recursos naturais;
- Danos aos ecossistemas;
- danos à saúde humana.

Neste método, portanto, a geração de gases de efeito estufa (GEE) somente é avaliada sob o ponto de vista de danos à saúde humana e aos ecossistemas.

O indicador de Potencial de Aquecimento Global – GWP – é uma escala relativa para comparar os efeitos dos gases de efeito estufa com a mesma massa de dióxido de carbono – CO₂. O GWP é uma parte da Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida que é importada das Tabelas Internacionais estabelecidas pelos diversos métodos de AICV,

como o Eco-Indicator 99, o CML 2001 e o IPCC 2007 (CHEN *et al.*, 2011, p. 38). Visando buscar uma abordagem mais atual deste impacto, ou seja, com referência às mudanças climáticas e ao aquecimento global ele foi também analisado pelo método do IPCC 2007.

Nesta avaliação foi utilizado o método IPCC 2007 GWP 100anos V1.01 , pois o mesmo integra o software Simapro 7 comercial para avaliar os resultados de GWP, e os dados primários da Samarco.

Esta mesma associação entre as Tabelas do método IPCC 2007 e o Simapro 7 pode ser encontrada em vários estudos de ACV, como por exemplo em CHEN *et al.*, (2011).

- **IPCC 2007 (Mudanças Climáticas)**

A caracterização de diferentes emissões de gases de acordo com seu potencial de aquecimento global e a agregação das diferentes emissões na Categoria de Impacto das mudanças climáticas é um dos métodos mais utilizados na avaliação de impacto do ciclo de vida - AICV (JUNGBLUTH e NEMECEK, 2010, p. 127).

Este método avalia as emissões de gases de efeito estufa devido às atividades antrópicas investigadas através da tabela de inventário de impactos destas atividades, como por exemplo, nos estudos de ACV conforme pode ser visto em VALDERRAMA *et al.*, (2012).

A caracterização da emissão de gases de efeito estufa normalmente se baseia no potencial de aquecimento global publicado pelo IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas.

Três horizontes temporais são utilizados para mostrar os efeitos na atmosfera dos diferentes gases: IPCC GWP 20 anos; IPCC GWP 100 anos e IPCC GWP 500 anos (HOUGHTON *et al.*, 1990. p. xxi).

Os potenciais de aquecimento global considerados “diretos” são aqueles relativos ao impacto das emissões de dióxido de carbono - CO₂. Assim, o Potencial de Aquecimento Global (IPCC - GWP) é um índice utilizado para estimar a contribuição relativa do aquecimento global devido às emissões atmosféricas de um kg de qualquer gás de efeito estufa em comparação com a emissão de um kg de dióxido de carbono (Albritton e Meira-Filho, 2001 *apud* JUNGBLUTH e NEMECEK, 2010, p.127).

Então, o impacto, sobre as mudanças climáticas, calculado por este método pode ser expresso para qualquer emissão de gases de efeito estufa em termos de **CO₂ equivalente**.

A **Tabela 4.10** mostra a medida do impacto ambiental das emissões de diferentes gases de efeito estufa em relação à unidade padrão.

TABELA 4.10 Método IPCC – Potencial de Aquecimento Global para diversos Gases, tomando como referência kg CO₂ equivalente

Potencial de Aquecimento Global Método IPCC - GWP Base Temporal - 100 anos -		
Emissões	Unidade	kg CO ₂ equivalente
Amonia (NH ₃)	kg	7,66
Butano (C ₄ H ₁₀)	kg	3
Dióxido de Carbono (CO ₂)	kg	1
Monóxido de Carbono (CO)	Kg	1,58
Cloroformio (CHCl ₃)	kg	4
Monóxido de Nitrogênio (N ₂ O)	kg	296
Tri-Cloro Etano 1,1,1 (C ₂ H ₃ Cl ₃)	kg	-204
Tri-Fluor-Etano 1,1,1 (C ₂ H ₃ F ₃)	kg	4300
...		
Metano (CH ₄)	kg	23
...		
Óxidos de Nitrogênio (NO _x)	kg	2,83
Propano (C ₃ H ₈)	kg	3
Hexa fluoreto de Enxofre (SF ₆)	kg	22200
Íon Amônio NH ₄ ⁺	kg	23,26
Nitratos (NO ₃ ⁻)	kg	5,25
Nitritos (NO ₂ ⁻)	kg	7,08
Nitrogênio (orgânico)	kg	23,26
Nitrogênio (Total)	kg	23,26

Fonte: JUNGBLUTH e NEMECEK, 2010, p. 133.

4.4 . Interpretação dos Resultados dos Impactos do Ciclo de Vida

Os resultados deste trabalho são apresentados em unidades próprias de cada Categoria de Impacto, quantificadas para a produção de 1,00 tonelada de Concentrado. Estes resultados estão subdivididos nos fluxos de produção – Mineração e Beneficiamento – com o fim de mostrar onde estão as principais influências dos processos sobre determinado impacto (Capítulo 5).

A título de exemplo de como os resultados serão apresentados, utiliza-se o fluxo da **Figura 4.10** – onde se nota que para cada tonelada de Concentrado Produzido em TMS, 0,93 TMS vêm da produção da própria empresa e os outros 0,07 TMS advém de minério concentrado comprado de terceiros. Da mesma forma este fluxo mostra que

para cada tonelada de concentrado produzido, é necessária a alimentação nas Usinas de Beneficiamento de 1,65 toneladas de minério “*run of mine*”, sendo que no período estudado este minério teve a seguinte divisão: 64% (1,05 TMS) vindo das minas de Alegria-Samarco e 36% (0,60 TMS) comprado de terceiros, proveniente das minas de Fazendão-VALE.

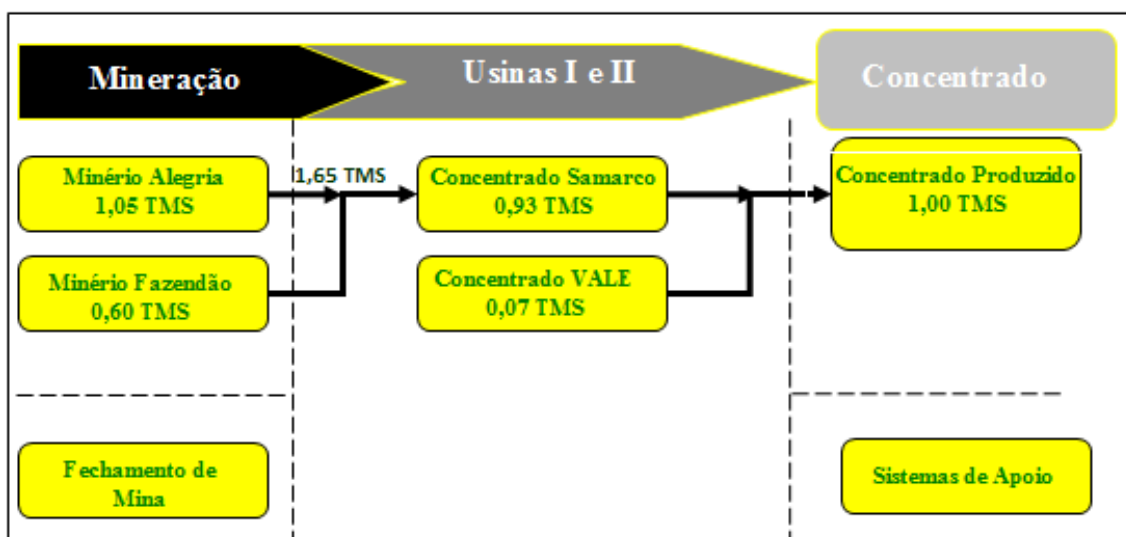


FIGURA 4.10 Fluxo produtivo estudado mostrando a necessidade de produção em cada etapa do processo para a produção de 1,00 tonelada de minério concentrado.

Para maior objetividade foram detalhados apenas os dois maiores impactos de cada Categoria de Impacto além do impacto de Emissão de Gases de Efeito Estufa – GEE – que embora não tenha figurado entre os maiores impactos, foi detalhado devido à sua grande importância e atualidade.

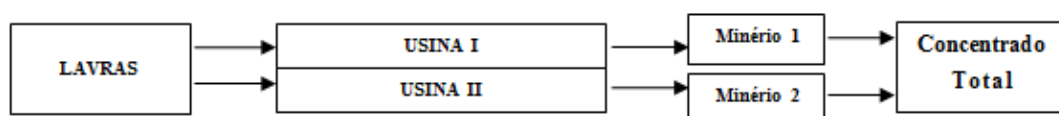
A etapa de desativação das atividades da empresa, embora se refira a todas as áreas de todos os processos, teve seus impactos alocados apenas na etapa de Mineração, sob o nome de “Fechamento de Mina”.

Sistemas auxiliares, tais como: transporte de empregados, interna e externamente (viagens) e gerenciamentos dos resíduos, que abrange todas as etapas do processo, foram apresentados como um sistema independente e seus impactos somados ao resultado final sob o nome de “Sistemas de Apoio”.

A Interpretação do Ciclo de Vida foi feita através da discussão dos resultados obtidos com a graduação das categorias de Impacto e mostrando as etapas do processo onde foi observada a maior concentração de impactos ambientais e onde se encontra aqueles mais significativos.

5. Resultados

Como visto anteriormente, a composição do concentrado total Samarco é de 66% produzido na Usina I (*Minério1*) e de 34% produzido na Usina II (*Minério2*).



Para maior clareza na apresentação dos resultados dos impactos de cada uma das etapas do processo, e para atender à Unidade Funcional conforme foi definida, os mesmos se referenciarão à produção de 1,0 tonelada do Concentrado Total (minérios 1 e 2).

Na **Tabela 5.1** é apresentada a quantificação dos impactos do ciclo de vida, divididos pelas três categorias definidas na metodologia adotada:

Tabela 5.1 Resultados dos Danos associados às três Categorias de Impactos adotadas pelo Método Eco Indicator 99.

Danos à Saúde Humana	P/ 1,00 TMS Conc
Substâncias Carcinogênicas	1,05 x 10 ⁻⁵ DALY
Orgânicos Respiráveis	1,90 x 10 ⁻⁸ DALY
Inorgânicos Inaláveis	5,06 x 10 ⁻⁵ DALY
Mudanças Climáticas	3,39 x 10 ⁻⁶ DALY
Radiação	5,24 x 10 ⁻⁸ DALY
Depleção da Camada de Ozônio:	8,96 x 10 ⁻¹⁰ DALY
Qualidade do Ecossistema	P/ 1,00 TMS Conc
Ecotoxicidade	20,8 PAF . m ² .ano
Acidificação / Eutrofização	0,561 PDF. m ² .ano
Uso do Solo	5,26 PDF. m ² .ano
Recursos Naturais	P/ 1,00 TMS Conc
Uso de Recursos Minerais	44,8 MJ <i>Surplus</i>
Consumo de Combustíveis Fósseis	16,5 MJ <i>Surplus</i>

5.1. Interpretação do Ciclo de Vida

A partir da observação destes resultados, optou-se por concentrar os esforços de avaliação sobre os dois maiores impactos de cada categoria, ou seja: Inorgânicos Inaláveis; Carcinogênicos; Ecotoxicidade; Uso do Solo; Recursos Minerais e Combustíveis Fósseis.

5.1.1. Categoria de Impacto: Danos à Saúde Humana.

Nesta Categoria de Impacto serão comentados os resultados relativos à emissão de substâncias contendo elementos “Inorgânicos Inaláveis” e “Carcinogênicos”.

5.1.1.1 Impacto: Emissão de Inorgânicos Inaláveis (DALY)

A **Figura 5.1** apresenta as principais substâncias passíveis de inalação geradas na cadeia de produção do concentrado de minério de ferro da Samarco. O total do impacto medido pelo método do Eco-indicator 99, para cada tonelada de concentrado produzida, é de $5,06 \times 10^{-5}$ DALY.

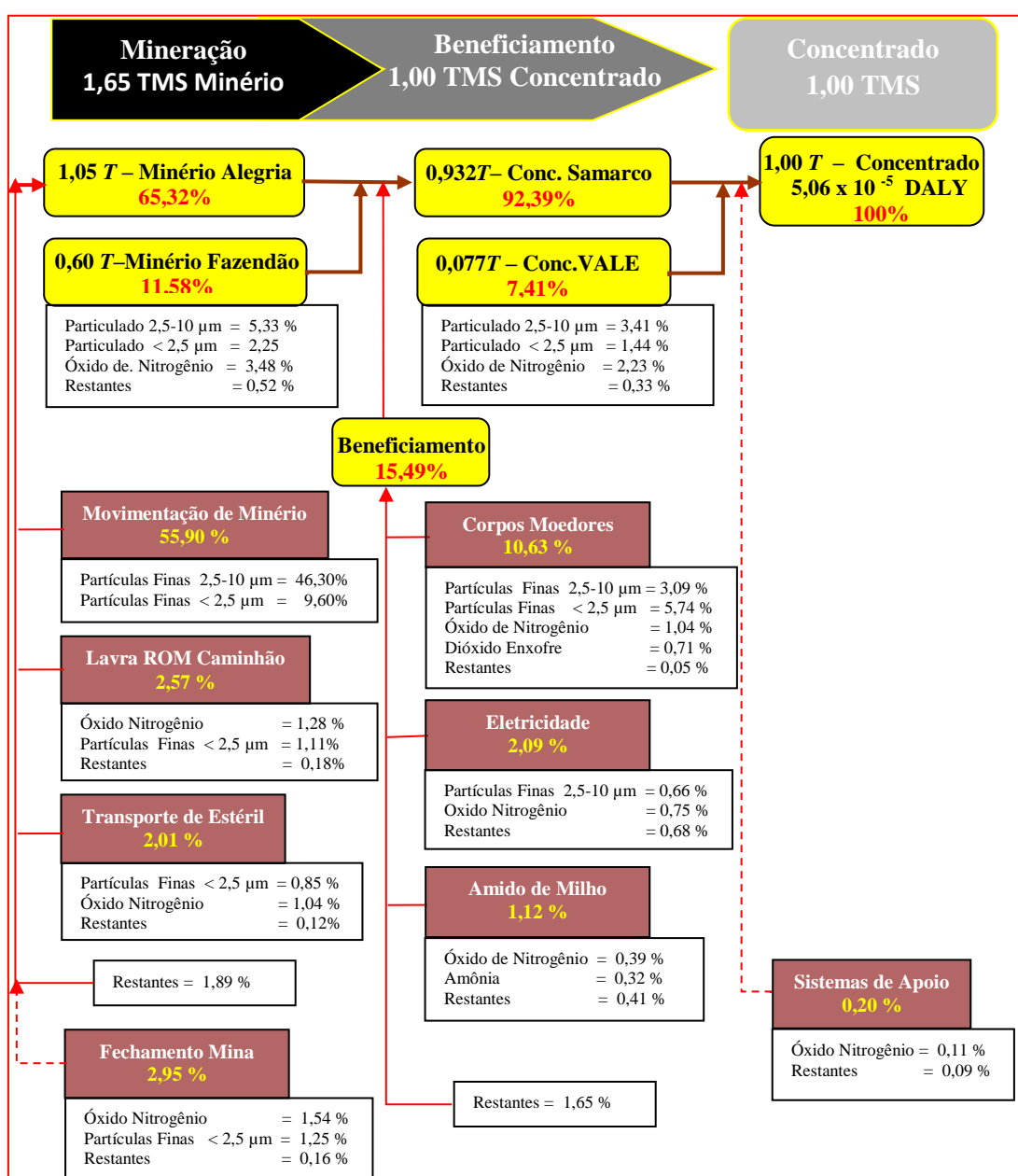


Figura 5.1 Fluxograma mostrando a descrição dos impactos à Saúde Humana referentes à emissão de substâncias Inorgânicas Inaláveis.

O gráfico da **Figura 5.2** apresenta estes mesmos resultados em termos de porcentagem de participação de cada substância do total do Impacto ($5,06 \times 10^{-5}$ DALY / Ton. minério).

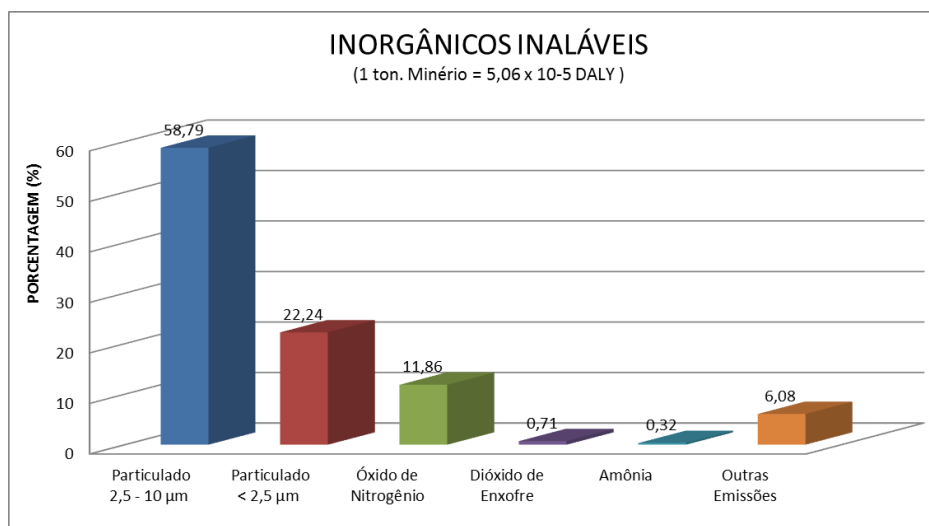


Figura 5.2 Gráfico em barras mostrando a contribuição das diversas substâncias inorgânicas inaláveis para o Impacto total.

Como pode ser visto na **Figura 5.2**, o conjunto das emissões de partículas finas inaláveis: **PM-10** (partículas com diâmetro equivalente inferior a $10\mu\text{m}$) e **PM-2,5** (partículas com diâmetro equivalente inferior a $2,5\mu\text{m}$) é o principal aspecto responsável por este impacto correspondendo a 81% do mesmo. O impacto relativo às partículas finas inaláveis decorrente das atividades de lavra apresenta-se como o maior contribuinte para este aspecto (66,69%), onde a movimentação do minério/estéril (desmonte e escavação) corresponde a cerca de 56% do impacto total. Salienta-se que este impacto trás em seu bojo a influência dos minérios provenientes da mina Fazendão (11,58%) e do concentrado VALE (7,41%), ambos adquiridos junto a terceiros e estão contabilizados como insumos, ou seja, processos *background* do sistema da Samarco. Considerando a localização da Samarco, e o fato de que a metodologia do Eco-indicator 99 não faz distinção entre área urbana e rural, esta limitação do modelo de avaliação de impactos utilizado pode ser responsável pela obtenção de um valor superestimado. Entre os insumos usados no beneficiamento do minério, a maior contribuição para este impacto vem dos Corpos Moedores (Bolas de Moinhos) que contribuem com cerca de 10% do impacto total, com relevante participação das partículas finas inaláveis (8,83%)

neste resultado. Este impacto ocorre durante os processos de fabricação dos corpos moedores (processos *background*), ou seja, anteriormente ao processo em estudo.

Outro importante aspecto deste impacto são os Óxidos de Nitrogênio que, embora se apresentem dispersos por todos os sistemas contribuintes, totalizam mais de 11% do impacto. Estes óxidos são provenientes da queima de combustíveis utilizados ao longo de todo o ciclo de vida considerado como o diesel (nas atividades de lavra, fechamento de mina e sistemas de apoio), gás natural e biomassas (na produção de corpos moedores e na geração da eletricidade) (**Tabela 5.2**).

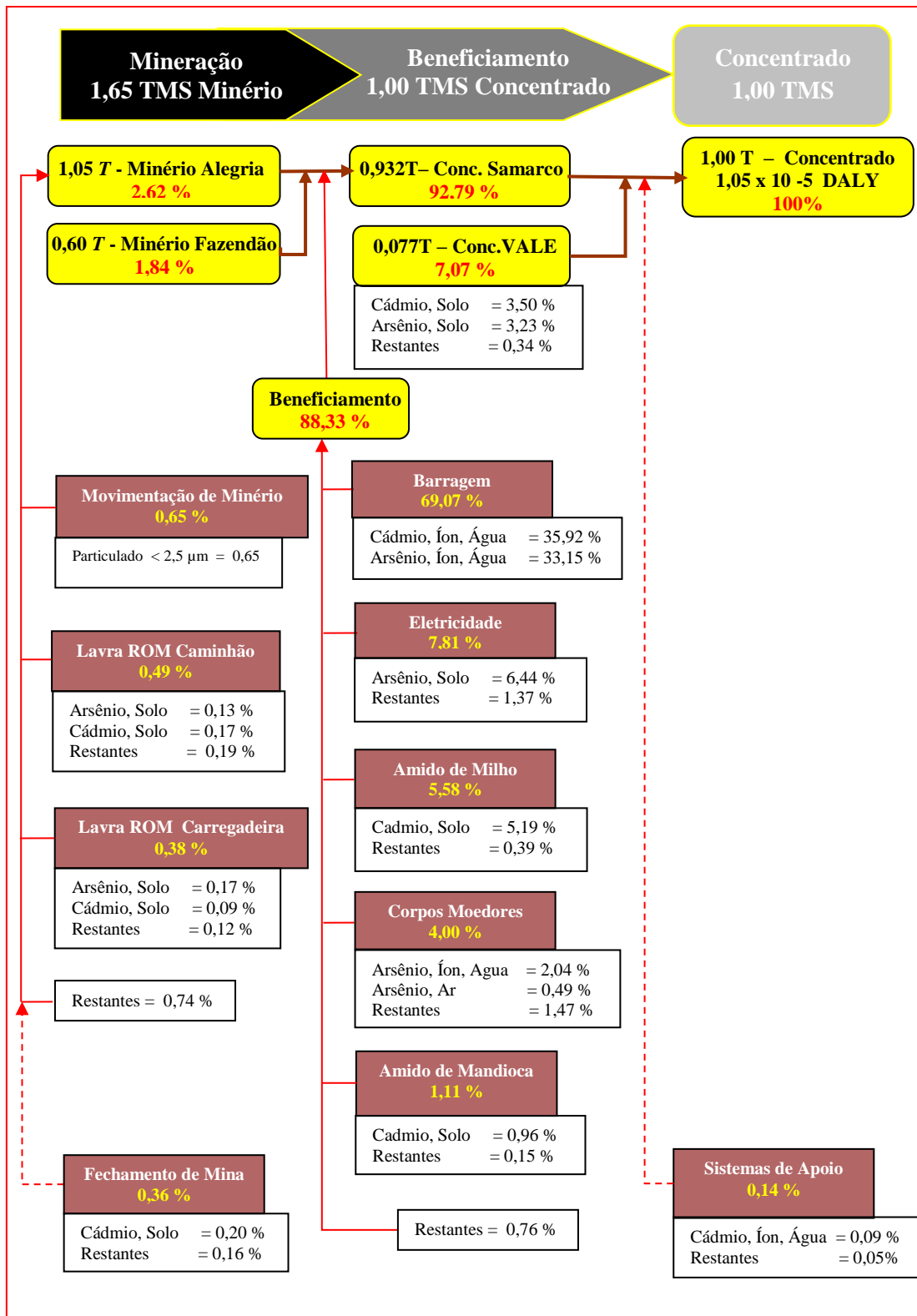
TABELA 5.2 MIX de Produção da Energia Elétrica Brasileira
MIX DA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

FONTES	% PARTICIPAÇÃO
Hidroelétrica	83,8
Gás Natural	4,7
Biomassa	3,4
Óleo Combustível e Diesel	2,9
Nuclear	2,5
Carvão	1,6
Gases Industriais	1,2
Eólica	0

Fonte: Ecoinvent V.2.0 *apud* GEOKLOCK, 2011, p.94 (Adaptado)

5.1.1.2 Impacto: Emissão de Substâncias Carcinogênicas (DALY)

A **Figura 5.3** apresenta os principais elementos carcinogênicos que podem ser emitidos nos processos de produção do concentrado de minério de ferro da Samarco. O total do impacto medido pelo método do Eco-indicator 99, para cada tonelada de Concentrado produzida, é de $1,05 \times 10^{-5}$ DALY.



Figuras 5.3 Fluxograma mostrando a descrição dos impactos à Saúde Humana referentes à emissão de substâncias Carcinogênicas.

O gráfico da **Figura 5.4** apresenta estes mesmos resultados explicitando a contribuição (%) de cada elemento para o total deste impacto ($1,05 \times 10^{-5}$ DALY).

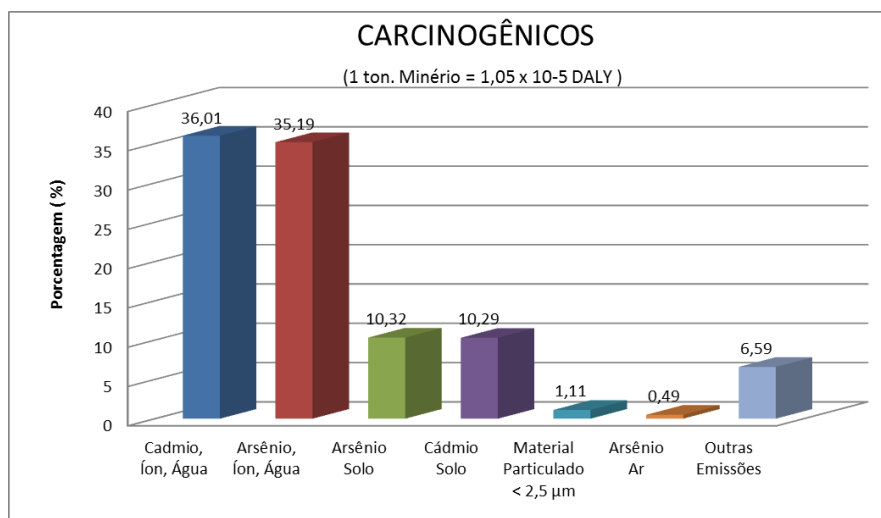


Figura 5.4 Gráfico em barras mostrando a contribuição para a Categoria de Impacto das substâncias carcinogênicas presentes nas emissões para o ambiente durante a produção de minério.

As barragens são apontadas como sendo o processo mais relevante no que toca as substâncias carcinogênicas, por conterem Cádmiio e Arsênio em sua forma iônica, advindos do corpo moedor utilizado no processo de moagem (69% do total - **Figura 5.3**). Trata-se na realidade de um modelo conservador, pois estes elementos não são encontrados nas análises de água descartada da barragem, fruto do Sistema de Gestão Ambiental da Samarco. Não obstante, os elementos são entradas do sistema e precisam ser considerados como saída. Estes elementos provavelmente estão ligados no rejeito ou no concentrado, ambos produzidos na etapa de concentração, pois o desgaste do corpo moedor é mecânico e não há ataque químico, conseqüentemente não existindo a possibilidade destes elementos serem lixiviados. Mas não há análises que comprovem esta dedução, portanto, à título de conservadorismo, optou-se por considerar todo o potencial de impacto sendo alocado às barragens, e conseqüentemente, seus efluentes. Vale ressaltar ainda que, mesmo com esta abordagem conservadora, este impacto se mostrou bastante baixo.

Nas atividades de lavra e de fechamento de mina, arsênio e cádmio aparecem na forma elementar como contaminação do solo, isto pode ser entendido como geração de

resíduos nos processos de ciclo de vida dos equipamentos móveis (metalurgia - processos *background*).

Nos demais insumos, eletricidade (Arsênio para o solo: 6,44%), amido de milho (Cádmio para o solo: 5,19%) e amido de mandioca (Arsênio na forma iônica para a água: 2,04% e Arsênio para o solo: 0,49%), o modelamento feito através do Eco-indicator 99, mapeou o cádmio e arsênio emitidos através do uso de fertilizantes (usados na produção de insumos de origem vegetal) e do consumo de energia elétrica (utilizando a biomassa em sua geração).

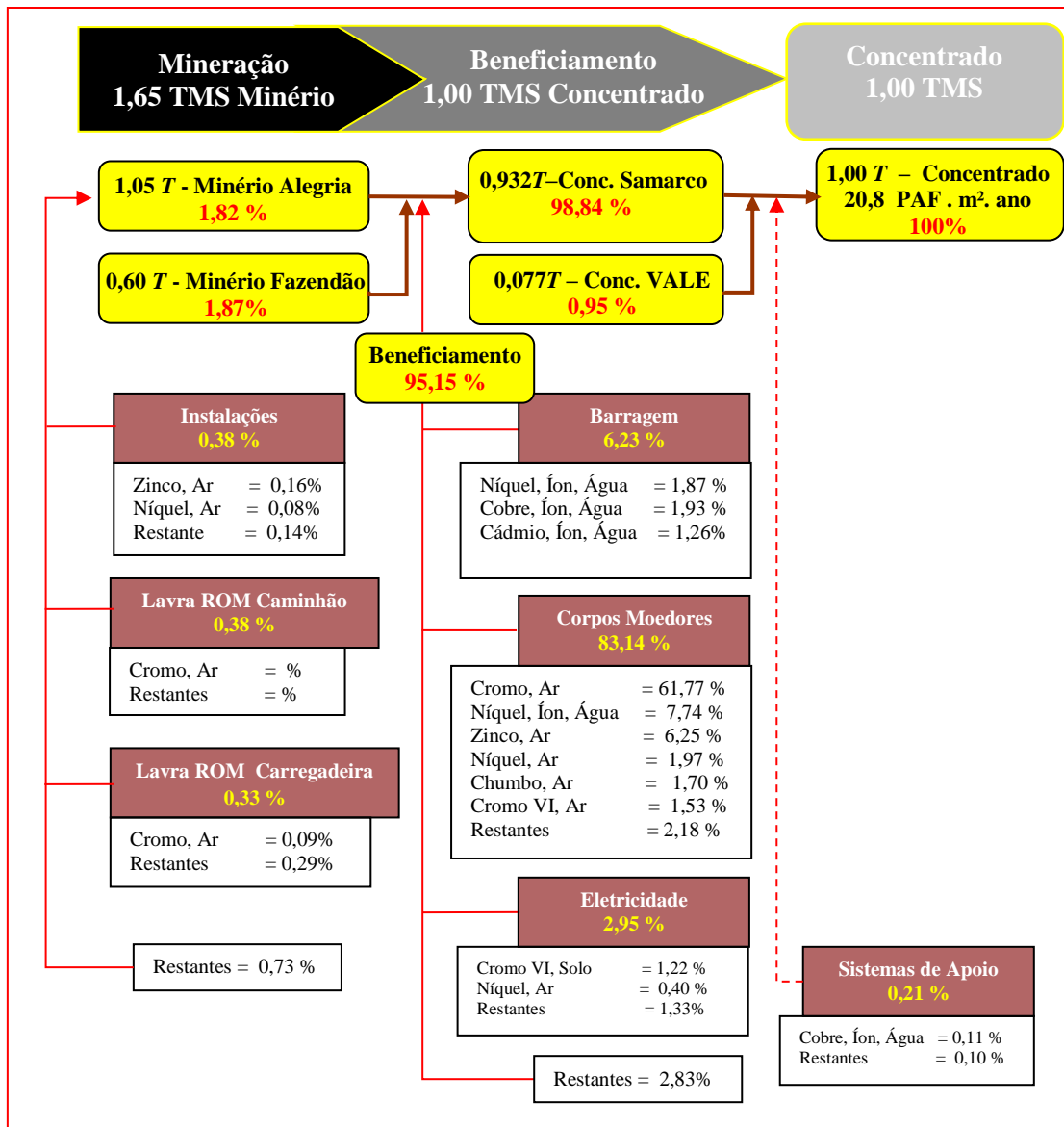
O efeito carcinogênico do material particulado oriundo da lavra do minério possui baixa relevância quando comparado com os demais processos, em especial com os insumos do Beneficiamento.

5.1.2. Categoria de Impacto: Danos à Qualidade dos Ecossistemas.

Nesta Categoria de Impacto serão comentados os resultados relativos à “Ecotoxicidade Ambiental” e “Uso do Solo”.

5.1.2.1. Impacto: Ecotoxicidade Ambiental (PAF . m² . ano)

A **Figura 5.5** mostra o potencial de toxicidade dos elementos da fauna e flora terrestres e aquáticas, devido à emissão de metais pesados para o solo, para a água e para o ar. Este impacto foi quantificado, em 20,8 PAF x m² x ano.



Figuras 5.5 Fluxograma mostrando a descrição dos impactos à Qualidade do Ecosistema referentes à Ecotoxicidade.

O gráfico da **Figura 5.6** apresenta estes mesmos resultados explicitando a contribuição de cada metal pesado (%) para o impacto total da Categoria (20,8 PAF x m² x ano).

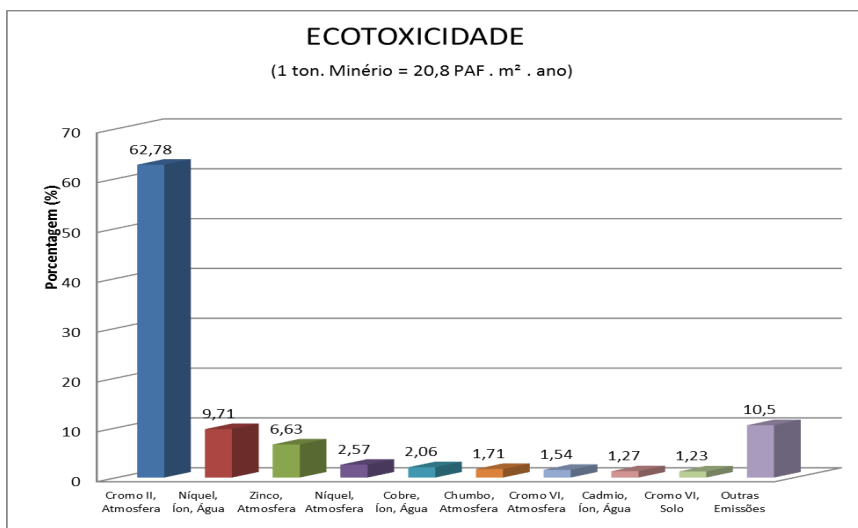


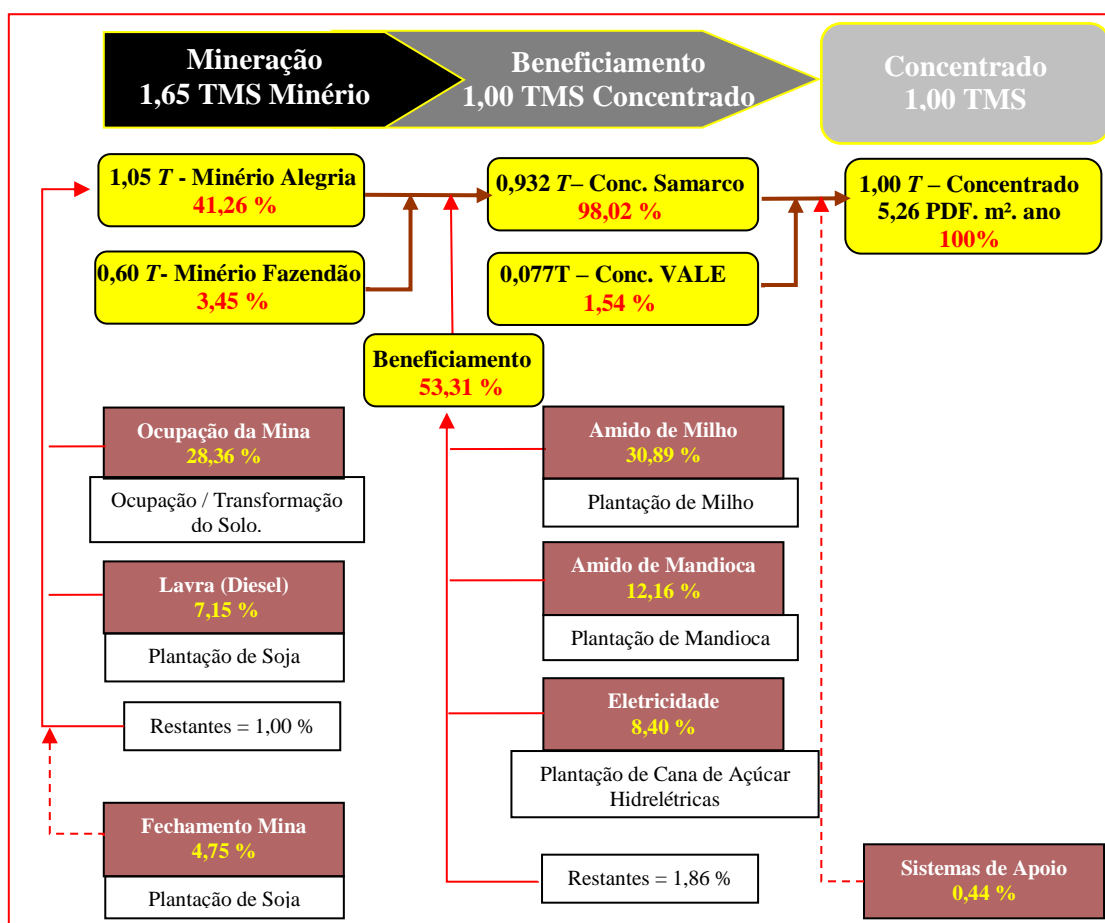
Figura 5.6 Gráfico em barras mostrando a contribuição para a Categoria de Impacto de Ecotoxicidade das substâncias presentes nas emissões para o ambiente durante a produção de minério.

O maior responsável por este valor são os corpos moedores, que contribuem ao longo do seu ciclo de vida com mais de 83% do impacto total (20,8 PAF x m² x ano / ton. de minério).

Dentre as atividades da SAMARCO, as barragens são indicadas como os maiores contribuintes dos impactos relacionados à disposição em água dos íons cobre, níquel, cádmio, contabilizando em torno de 6% do impacto total. Aqui se faz a mesma observação levantada no item anterior (5.1.1.2). De fato, estes elementos não são encontrados nas análises dos efluentes descartados das barragens, obtidas através do Sistema de Gestão Ambiental da Samarco. E pela mesma justificativa, de que não existem análises destes elementos no rejeito ou no concentrado, e portanto não é possível afirmar que eles estão precipitados junto a qualquer destes produtos, optou-se de maneira conservadora por considerar que todo o impacto potencial advindo destes produtos na categoria Ecotoxicidade, alocando estes elementos na forma de íons disponíveis na barragem.

5.1.2.2. Impacto: Uso do Solo (PDF x m² x ano)

A **Figura 5.7** mostra o impacto causado pela transformação e ocupação do solo na área da empresa. Este impacto foi quantificado em 5,26 PDF x m² x ano.



Figuras 5.7 Fluxograma mostrando a descrição dos impactos à Qualidade do Ecosistema referentes ao Uso do Solo.

O gráfico da **Figura 5.8** apresenta estes mesmos resultados explicitando a contribuição de cada atividade produtiva (%) para o impacto total da Categoria (5,26 PDF x m² x ano).

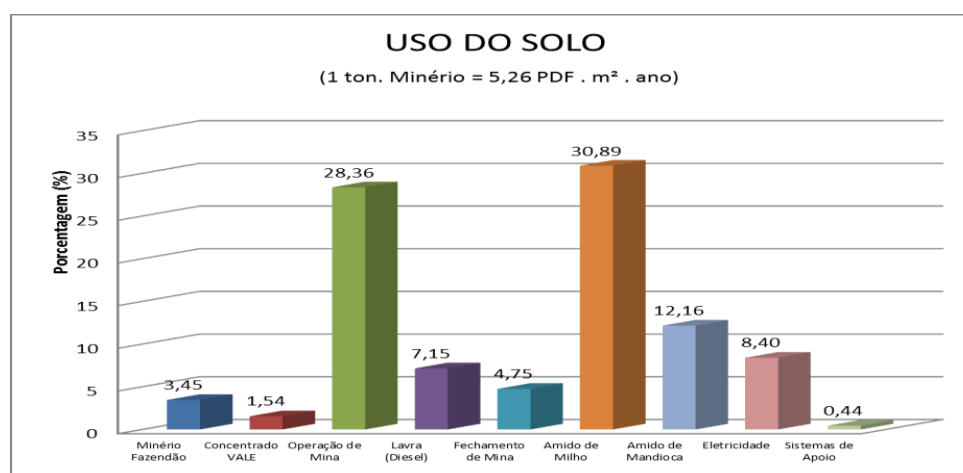


Gráfico 5.8 Gráfico em barras mostrando a contribuição das atividade empresa, bem como as atividades de produção de insumos, para a Categoria de Impacto de Uso do Solo.

O uso do solo deve ser avaliado com a ressalva de que os modelos utilizados neste trabalho não foram elaborados para representar de maneira fidedigna os ecossistemas característicos da América do Sul, inclusive os do Brasil. Não obstante a relevância desta limitação, o resultado apresentado na **Figura 5.8**, mostra que a maior parte deste impacto está atrelada aos insumos (51,45% do impacto total), que são provenientes de atividades agrícolas relacionadas à produção dos amidos de milho e de mandioca, e, portanto, fora dos processos desenvolvidos diretamente pela empresa.

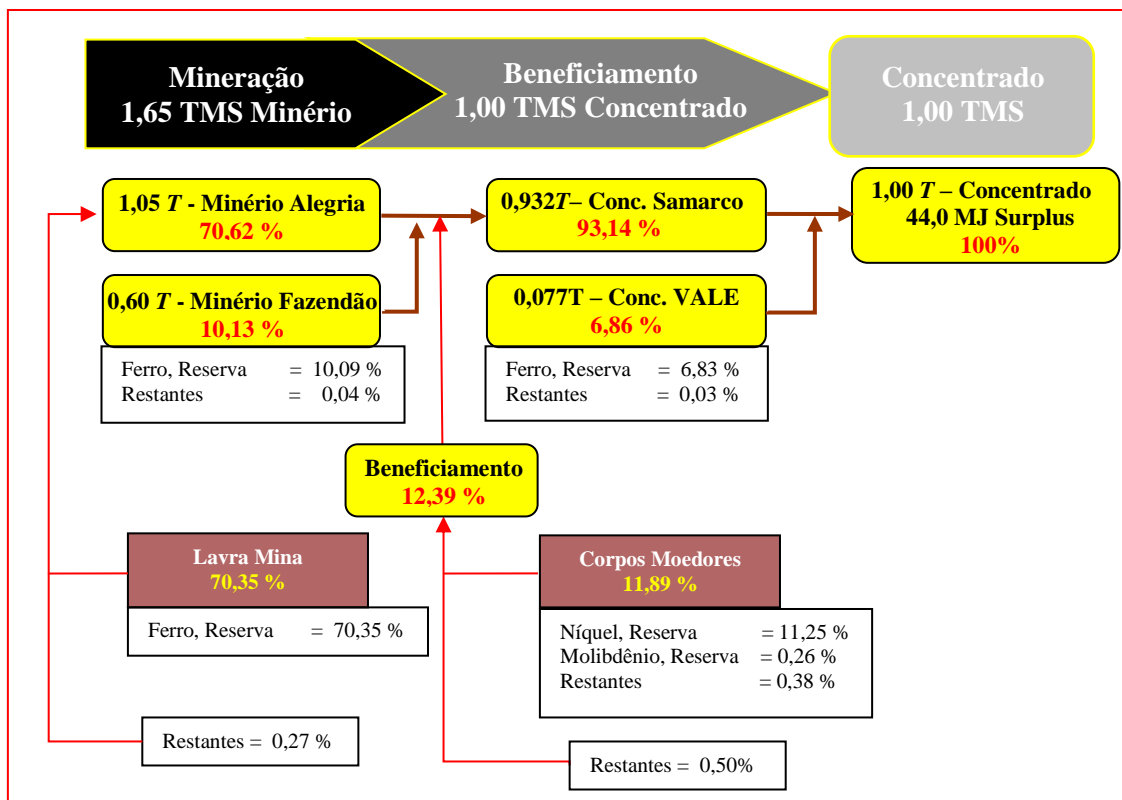
A atividade de mineração responde por 44,71% deste impacto, relacionados à transformação do solo de um estado inicial em sua área natural para o estado atual de área de mineração e industrial, e sua ocupação durante o tempo de atividade da empresa. Os impactos ligados ao consumo de diesel referem-se à mistura de 5% de biodiesel no diesel combustível. O biodiesel é um combustível renovável e, no Brasil, é basicamente derivado do óleo de soja, que, por se tratar de uma atividade agrícola, reflete nos impactos do uso do solo. O mesmo ocorre na eletricidade consumida, composta em sua maior parte de fontes hidrelétricas (**Tabela 5.2**), que apresenta a transformação e ocupação de grandes áreas para a instalação de usinas, sendo um contribuinte importante para os impactos de uso do solo.

5.1.3. Categoria de Impacto: Esgotamento dos Recursos Naturais.

Nesta Categoria de Impacto serão comentados os resultados relativos ao “Consumo de Recursos Minerais” e aos “Combustíveis Fósseis”.

5.1.3.1. Impacto: Consumo de Recursos Minerais (MJ Surplus)

A **Figura 5.9** apresenta os processos e os principais impactos sobre o esgotamento de recursos minerais. Este impacto foi quantificado em 44,0 MJ *Surplus*.



Figuras 5.9 Fluxograma mostrando a descrição dos impactos aos Recursos Naturais referentes ao Esgotamento de Recursos Minerais.

O gráfico da **Figura 5.10** apresenta estes mesmos resultados explicitando a contribuição de cada processo de extração mineral (%) para o impacto total da Categoria (44,0 MJ Surplus).

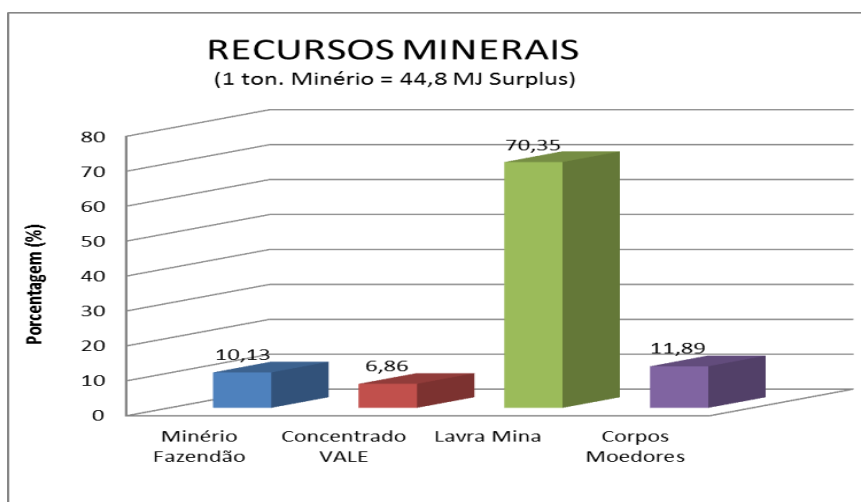


Gráfico 5.10 Gráfico em barras mostrando a contribuição dos processos de extração mineral para a Categoria de Impacto de Esgotamento de Recursos Naturais.

Em relação aos impactos relacionados ao esgotamento de recursos minerais, espera-se que a principal contribuição esteja relacionada à atividade de extração de minério de ferro propriamente dita. De fato, isto pode ser verificado, pois este aspecto contribui com cerca de 80% do total. Sendo 70% devido ao minério Samarco e outros 10 % em função do minério adquirido de terceiros (Mina de Fazendão – VALE). Embora numericamente menor, a participação do níquel neste aspecto, contribuindo com 11% do impacto total, deve ser salientada. O níquel entra no processo estudado pela sua participação na composição dos corpos moedores que são insumos do processo de beneficiamento do minério de ferro. Sua importância aqui se deve ao fato de que apenas uma pequena quantidade de níquel que está presente nos corpos moedores utilizada para a produção de uma grande quantidade de minério de ferro. Este fato é mostrado na **Tabela 5.3**, que apresenta dados de energia excedente necessária para a extração de minério de vários metais. Pela metodologia utilizada, esta relação é de 0,051 MJ *Surplus* para o ferro e 23,75 MJ *Surplus* para o níquel, ou seja, o impacto do níquel é 465 vezes maior que o impacto do ferro.

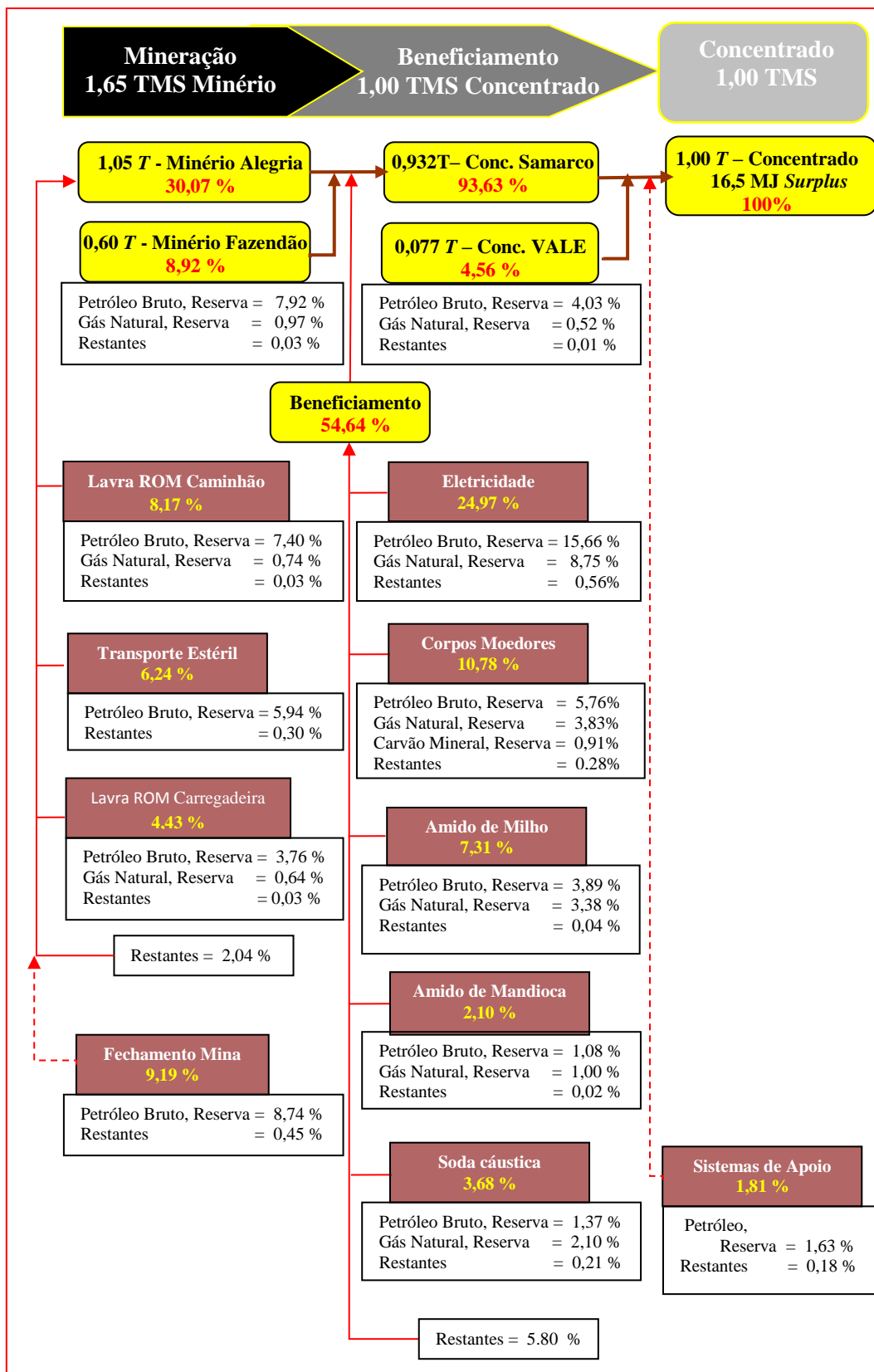
TABELA 5.3 Valores da Energia Excedente Necessária para vários minérios.

ENERGIA EXCEDENTE NECESSÁRIA (MJ/kg)			
Minério	Energia Média Excedente por kg de Metal	Concentração do Minério	Energia Média Excedente por kg de Minério Extraído
Alumínio	2,38	0,21	0,5
Cromo	0,917	0,3	0,275
Cobre	36,7	0,011	0,415
Ferro	0,051	0,57	0,029
Níquel	23,75	0,015	0,356
Estanho	600	0,0001	0,06
Zinco	4,09	0,04	0,164

(Fonte: Extraído de Ecoindicator 99 *apud* GEOKLOCK, 2011, p.91)

5.1.3.2. Impacto: Consumo de Combustíveis Fósseis (MJ *Surplus*)

A **Figura 5.11** apresenta os processos e os principais impactos sobre o esgotamento de recursos energéticos de origem fóssil. Este impacto foi quantificado em 16,5 MJ *Surplus*.



Figuras 5.11 Fluxograma mostrando a descrição dos impactos aos Recursos Naturais referentes ao Consumo de Combustíveis Fósseis.

O gráfico da **Figura 5.12** apresenta estes mesmos resultados explicitando a contribuição (%) do consumo de combustíveis fósseis de cada processo de extração mineral e de produção dos insumos utilizados, para o impacto total da Categoria (16,5 MJ *Surplus*).

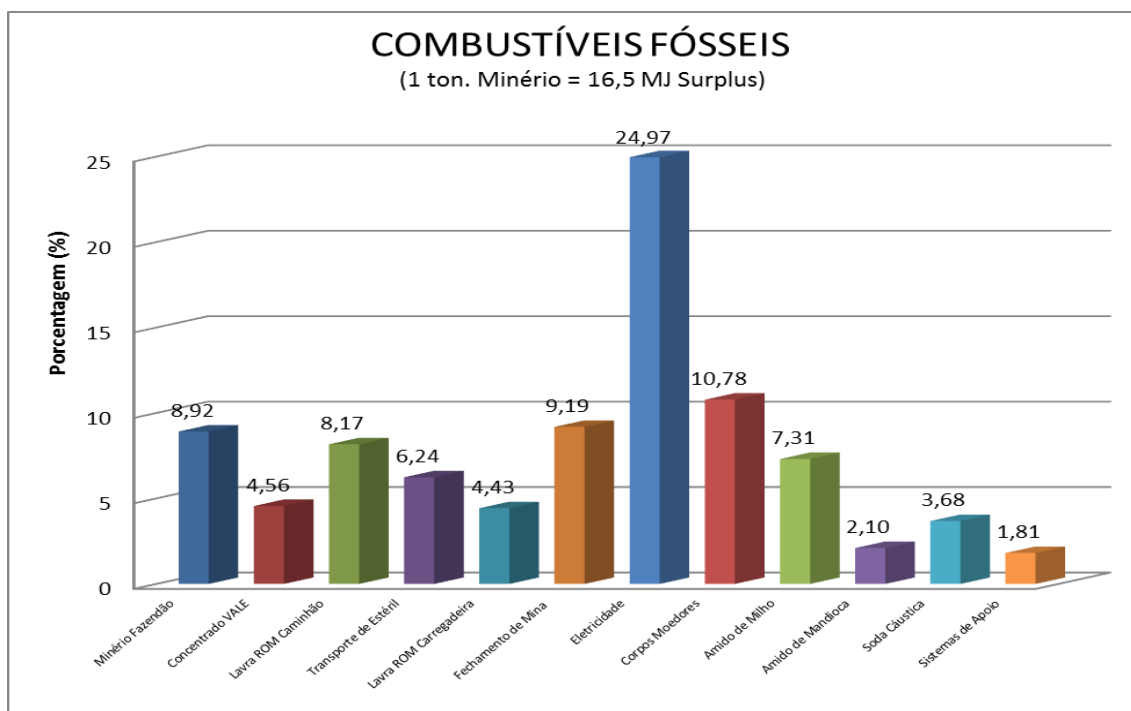


Figura 5.12 Contribuição para a Categoria de Impacto de Esgotamento de Recursos Energéticos de origem fóssil relativa aos consumos de Combustíveis Fósseis nos processos de produção de minério e dos insumos utilizados.

O gráfico sugere que o impacto sobre o esgotamento de combustíveis fósseis recebe contribuições de praticamente todos os processos envolvidos, tanto os da Samarco, como dos processos de produção dos insumos (processos *background*). Isto deve ser esperado uma vez que uma característica de qualquer processo industrial é a demanda por energia, seja ela na forma de gás natural, diesel ou outro óleo combustível e, principalmente, eletricidade.

O consumo de eletricidade no processo em estudo foi um dos aspectos de maior relevância com relação ao esgotamento de combustíveis fósseis contribuindo com aproximadamente 25% do total impacto. Este dado merece alguma crítica, pois, foi elaborado através de uma metodologia que se baseou em bancos de dados originários de indústrias, em sua maioria, localizadas nas Europa, portanto consumindo eletricidade com uma forte dependência dos combustíveis fósseis na sua produção. Como a eletricidade brasileira é produzida predominantemente por usinas hidroelétricas é de se

esperar que o processo em estudo apresente um desempenho real muito mais positivo em relação a este impacto.

Somando-se o impacto relativo ao consumo de diesel nas etapas de lavra (Fazendão, Transporte de Estéreo e Lavra por Caminhões e Carregadeiras) totaliza-se quase 34% do impacto sobre o esgotamento de Combustíveis Fósseis, sendo este na realidade o seu maior contribuinte.

Os insumos usados no processo de beneficiamento do minério contribuem com quase 24% do total de impacto desta Categoria, com destaque para os corpos moedores, seguido pelo Amido de Milho e de Mandioca e pela Soda Cáustica. O consumo de combustíveis fósseis nestes insumos é resultante de processos *background*, ou seja, na produção e transporte destes produtos até a Samarco.

5.1.4. Impactos sobre as **Mudanças Climáticas**

Nesta Categoria de Impacto serão comentados os resultados relativos às emissões de Gases de Efeito Estufa.

Em função da importância atual dos impactos sobre as mudanças climáticas adotou-se, alternativamente, o método do IPCC-2007 para o detalhamento dos impactos relativos às emissões dos gases de efeitos estufa (**Tabela 5.4**).

Tabela 5.4 Resultados dos Danos associados às Mudanças Climática pelo Método IPCC-2007 100 anos.

Mudanças Climáticas	P/ 1,00 TMS Conc
Emissões Gases de Efeito Estufa	13,32 kgCO₂ eq

A **Figura 5.13** mostra os resultados do Impacto de **Emissões de Gases de Efeito Estufa**, pelo Método IPCC, obtidos para cada Elemento do Processo. Este impacto foi quantificado em 13,32 kgCO₂ eq .

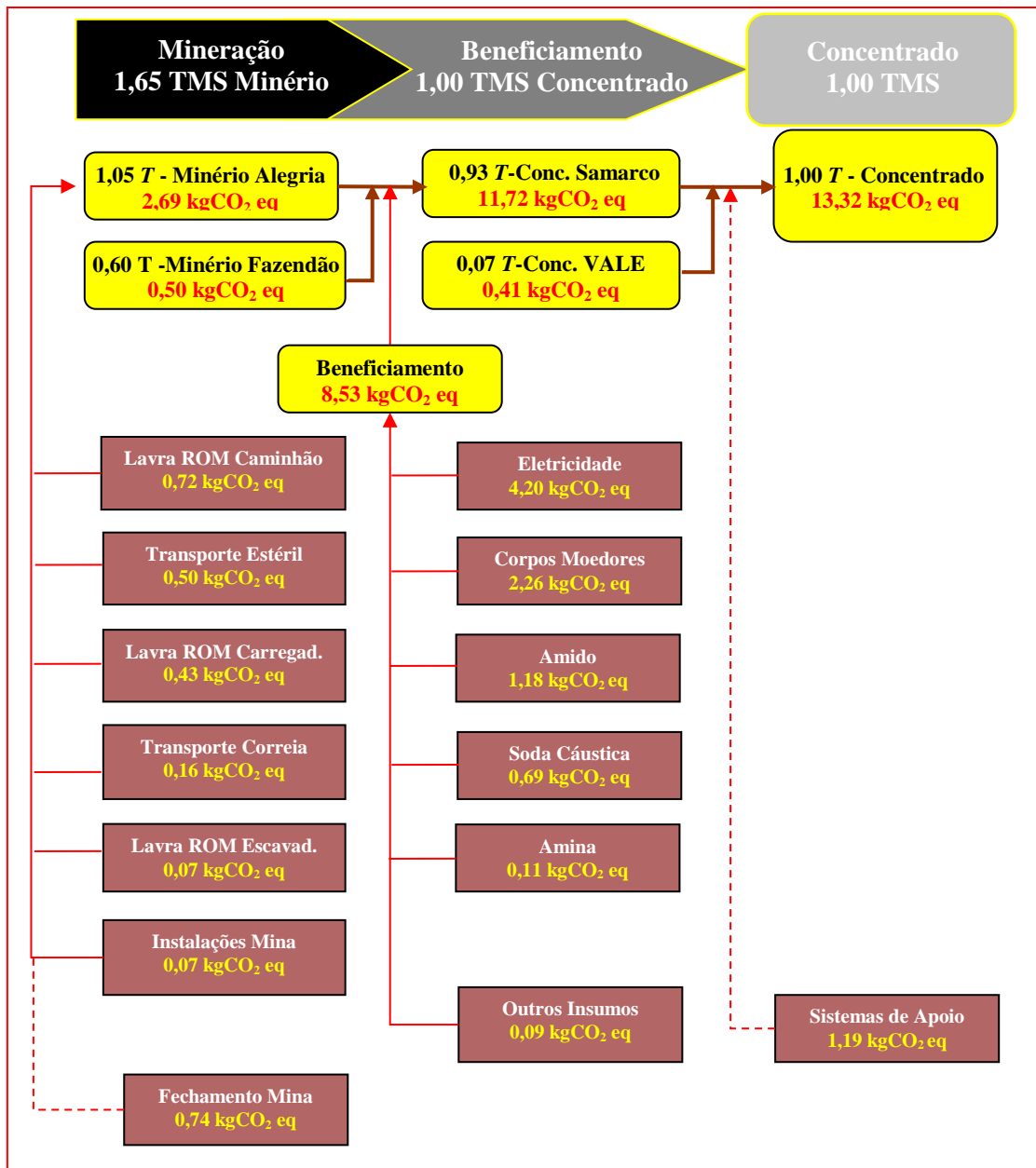


Figura 5.13 Fluxograma mostrando a descrição dos impactos sobre o Aquecimento Global referentes à Emissão de Gases de Efeito Estufa.

O gráfico da **Figura 5.14** apresenta estes mesmos resultados explicitando a contribuição (%) da queima de combustíveis de cada processo de produção do minério e de produção dos insumos utilizados, para o impacto total da Categoria (13,32 kgCO₂ eq).

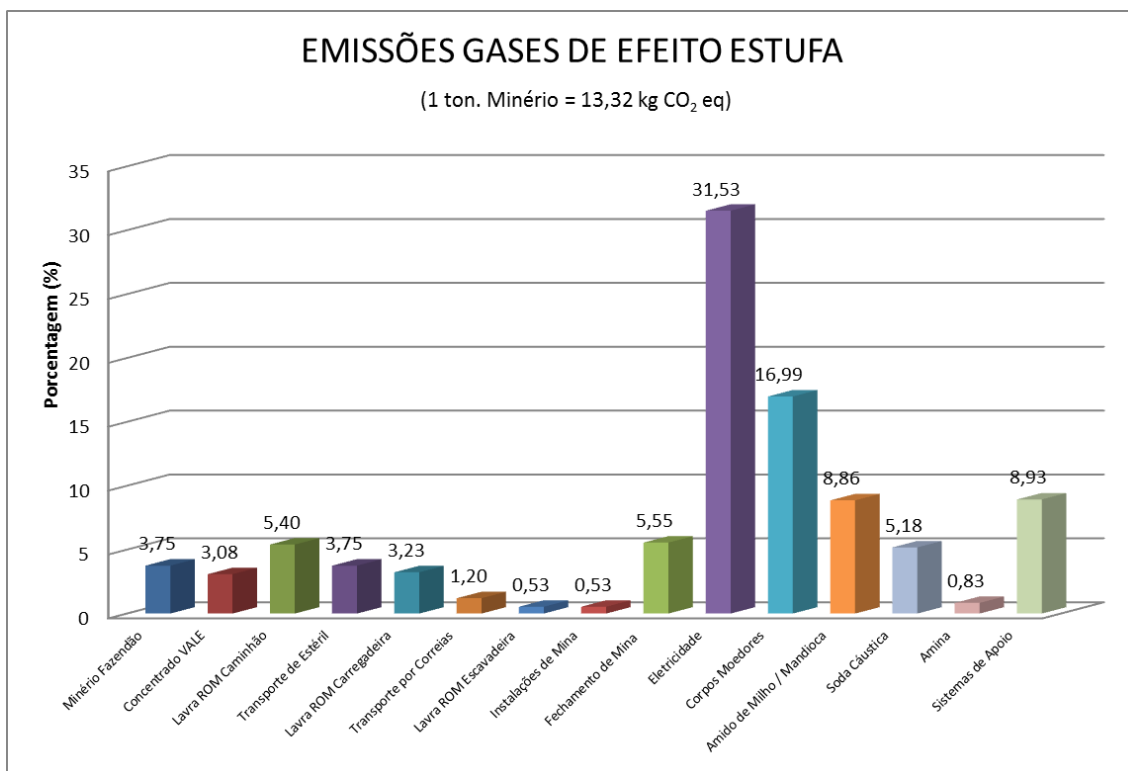


Gráfico 5.14 Gráfico em barras mostrando a contribuição para a Categoria de Impacto de Emissões de Gases de Efeito Estufa relativa à queima de Combustíveis nos processos de produção de minério e na produção dos insumos utilizados.

Uma análise destas emissões mostra que os maiores responsáveis são os processos *background*, externos à empresa. Assim, as contribuições mais significativas para este impacto vêm dos insumos, totalizando 8,53 kgCO₂ eq (64% do total), com destaque para a produção da eletricidade consumida no processo responsável por quase a metade da quantidade emitida por todos os insumos. A explicação para este fato é que parte desta eletricidade advém da queima de combustíveis fósseis (Gás Natural, Óleo Diesel e Carvão) e de biomassa, que tem origem na cana-de-açúcar. Ou seja, utiliza-se o bagaço da cana para a geração de energia elétrica, com emissões devido ao seu transporte e queima.

A produção dos corpos moedores é o segundo maior contribuinte seguido dos insumos usados no beneficiamento do minério: Amido, Soda Caustica e Amina.

Destes dados pode-se extrair que as emissões de GEE, devido aos processos exclusivos da empresa, ficam em torno de 5 kgCO₂ eq, valor que é confirmado por estudos específicos de emissões de carbono feitos recentemente para a produção da Samarco.

5.2. Comparação de Resultados

A seguir serão apresentados os resultados de estudos de ACV retirados da literatura, para diversos processos de mineração buscando uma comparação com os impactos da produção da Samarco alcançados pelo presente trabalho. A **Tabela 5.5** mostra a grande diversidade que a apresentação de resultados de um estudo de ACV pode ter. Isto vai depender, basicamente, do método usado e do objetivo de cada estudo. Assim pode-se observar que a maioria dos estudos apresentados tem um interesse específico em consumo de água, consumo de energia (eletricidade e combustíveis) e contribuição para o aquecimento global. A tabela mostra ainda a carência de estudos específicos para a produção de minério de ferro. Neste caso, apenas NORGATE e HAQUE (2010) incluíram em seu trabalho o estudo sobre este tipo de processo além dos minérios de Alumínio (bauxita) e de Cobre, sendo que no caso deste último, o estudo vai além dos processos de mineração e apresenta resultados para a produção de concentrado. Entretanto, seus resultados mostram que seu objetivo era verificar o consumo de água (que não está na Tabela 5.5), consumo de combustíveis usados como fonte da energia para a produção (por isso o indicador de categoria usado é MJ/tonelada de minério produzida - Método CML) e as emissões de GEE. Destes apenas as emissões de GEE nos oferece uma comparação direta com a produção da Samarco, já que o presente estudo trata dos impactos sobre a disponibilidade dos combustíveis fósseis (Esgotamento de Recursos Naturais) sendo adotado o indicador de categoria proposto pelo Método Eco-indicator 99, que é: MJ-Surplus/tonelada de minério produzida. Este indicador de impacto se baseia no conceito de “energia excedente”, ou seja, a quantidade “a mais” de energia em relação ao que é gasto hoje, que será necessário para extrair no futuro a mesma quantidade de um determinado recurso (Capítulo 4).

Nesta comparação pode-se observar uma coerência entre os resultados de emissões de GEE, ou seja: Samarco com 13,5 kg CO₂ eq/ tonelada de Concentrado de minério de ferro e o estudo de NORGATE e HAQUE (2010) com 11,9 kg CO₂-eq/tonelada de Minério de ferro lavrado. Praticamente, os dois estudos apresentaram o mesmo resultado, podendo a pequena diferença ser explicada pelo fato de que o estudo da Samarco envolveu também os processos de concentração do minério.

Tabela 5.5 Comparação dos Resultados do estudo de ACV da SAMARCO com outros estudos similares disponíveis na bibliografia consultada.

CATEGORIA DE IMPACTO	REFERÊNCIA	UNIDADE FUNCIONAL	SAMARCO Mina céu aberto (Brasil)	DITSELE, 2010 Mina céu aberto (EUA)	VALDERRAMA et al., 2012 (ESPAÑA)	MUDD, 2007 (EUA, Aus., A.S., Bra., Can.)	MANGENA e BRENT, 2006 (África do Sul)				NORGATE e HAQUE, 2010 (Austrália)			NORTHEY et al., 2013 (Aus./Chi./Peru/Arg./Laos/PNG/ Afr.Sul/Tur./Fin./EUA/Can.)	
							1 TONELADA CARVÃO /Jazida Céu aberto / Baixo Teor)	1 TONELADA CARVÃO /Jazida Céu aberto / Alto Teor)	1 TONELADA CARVÃO /Jazida Subterrâneas / Baixo Teor)	1 TONELADA CARVÃO /Jazida Subterrâneas / Alto Teor)	1 tonelada Minério de FERRO	1 tonelada Minério de BAUXITA	1 tonelada Concentrado de COBRE	1 TONELADA de COBRE Produzida (Minério 3%)	1 TONELADA de COBRE Produzida (Minério 2%)
SAÚDE HUMANA	Inorgânicos Inaláveis		$5,06 \times 10^{-5}$ DALY	-	$2,90 \times 10^{-7}$ DALY	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Substâncias Carcinogênicas		$1,05 \times 10^{-8}$ DALY	-	$0,130 \times 10^{-7}$ DALY	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ecotoxicidade		20,8 PAF . m ² .ano	-	0,033 PAF.m ² .ano	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
QUALIDADE ECOSISTEMA	Uso do Solo		5,26 PDF . m ² .ano	6,7 m ² .ano	6,19 PDF.m ² .ano	-	1,83 m ²	3,10 m ²	7,93 m ²	1,55 m ²	-	-	-	-	-
	Recursos Mineralis		44,8 MJ Surplus	8,41 Kg Sb eq	$3,11 \times 10^3$ MJ Surplus	-	46,4 MJ	125,4 MJ	84,6 MJ	80,9 MJ	-	-	-	-	-
RECURSOS NATURAIS	Combustíveis Fósseis		16,5 MJ Surplus	124,1 MJ	842×10^3 MJ Surplus	311,0 MJ	-	-	-	-	152,7 MJ	54,9 MJ	8329,0 MJ	33000 MJ	64000 MJ
aquecimento GLOBAL	Emissões de Gases de Efeito Estufa		13,32 kg CO ₂ eq	62,2 kg CO ₂ eq	-	21,7 kg CO ₂ eq	8,4 kg CO ₂ eq	19,6 kg CO ₂ eq	32,2 kg CO ₂ eq	18,8 kg CO ₂ eq	11,9 kg CO ₂ eq	4,9 kg CO ₂ eq	628,2 kg CO ₂ eq	3300 kg CO ₂ eq	6200 kg CO ₂ eq

A Tabela 5.5 mostra também que o estudo de VALDERRAMA *et al.* (2012) apresentou seus resultados nos mesmos indicadores de categoria que o presente estudo. Apenas não foi computado o resultado de emissões de GEE porque naquele estudo este impacto foi associado à Saúde Humana e não ao Aquecimento Global (Naquele estudo usou-se o método CML). Por se tratar de produção de cimento pouco se pode esperar numa comparação de resultados com a produção de minério de ferro. Entretanto, alguns resultados mostram uma lógica, por exemplo: Uso do Solo e Combustíveis Fósseis. Quanto ao uso do solo, os dois processos se comportam de maneira similar, ou seja, ambos têm grande associação deste impacto com a movimentação de terras e a ocupação de grandes áreas com a atividade de lavra. Assim, nota-se que os resultados são bastante similares. Quanto ao impacto sobre os combustíveis fósseis era de se esperar um valor bem maior para a produção de cimento, já que nos seus processos, além da lavra (semelhante ao minério de ferro) foi incluída também a etapa de queima do “clinker” em grandes fornos com alto consumo de combustíveis.

O Uso do Solo, como impacto ambiental foi destacado nos estudos de DITSELE (2010) (em uma mina de carvão nos EUA) e MANGENA e BRENT (2006) (em minas de carvão da África do Sul). Isto é bem sintomático, pois, da mesma forma que os processos de produção de minério de ferro, a produção de carvão também se destaca pela ocupação e transformação de grandes áreas pela operação de lavra. Pelo fato de se ter usado uma unidade diferente naquele estudo (*área.ano/produção* de carvão) uma comparação de resultado do impacto sobre o uso do solo com o presente trabalho estudo fica prejudicada. Os estudos pesquisados se orientaram apenas pela ocupação do solo em relação à produção anual de carvão. Já o presente estudo mostrou uma unidade mais abrangente (*PDF.m².ano/produção* de minério) que leva em conta não só a ocupação da área mas também a transformação do solo, conforme descrito no capítulo 4 deste trabalho.

Completam o quadro da Tabela 5.5 os resultados apresentados nos estudos de MUDD (2007) e NORTHEY *et al.* (2013), ambos retratando a atividade mineração. MUDD (2007) estudou várias minas de ouro nos EUA, Austrália, África do Sul, Brasil e Canadá. Seus resultados mostram dados médios da produção nestes países. Já o trabalho de NORTHEY *et al.* (2013) apresentou um estudo da produção de minério de cobre em dez países (Austrália, Chile, Peru, Argentina, Laos, Papua Nova Guiné, África do Sul, Finlândia, EUA e Canadá). Os resultados apresentados se referem à média global dos impactos, levando-se em conta duas qualidades de minério com teores de 2% e de 3%

Cu). Ambos os estudos se detiveram em estabelecer os impactos referentes à energia gasta e às emissões de GEE dos seus processos. Nos dois casos não houve uma comparação clara destes impactos para a produção de concentrado de minério, mas mostram a diversidade de formas em que o mesmo impacto pode ser descrito em diferentes estudos de ACV.

6. Considerações Gerais e Conclusão

Através da revisão de literatura realizada para a composição deste texto, observou-se que os trabalhos de ACV publicados no Brasil têm cunho acadêmico, dedicado a formação de banco de dados, em sua maioria. Os trabalhos que foram além do ICV tiveram objetivo de comparação entre processos. No presente trabalho, no entanto, o objetivo foi utilizar a ferramenta da ACV incorporada a um sistema de gestão ambiental para avaliar a eficiência do processo industrial à luz dos seus aspectos e impactos. Desta maneira, este trabalho serve de exemplo de aplicação prática desta ferramenta em um sistema de gestão ambiental de uma empresa.

6.1. Considerações Gerais

A partir dos resultados obtidos, algumas considerações merecem destaque:

- O uso de correias transportadoras de acionamento elétrico se mostrou mais eficiente do que o transporte por caminhões a diesel, no que toca os impactos referentes a “mudanças climáticas” (Figuras 5.13 e 5.14). O uso de caminhões foi responsável por 88% do total deste impacto devido ao transporte de minério e estéril. Ressalta-se que todo o transporte de minério entre a frente de lavra e as usina de beneficiamento é feita exclusivamente por correias de acionamento elétrico.
- A avaliação dos impactos identificou os corpos moedores como contribuintes importantes em diferentes categorias, tais como “inorgânicas inaláveis” com 10,63%, “ecotoxicidade”: 83,14%, “esgotamento de recursos minerais”: 11,89% e “esgotamento de combustíveis fósseis”: 10,78%. Portanto, a análise do ciclo de vida do minério de ferro, nos mostra que este insumo é de primordial importância para orientar a gestão ambiental da empresa.
- O consumo de diesel nos equipamentos utilizados nas atividades de lavra e de fechamento de mina se apresenta como a principal fonte do impacto sobre o esgotamento de combustíveis fósseis com cerca de 34% do total do impacto (Figuras 5.11 e 5.12).
- Os resultados obtidos para os impactos sobre o Uso do Solo (Figuras 5.7 e 5.8) mostram que a contribuição para este impacto devido área de cultivo do solo requisitada para a obtenção de alguns dos insumos, a exemplo do amido

proveniente de plantações de milho e de mandioca, além da eletricidade proveniente, em parte, de plantações de cana de açúcar, é mais significativa que a contribuição dos impactos de uso e transformação da área necessária para lavra de minério e barragens de disposição de rejeito. Esta é uma constatação que vem contra o senso comum pois as grandes áreas transformadas pelas minerações são o aspecto que mais chama atenção das pessoas. Portanto, observa-se que muitas vezes a utilização racional de insumos no processo pode significar muito mais para a conservação do meio ambiente do que a limitação da própria produção. Este conhecimento permite-nos ver com clareza que o conceito de eco eficiência propaga os benefícios ambientais para toda a cadeia à montante do processo analisado.

- Os resultados de impacto sobre o esgotamento de recursos minerais, como era de se esperar, mostraram que o seu maior contribuinte são as atividades de lavra com de 81% do total do impacto. No entanto, uma avaliação mais cuidadosa destes resultados nos mostra que a participação do Níquel é de 11,25% do impacto total. O Níquel entra em pequena proporção na composição dos corpos moedores usados na etapa de moagem no processo de beneficiamento do minério de ferro. No entanto, a Tabela 5.3, da página 99 (Capítulo 5), mostra que a energia excedente necessária para a extração do minério de Níquel é 465 vezes maior do que a energia excedente necessária para a extração do Minério de Ferro. Portanto, embora seja numericamente menor (11,25%) o impacto devido à extração do Níquel pode representar muito mais para o esgotamento deste minério do que o valor numericamente maior (81%) em relação à extração do minério de ferro.

6.2. Conclusão

O estudo foi conduzido segundo os protocolos ISO da série 14040 e o ICV foi elaborado a partir de dados diretos do processo, e somente onde estes dados não estavam disponíveis, lançou-se mão de inventários “padrão” construídos a partir de estudos diversos em nível internacional (Ecoinvent v2.0). Finalmente utilizou-se a metodologia de AICV (Eco-indicator 99) e uma ferramenta computacional (SimaPro 7), ambas amplamente utilizadas em nações onde a ACV já está relativamente dominada. A

elaboração das planilhas com os dados da Samarco e sua utilização nos *softwares* citados, bem como a emissão dos relatórios de impactos foram realizados pela empresa de Consultoria GEOKLOCK, através de um contrato de consultoria com a Samarco.

A norma ISO apresentou-se bastante assertiva e de fácil compreensão, mostrando-se um bom caminho para a iniciação do tema. A parceria formada com a GEOKLOCK possibilitou a utilização de ferramentas computacionais como o Ecoindicator 99, o Simapro 7 e o Ecoinvent v2.0. Ficou claro que seria muito difícil o desenvolvimento deste trabalho até a sua configuração final sem o auxílio destas ferramentas.

A interpretação geral do trabalho pode implicar em orientações mais diretas à organização, como por exemplo, a verificação de que o uso de correia transportadoras de acionamento elétrico se mostrou mais eficiente do que o transporte por caminhões a diesel, no que toca os impactos referentes a mudanças climáticas.

Uma grande contribuição deste trabalho para a Samarco foi ampliar o horizonte de visão do processo de cada gerência (processos unitários) relacionado ao SGA da empresa. A partir de alguns resultados, observa-se como a mineração pode influenciar na cadeia de produção de seus insumos estabelecendo pela demanda, uma pressão sobre os impactos associados a esta cadeia. Os insumos usados no beneficiamento de minério, por exemplo, apresentam contribuições destacadas para a Categoria de impacto “Danos à Qualidade Ambiental” tanto para a ecotoxicidade Ambiental como para o uso e transformação do solo.

Como apresentado no Capítulo 4, a quantidade de diesel utilizado para produzir 1 TMS de concentrado de minério é relativamente pequena (0,21 kg diesel/TMS de Minério - Tabela 4.6). Mas, quando se avalia este impacto em relação a “depleção de combustíveis fósseis” e ao “esgotamento de recursos minerais”, é esperado que a dificuldade futura de se obter o combustível fóssil seja crescentemente mais intensiva em energia do que para a extração do minério de ferro.

Ainda com relação ao consumo de diesel nos equipamentos móveis de mineração constatou-se que este é o principal responsável pelas emissões de gases de efeito estufa. Isto poderia sugerir a adoção de um combustível com maior participação de biodiesel em sua composição, como uma alternativa com vistas à minimização dos impactos sobre as “mudanças climáticas” e sobre o “esgotamento de combustíveis fósseis”. Entretanto, esta análise deve ser realizada com critério, pois, uma vez que o combustível de origem vegetal (biodiesel) apresenta outros impactos ligados às plantações de culturas extensivas (soja) como, por exemplo, “uso do solo” e “emissões de substâncias

carcinogênicas”, estes aspectos se tornariam mais presentes, podendo modificar os cálculos finais destes impactos.

Destaque deve ser dado ao corpo moedor, insumo do processo de beneficiamento do minério (moagem do minério). Ele apareceu com relativo destaque em quase todas as categorias de impacto consideradas. Tome-se como exemplo o aspecto de “Emissão de Substâncias Carcinogênicas”. É observado e acompanhado pela ACV que este aspecto está alocado prioritariamente na Barragem, entretanto, os elementos responsáveis pela contaminação são totalmente advindos dos corpos moedores (na etapa de moagem). Este é um indicativo de que, do ponto de vista ambiental, este insumo deve ser priorizado em projetos de otimização dos processos industriais ou em atividades de pesquisa de novos fornecedores.

Este estudo pode ainda fornecer subsídios iniciais para o posterior trabalho de formação de um banco de dados nacional sobre os impactos ambientais da produção de minério de ferro para utilização em trabalhos de ACV de produtos. Espera-se que ele venha ajudar na divulgação da metodologia de ACV contribuindo assim com o seu desenvolvimento e conhecimento no âmbito nacional.

Os objetivos traçados no início deste trabalho podem ser considerados atingidos, uma vez que se avaliaram os potenciais impactos causados pelas atividades da empresa. A análise dos impactos ambientais baseada na Avaliação do Ciclo de Vida do minério mostrou-se uma metodologia bastante útil, uma vez que promoveu a identificação, dentro das categorias de impacto escolhidas, das emissões com potencial de danos ambientais e em que partes do processo elas são geradas.

A utilização da metodologia da ACV forneceu uma avaliação quantitativa dos principais impactos ambientais gerados ao longo do ciclo de vida do minério da Samarco, permitindo conhecer o comportamento ambiental de cada unidade de processo e principalmente das cargas ambientais trazidas dos ciclos de vida dos insumos e equipamentos.

Diante disso, recomenda-se que a metodologia de ACV seja adotada pela empresa como parte do seu Sistema de Gestão Ambiental, devendo a metodologia de ACV ser estendida às demais unidades industriais. Este estudo deve ser repetido periodicamente, não só para avaliação do desempenho ambiental da empresa, mas, principalmente, para ser usado como um dos fatores de decisão na escolha de novos processos e aprovação de novos insumos e/ou fornecedores.

7. Referências Bibliográficas

- ABNT – NBR ISO 14040 – **Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de Vida – Princípios e Estrutura** – International Organization for Standardization (1997) – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001) – Norma Brasileira – Rio de Janeiro – **2001**. 10p.
- ABNT – NBR ISO 14040 – **Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de Vida – Princípios e Estrutura** – International Organization for Standardization (2006) – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009) – Norma Brasileira – Rio de Janeiro – **2009**. 21p.
- ABNT – NBR ISO 14064 – **Gases de Efeito Estufa – Partes 1, 2 e 3** – International Organization for Standardization (2006) – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007) – Norma Brasileira – Rio de Janeiro – Confirmada em **2010**. 20p.
- AKATU – **Os Jovens e o Consumo Sustentável** - Pesquisa do PNUMA/UNESCO apresentada durante o Workshop do PNUMA sobre Consumo Sustentável para a América Latina e Caribe realizado em São Paulo, Brasil, em 12 e 13 de novembro de **2001**- 44p.
<http://www.akatu.org.br/Content/Akatu/Arquivos/file/Publicacoes/26/PesquisaJovemConsumoSustentavel.pdf> . Acesso em 13/02/2012.
- AKCIL, Ata; KOLDAS, Soner - **Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies** - www.elsevier.com/locate/jclepro - Journal of Cleaner Production 14 (**2006**), p.1139-1145.
- ALVES, André Naves – **Histórico e Importância da Mineração no Estado** – In: Revista do Legislativo - Assembleia Legislativa de Minas Gerais - Nº 41, Janeiro/Dezembro (**2008**), p. 27 -32.
- ARCELOR MITTAL – **História da Siderurgia – Primeira Fábrica de Ferro** – Arcelor Mittal – **2013** – Disponível no site: https://www.belgo.com.br/historia_siderurgia. Em: 10/12/2013.
- ANTAQ - **Boletim Anual de Movimentação de Cargas – 2012 – Análise da Movimentação de Cargas nos Portos Organizados e Terminais de Uso Privado** - Agência Nacional de Transportes Aquaviários-ANTAQ - Brasília – **2013**. 23p.
www.antaq.gov.br/boletimportuario. Acesso em: 15/04/2013.
- BARBOSA-JUNIOR, Afonso Frazão; MORAIS, Rafael Meirade; MERENCIANO, Sebastião Virgínio; PIMENTA, Handson Cláudio Dias; GOUVINHAS, Reidson Pereira - **Conceitos e Aplicação de ACV no Brasil** – XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP – Foz do Iguaçu – PR – **2007**. 9p.
- BLENGINI, Gian Andrea; GARBARINO, Elena; SOLAR, Slavko; SHIELDS, Deborah J.; HÁMOR, Tamás; VINAI, Raffaele; AGIOUTANTIS, Zacharias - **Life Cycle Assessment Guidelines for the Sustainable Production and**

Recycling of Aggregates: The Sustainable Aggregates Resource Management Project (SARMa) - SciVerse ScienceDirect - [www.elsevier.com/ locate/jclepro](http://www.elsevier.com/locate/jclepro) - Journal of Cleaner Production 27 (2012), p. 177-181.

BORMA, Laura DeSimone; SOARES, Paulo Sergio Moreira – **Drenagem Ácida e Gestão de Resíduos Sólidos de Mineração** - In: Gestão e Planejamento Ambiental na Mineração – p. 243 – 266 - LNCC/CETEM/MCT - Rio de Janeiro – 2002.

BRINO, Henrique Robert de Herdani; FRANCISCO, Antônio Carlos de; PIEKARSKI, Cassiano Moro; da LUZ, Leila Mendes; ZOCHE, Lidiana – **Avaliação do Ciclo de Vida: Métodos para AICV** – Congresso Internacional de Administração - Gestão Estratégica: Empreendedorismo e Sustentabilidade - UTFPR - Ponta Grossa - PR - 2012. 10p.

CAMARGO, André Moreira, **Inventário do Ciclo de Vida do Metanol para as Condições Brasileiras** – Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica – USP – São Paulo – 2007. 118 p.

CASTRO, Paulo de Tarso Amorim; NALINI JUNIOR, Hermínio Árias; LIMA, Hernani Mota de – **Entendendo a Mineração no Quadrilátero Ferrífero** – *Understanding Mining Around the Quadrilátero Ferrífero* – Edição Bilingue – UFOP / Revista Ecológico - Belo Horizonte – 2011. 89p.

CHEHEBE, José Ribamar. **Análise do Ciclo de Vida de Produtos – Ferramenta Gerencial da ISO 14000**. Rio de Janeiro: Editora: Qualitymark, 2ª Edição - 2002. 104p.

CHEN, Bo; YANG, Jian-xin; OUYANG, Zhi-yun – **Life Cycle Assessment of Internal Recycling Options of Steel Slag in Chinese Iron and Steel Industry** – State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China – Journal of Iron and Steel Research, International, Volume 18, Issue 7 (2011), p. 33-40. <http://www.sciencedirect.com>.

DA LUZ, Adão Benvindo; Sampaio, João Alves; Almeida, Salvador L. M; Editores - **Tratamento de Minérios** – 4ª Edição - CETEM-MCT – Rio de Janeiro – 2004. 867p.

DITSELE, Ofentse – **Application of Life Cycle Assessment to Estimate Environmental Impacts of Surface Coal Mining** – Faculty of Graduate School of the Missouri University of Science and Technology – Missouri – USA – 2010. 253 p.

DNPM – **Sumário Mineral 2012**. LIMA, Thiers Miniz; NEVES, Carlos Augusto Ramos (Coordenadores). – Departamento Nacional de Produção Mineral - <http://www.dnpm.gov.br> - Home Page visitada em 04/06/2013 – Brasília - 2012.

DURUCAN, Sevket; KORRE, Anna; MUNOZ-MELENDZ, Gabriela - **Mining Life Cycle Modelling: a Cradle-to-Gate Approach to Environmental Management**

in the Minerals Industry - Environmental Processes and Systems Research Group - Department of Environmental Science and Technology - Imperial College - Royal School of Mines Building - Journal of Cleaner Production 14 (2006), p.1057e1070 - www.elsevier.com/locate/jclepro .

ENRIQUEZ, Maria Amélia - **Mineração Maldição ou Dádiva? Os Dilemas do Desenvolvimento Sustentável a partir de uma Base Mineira** – Signus Editora – São Paulo – 2008. 396p.

FERREIRA, José Vicente Rodrigues – **Análise de Ciclo de Vida dos Produtos** – IPV – Instituto Politécnico de Viseu – Campus Politécnico – 3504-510 – VISEU – Portugal – 2004. 80p.

FERREIRA, Sander Renato Lara – **Pensamento do Ciclo de Vida como suporte a gestão dos resíduos sólidos da construção e demolição: exemplo do Distrito Federal e estudos de casos de sucesso no Brasil e no mundo** – Dissertação de Mestrado – Centro de desenvolvimento Sustentável – CDS – UnB – Brasília – 2009. 192 p.

FINNVEDEN, Goran; HAUSCHILD, Michael Z.; EKVALL, Tomas; GUINÉE, Jeroen; HEIJUNGS, Reinout; HELLWEG, Stefanie; KOEHLER, Annette; PENNINGTON, David; SUH, Sangwon – **Recent Developments in Life Cycle Assessment** – Division of Environmental Strategies Research – Department of Urban Planning and Environment, School of Architecture and the Built Environment, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden - Journal of Environmental Management 91 (2009), p. 1–21.

FRISCHKNECHT, Rolf ; JUNGBLUTH, Niels (Editors) – **Overview and Methodology – Ecoinvent Report No. 1** – Swiss Centre for Life Cycle Inventories – Swiss Federal Offices – Dübendorf, The Switzerland. 2007. 77p.

GEOKLOCK - **Aplicação da Ferramenta de ACV para Avaliação de Impactos e Criação de Indicadores de Eficiência Ambiental e Produtiva** - Relatório Final - SP/P5190/R0098/2011-Rev.04 – GEOKLOCK Consultoria e Engenharia Ambiental Ltda. - São Paulo – SP – Outubro - 2011. 99p.

GOEDKOOP, Mark; SPRIENSMA, Renilde - **The Eco-indicator 99 – A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment** – Pré Consultants B.V. – Third Edition - Ploterweg 12, 3821 BB Amerfoort – The Netherlands – 2001. 144p.

GOEDKOOP, Mark; SCHRYVER, An de; OELE, Michiel; DURKSZ, Spike; de ROEST, Douwe - **Introduction to LCA with SimaPro 7** - Pré Consultants – Netherlands - 2010. 86p.

GOMES, Laurentino – **1808: como uma rainha louca, um príncipe medroso e uma corte corrupta enganaram Napoleão e mudaram a História de Portugal e do Brasil** - Editora Planeta do Brasil, São Paulo - 2007. 367p.

- GONZALEZ-GARCIA, Sara; LOZANO, Raúl García; BUYO, Pablo; PASCUAL, Rosario Castilla; GABARRELL, Xavier; RIERADEVALL i PONS, Joan; MOREIRA, M. Teresa; FEIJOO, Gumersindo - **Eco-innovation of a Wooden Based Modular Social Playground: Application of LCA and DfE Methodologies** - www.elsevier.com - Journal of Cleaner Production 27 (2012), p. 21-31.
- GUINÉE, J. B. , UDO de HAES, H.A.; HUPPES, G. - **Quantitative life cycle assessment of products** – Centre of Environmental Science, Leiden University, Leiden, The Netherlands – Journal of Cleaner Production, Vol.1, Issue 1(1993), p.3-13. www.sciencedirect.com.
- HOLTEN, Birgitte; STERLL, Michael; RIBEIRO-VAZ, Luiz Paulo (tradução) – **Peter Lund e as Grutas Com Ossos em Lagoa Santa** –Título original: P.W. Lund og knokkelhulerne i Lagoa Santa - Statens Naturhistoriske Museum, Dinamarca – 2010. Editora UFMG – Belo Horizonte – 2011. 336p.
- HOUGHTON, J. T.; JENKINS, G. J.; EPHRAUMS, J. J.- **Climate Change: The IPCC Scientific Assessment** – Intergovernmental Panel on Climate Change – Cambridge University Press – UK. 1990. 414p.
- JOHNSON, Timothy Werner - **Comparison of Environmental Impacts of Steel and Concrete as Building Materials Using the Life Cycle Assessment Method** - Department of Civil and Environmental Engineering - Massachusetts Institute of Technology – 2006. 156p.
- JUNGBLUTH, Niels; HISCHIER, Roland – **Eco-indicator 99**. In: HISCHIER, Roland; WEIDEMA, Bo (Editors). **Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods**. Ecoinvent Report No. 3, v2.2. Swiss Center for Life Cycle Inventories, St. Gallen, Switzerland. 2010. Part II, Chapter 4, pp. 46-61.
- JUNGBLUTH, Niels; NEMECEK, Thomas - **IPCC 2001 (climate change)**. In: HISCHIER, Roland; WEIDEMA, Bo (Editors). **Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods**. Ecoinvent Report No. 3, v2.2. Swiss Center for Life Cycle Inventories, St. Gallen, Switzerland. 2010. Part II, Chapter 13, pp.126-135.
- KORONEOS, Christopher J.; NANAKI, Evanthia A. - **Integrated Solid Waste Management and Energy Production - A Life Cycle Assessment Approach: The Case Study of the City of Thessaloniki** – <http://www.sciencedirect.com>. Journal of Cleaner Production 27(2012), p. 141-150.
- LAMOSO, Lisandra Pereira – **A Exploração de Minério de Ferro no Brasil e no Mato Grosso do Sul** – Tese de Doutorado – Departamento de Geografia – Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras – USP – São Paulo – 2001. 309 p.
- LIMA, Ângela Maria Ferreira – **Avaliação do Ciclo de Vida no Brasil: Inserção e Perspectiva** – Dissertação de Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia – Salvador. 2007. 116p.

- LIU Gang e MULLER, Daniel B. - **Addressing Sustainability in the Aluminum Industry: a Critical Review of Life Cycle Assessments** - Industrial Ecology Programme and Department of Hydraulic and Environmental Engineering, Norwegian, University of Science and Technology, S.P. Andersens veg 5, 7491 - Trondheim – Norway. Journal of Cleaner Production 35(2012), p. 108e117. www.elsevier.com.
- MANGENA, S. J; BRENT, A. C. - **Application of a Life Cycle Impact Assessment Framework to evaluate and compare environmental performances with economic values of supplied coal products** - Life Cycle Engineering, Department of Engineering and Technology Management, University of Pretoria, South Africa - Journal of Cleaner Production. Volume 14 - 2006. pp.1071-1084. www.sciencedirect.com.
- MARZULLO, Rita de Cássia Monteiro – **Análise da ecoeficiência dos óleos vegetais da Soja e Palma, visando a produção de biodiesel** – Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da USP – Departamento de Engenharia Química – São Paulo – 2007. 279p.
- MEDEIROS, Silvio – **Aspectos Gerais da Mineração no Brasil Colônia** – Pontifícia Universidade Católica de Campinas - PUC-Campinas – Campinas – SP. 2006. <http://www.recantodasletras.com.br>. - Acesso em: 08/08/2013.
- MHSPE –Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment – **The Eco-indicator 99 – A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment** – Manual for Designers – 2500 EZ The Hague – The Netherlands – 2000. 48p.
- MME – Ministério das Minas e Energia - **Plano Nacional de Mineração 2030 (PNM – 2030)** - Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral – SGM – SCLAR, Claudio (Coordenador do GT) - Esplanada dos Ministérios Bloco U – 4º andar – 70065-900 - <http://www.mme.gov.br> - Home Page Visitada em 31/01/2012 – Brasília – DF – 2011.
- MUDD, Gavin M. – **Global trends in gold mining: Towards quantifying environmental and resource sustainability?** – Department of Civil Engineering, Institute for Sustainable Water Resource, Monash University, Clayton, Victoria, Australia Journal of Resources Policy, 32 (2007), p. 42-56.
- NORGATE, T.; HAQUE, N. - **Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations** - CSIRO Minerals Down Under Flagship, Box 312, Clayton South, Victoria, AUSTRALIA - Journal of Cleaner Production, v.18 (2010) p.266-274.
- NORGATE, T. E.; JAHANSHAH, S.; RANKIN, W. J. - **Assessing the environmental impact of metal production processes** – CSIRO Minerals, Box 312, Clayton, South Victoria 3169, Australia – Journal of Cleaner Production v.15 p.838-848. (2007).

- NORTHEY, S., HAQUE, H., MUDD, G. – **Using sustainability reporting to assess the environmental footprint of copper mining** - Environmental Engineering, Department of Civil Engineering, Monash University, Clayton, Victoria, Australia - <http://www.sciencedirect.com>. - Journal of Cleaner Production, v.40 p.118-128. (2013)
- NUNES, Thales Crivelli. **Análise do Ciclo de Vida do Processo Kraft de fabricação da celulose** - Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal de Viçosa - UFV – Viçosa, Minas Gerais, Brasil - 2007. 40p.
- OMETTO, Aldo Roberto; HAUSCHILD, Michael Zwicky; ROMA, Woodrow Nelson Lopes - **Lifecycle Assessment of Fuel Ethanol from Sugarcane in Brazil** – Department of Production Engineering, School of Engineering in São Carlos, University of São Paulo, São Paulo, Brazil - The International Journal of Life Cycle Assessment 14, Issue 3, (2009) p.236–247. <http://springer.com/article>. Acesso: em 16/05/2013.
- ONU – **Delivering Results in a World of 7 Billion – 2011 Annual Report** - UNFPA – United Nations Population Fund - United Nations – New York, NY – USA – 2012. 42p. <http://www.un.org/en/development/desa/population>. Acesso em: 19/09/2013.
- PIOTTO, Zeila Chittolina - **Eco-eficiência na Indústria de Celulose e Papel - Estudo de Caso**. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2003. 379p.
- PRETTO, Giovanni – **Técnica de Análise do Ciclo de Vida para Gerenciamento Ambiental de Propriedades Produtoras de Suínos** – Tese de “Magister Scientiae” – Programa de Pós-Graduação em Economia Aplicada – UFV – Viçosa – MG – 2003. 141p.
- RAMÍREZ, Paola Karina Sánchez – **Análise de Métodos de Alocação Utilizados em Avaliação do Ciclo de Vida** – Dissertação – Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – Centro Tecnológico – Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis-SC – 2009. 138p.
- REID, Catherine; BÉCAERT, Valérie; AUBERTIN, Michel; ROSENBAUM, Ralph K.; DESCHÊNES, Louise - **Life Cycle Assessment of Mine Tailings Management in Canada** - www.elsevier.com/locate/jclepro. - Journal of Cleaner Production 17 (2009) p.471–479.
- RIBEIRO, Flávio de Miranda, **Inventário de Ciclo de Vida da Geração Hidrelétrica no Brasil** – Dissertação de Mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo -PIPGE/USP- São Paulo – 2003. 456p.
- SAIN - Sociedade Auxiliadora da Indústria Nacional – **Revista Trimestral de História e Geografia ou Jornal do Instituto Histórico e Geográfico Brasileiro** – TOMO QUATRO — Typographia de João Ignacio da Silva, Rio de Janeiro – 1842. Disponível no site: <http://www.google.com.br/books>. - em 10/12/2013.

- SAMARCO MINERAÇÃO S.A. – **RCA/PCA – Relatório e Plano de Controle Ambiental – Complexo Germano** – AMBIO: Geologia e Engenharia Ambiental – Volume 01 de 04 - Texto – Belo Horizonte – MG - **1996**. 95p.
- SAMARCO – **Relatório Anual de Sustentabilidade 2009** – Diretoria Comercial e de Serviços Corporativos/Gerência Geral de Comunicação e Relações Institucionais - Samarco Mineração S.A. - Belo Horizonte – MG – Setembro/**2010**. 124p.
- SAMARCO – **Relatório Anual de Sustentabilidade 2010** – Gerências de Comunicação, de Relações Institucionais e de desenvolvimento Sustentável - Samarco Mineração S.A. - Belo Horizonte – MG – Junho/**2011**. 156p.
- SAMARCO – **Relatório Anual de Sustentabilidade 2011**– Gerência Geral de Comunicação e Comunicação e Desenvolvimento Socioinstitucional - Samarco Mineração S.A. - Belo Horizonte – MG – Junho/**2012**. 109p.
- SAMARCO – **Relatório Anual de Sustentabilidade 2012** – Gerência Geral de Comunicação e Comunicação e Desenvolvimento Socioinstitucional - Samarco Mineração S.A. - Belo Horizonte – MG – Maio/**2013**. 96p.
- SILVA, Juliana Cintra, **Análise do Impacto Ambiental do Processo de Produção de Hidrogênio** – Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP – Campinas –SP – **2005**. 114p.
- SUH, Sangwon e HUPPES, Gjalt - **Methods for Life Cycle Inventory of a product** - Department of Industrial Ecology, Institute of Environmental Sciences (EML), Leiden University, Leiden, The Netherlands - www.elsevier.com/locate/jclepro. - Journal of Cleaner Production 13 (**2005**) – p. 687-697.
- SUPPEN, Nydia; CARRANZA, Mario; HUERTA, Mario; HERNANDES, Mario A. – **Environmental management and life cycle approaches in the Mexican mining industry** - Research Center for Environmental Quality, State of Mexico Campus, Monterrey Tech, Km. 3.5, Carr. Lago de Guadalupe, 52926 Estado de Mexico, Mexico - www.elsevier.com/locate/jclepro. - Journal of Cleaner Production 14 (**2006**) 1101e1115 .
- TAN, Reginald B.H.; KHOO, Hsien, H. - **An LCA study of a primary aluminum supply chain** - Chemical and Environmental Engineering Department, National University of Singapore, Singapore – Journal of Cleaner Production v.13 (**2005**) p.607-618.
- TEIXEIRA,Romeu do Nascimento (Coordenação); DANGELO,Jota; LOBO,Henrique; TEIXEIRA,Edgar N.; OLIVEIRA,Miriam Prado T. de; SANTOS,Elias Botelho Coelho dos. – **O Vale do Rio Doce** – Companhia Vale do Rio Doce – Rio de Janeiro – **2002**. 157p.
- UBALDO, Mariluce de Oliveira; BORMA, Laura DeSimone; BARBOSA, Maria Claudia – **Gestão de Resíduos Sólidos Geradores de Drenagem Ácida de Minas com o Uso de Coberturas Secas** - Série Gestão e Planejamento

Ambiental – Coleção Artigos Técnicos N° 2 – CETEM/MCT – Rio de Janeiro – 2006. 53p.

UNEP – **Background Report for UNEP Guide to Life Cycle Management – Abridge to Sustainable Products** – United Nations Environment Programme – 2006. 108p. <http://www.lifecycleinitiative.org/unep>. Acesso: em 24/09/2012.

UNFPA - **People and possibilities in a world of 7 billions** –United Nations Population Fund - United Nations – New York, NY – USA – 2011. 132p. <http://www.un.org/en/development/desa/population>. - Acesso em: 19/09/2013.

UPADHYAYULA,Venkata K.K.; MEYER,David E. ; CURRAN,Mary Ann ; GONZALEZ,Michael A. - **Life Cycle Assessment as a Tool to Enhance the Environmental Performance of Carbon Nanotube Products: A Review** - SciVerse ScienceDirect - www.elsevier.com/locate/jclepro. - Journal of Cleaner Production 26 (2012) p. 37-47.

VALDERRAMA,César; GRANADOS,Ricard; CORTINA,José Luis; GASOL,Carles M.; GUILLEM,Manel; JOSA,Alejandro - **Implementation of Best Available Techniques in Cement Manufacturing: A Life-Cycle Assessment Study** – www.elsevier.com/locate/jclepro. - Journal of Cleaner Production 25 (2012) – p. 60-67.

VIANA, Marcelo Mendes – **Inventário do Ciclo de Vida do Biodiesel Etílico do Óleo de Girassol** – Dissertação de Mestrado , Escola Politécnica da USP, São Paulo – SP – 2008. 237p.

YELLISHETTY,Mohan; MUDD,Gavin M.; RANJITH,P.G. - **The steel industry, abiotic depletion and life cycle assessment: a real or perceived issue?** - www.elsevier.com/locate/jclepro. - Journal of Cleaner Production 19 (2011) – p. 78-90.

ZACKRISSON, Mats; AVELLÁN, Lars; ORLENIUS, Jessica - **Life Cycle Assessment of Lithium-ion Batteries for Plug-in Hybrid Electric Vehicles - Critical Issues** - www.elsevier.com/locate/jclepro. - Journal of Cleaner Production 18 (2010) – p. 1519-1529.