

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
FACULDADE DE ENGENHARIA, ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PROPOSIÇÃO DE UM MODELO PARA A
AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO NIÓBIO

ADILSON RANGEL ALVES

Orientador: Prof. Dr. Aparecido dos Reis Coutinho

Santa Bárbara d'Oeste, 29/05/2015

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
FACULDADE DE ENGENHARIA, ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PROPOSIÇÃO DE UM MODELO PARA A
AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO NIÓBIO

Adilson Rangel Alves

Orientador: Prof. Dr. Aparecido dos Reis Coutinho

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP.

Santa Bárbara d'Oeste, 29/05/2015

PROPOSIÇÃO DE UM MODELO PARA A AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO NIÓBIO

Adilson Rangel Alves

Prof. Dr. Aparecido dos Reis Coutinho
PPGEP – UNIMEP

Prof. Dr. André Luiz Helleno
PPGEP – UNIMEP

Prof. Dr. Fernando Celso de Campos
PPGEP – UNIMEP

Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho
UNESP – Guaratinguetá-SP

Prof. Dr. Norberto Aranha
UNISO – Sorocaba-SP

Dedico este trabalho ao meu pai Sinval Alves de Melo (in memorian), a quem admirei muito e, com toda sua simplicidade e pouca instrução formal, era de uma inteligência e memória admiráveis. Sempre lembrava-nos que o estudo era o primeiro passo para uma vida digna e que, a herança que ele deixaria para cada filho, era um diploma de graduação.

Também dedico aos meus irmãos José Alves Pereira (Dedé) (in memorian) e Adil Rainier Alves, que fizeram com que a “herança de papai” fosse contemplada aos sete filhos.

Gostaria muito que papai Sinval e Dedé soubessem que adquiri mais um “quinhão” de sua digna herança.

Agradecimentos

Iniciar um doutorado aos 53 anos e passar por este processo intensivo de pesquisa e aprendizado representou um grande desafio e uma experiência muito rica e compensadora.

Ao fim deste trabalho gostaria de externar os meus agradecimentos:

Àqueles que me deram muito amor e compreensão: minha esposa Márcia Regina Faria, meus filhos Sarah Martins de Sousa Rangel Alves e Adilson Rangel Alves Júnior, minha mãe Maria Abadia de Melo, meus irmãos(ãs), sobrinhos (as) e cunhados (as).

A acolhida, incentivo, dedicação e amizade de meu orientador Professor Dr. Aparecido dos Reis Coutinho, e foi o seu apoio que me possibilitou o término deste curso.

Ao Professor Dr. André Luis Heleno pelo incentivo, aprendizado e a colaboração com a visita técnica, juntamente com meu orientador, à mineradora de Araxá-MG.

Aos Professores Dr. Carlos Roberto Camelo Lima, Dr. Fernando Celso de Campos, Dr. Iris Bento da Silva e Dra. Maria Rita Pontes pelos ensinamentos e companheirismo.

Aos Professores Dr. Manoel Orlando Alvarez Méndez, Carla Rombaldo e Dr. Rodolfo Libardi pelos compartilhamentos de conhecimentos e aos colegas do Laboratório de Materiais Carbonosos: Daniel Monaro, José Martinez, Ana Carolina Plens.

Aos colegas Professores Quaidar Omar Matar, Carlos Antônio de Medeiros e Marcos Cícero Faria da Silva pelo companheirismo e penosas viagens de Araxá no decorrer do curso.

E ao CEFET-MG (Centro Federal de Ensino Tecnológico de Minas Gerais) pela bolsa parcial.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	VIII
Lista de Tabelas	X
Lista de Quadros.....	XI
Lista de Siglas.....	XII
Resumo.....	XIV
Abstract	XV
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 IMPORTÂNCIA DO TRABALHO.....	4
1.2 JUSTIFICATIVA	7
1.3 PROBLEMAS DA PESQUISA	7
1.4 OBJETIVOS.....	7
1.4.1 OBJETIVO GERAL	7
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	8
2 REFERENCIAL TEÓRICO	10
2.1 HISTÓRICO DA ACV	10
2.2 PANORAMA DA ACV NO BRASIL.....	12
2.3 APLICAÇÃO DA FERRAMENTA ACV NA MINERAÇÃO E NA METALURGIA.....	15
2.3.1 APLICAÇÃO DE ACV NA PRODUÇÃO DO ALUMÍNIO	17
2.3.2 APLICAÇÃO DE ACV NA PRODUÇÃO DO COBRE.....	19
2.3.3 APLICAÇÃO DE ACV NA PRODUÇÃO DO NÍQUEL	22
2.3.4 APLICAÇÃO DE ACV NA PRODUÇÃO DO AÇO.....	23
2.4 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E MINERAÇÃO	26
2.5 RESÍDUOS SÓLIDOS.....	32
2.5.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DOS REJEITOS.....	36
2.5.2 BARRAGEM DE REJEITOS.....	36

2.5.3	GERAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS.....	38
2.6	IMPACTOS AMBIENTAIS LIGADOS À EXPLORAÇÃO MINERAL.....	39
2.7	TERRAS RARAS.....	44
2.8	O NIÓBIO - BREVE HISTÓRICO.....	46
2.8.1	O NIÓBIO - OCORRÊNCIA NATURAL.....	47
2.8.2	AS PROPRIEDADES DO NIÓBIO.....	48
2.8.3	A PRODUÇÃO DO NIÓBIO NO MUNDO.....	50
2.8.4	O PROCESSO INDUSTRIAL DA PRODUÇÃO DO NIÓBIO.....	52
2.8.4.1	O PROCESSO DE PRODUÇÃO DE FERRONIÓBIO.....	53
2.8.4.2	A PRODUÇÃO DO ÓXIDO DE NIÓBIO.....	58
2.8.5	PRINCIPAIS APLICAÇÕES INDUSTRIAIS E TECNOLÓGICAS DO NIÓBIO	60
2.8.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O REFERENCIAL TEÓRICO.....	64
3	ABORDAGEM METODOLÓGICA.....	65
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	68
5	CONCLUSÃO.....	82
5.1	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	83
	REFERÊNCIAS.....	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama simplificado para avaliação do ciclo de vida dos metais	3
Figura 2: Elementos dos sistemas de produtos incluídos no estudo LCA.....	3
Figura 3: Fases de uma ACV	13
Figura 4: Ciclo de Vida dos Metais	16
Figura 5: O Processo de Refinação do Alumínio	18
Figura 6: O Processo de Fundição do Alumínio	18
Figura 7: Diagrama da ACV da produção de Al	18
Figura 8: Fluxograma da produção de cobre no Brasil.	19
Figura 9: Fluxograma simplificado da refinação de cobre na África do Sul (A) e na Austrália (B)	20
Figura 10: Fluxo global das principais aplicações do cobre	21
Figura 11: Fluxo de principais aplicações do níquel	23
Figura 12: Fluxograma simplificado da produção do aço.....	23
Figura 13: Fluxograma Simplificado da AVC do Aço	25
Figura 14: Unidade de concentração: (a) separadores magnéticos; (b) saída da magnetita	34
Figura 15: Unidade de concentração: etapa de deslamagem.....	34
Figura 16: Unidade de concentração: etapa de flotação	34
Figura 17: Barragem de rejeitos.....	37
Figura 18: Evolução da produção de nióbio no Brasil.....	52
Figura 19: Fluxograma simplificado da produção do ferronióbio.....	54
Figura 20: Mina a céu aberto	54
Figura 21: Fluxograma do processo de concentração do nióbio.....	55
Figura 22: Fluxograma simplificado da produção do ferronióbio e do óxido de nióbio	59
Figura 23: Aplicações industriais e principais indústrias consumidoras do ferronióbio e do óxido de nióbio	62
Figura 24: Principais aplicações industriais do Nb	63

Figura 25: Diagrama Simplificado do Mercado de Nióbio	63
Figura 26: Fluxograma proposto como modelo para elaboração da ACV do nióbio.....	69
Figura 27: Balanço de materiais do processamento do Nb	72
Figura 28: Balanço dos subprodutos do processamento do FeNb e Nb ₂ O ₅	75
Figura 29: Diagrama simplificado do impacto ambiental ligado à mineração e produção do nióbio	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Etapas e parâmetros para produção do alumínio primário.	19
Tabela 2: Produção de cobre e teores residuais da indústria no Brasil	21
Tabela 3: Síntese da produção, do uso de energia e das emissões de carbono da indústria mineral.	30
Tabela 4: Contribuição de emissões GEE por setor e produto energético.....	31
Tabela 5: Contribuição para o consumo total de energia por setor e produto.	31
Tabela 6: Caracterização radiológica das amostras de processo da mineradora.	42
Tabela 7: Fluxo de atividade radioativa gerado pela mineradora.....	43
Tabela 8: Principais minerais com incidência de Nb	47
Tabela 9: Propriedades físico-químicas do nióbio.....	49
Tabela 10: Propriedades mecânicas do nióbio	50
Tabela 11: Principais produtores de Nb no ano de 2010.	50
Tabela 12: Principais Minas de Nióbio.	51
Tabela 13: Tipos de Produtos de Nióbio.	61
Tabela 14: Elementos presentes nos resíduos da separação e concentração do Nb.	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: A evolução dos conceitos e aplicações da ACV	11
Quadro 2: Aplicação de ACV na produção do alumínio	17
Quadro 3: Aplicação de ACV na produção do cobre.....	20
Quadro 4: Aplicação de ACV na produção do níquel.....	22
Quadro 5: Aplicação de ACV na produção do aço.....	24
Quadro 6: Linha do tempo do desenvolvimento sustentável (1700 a 1980)	27
Quadro 7: Linha do tempo do desenvolvimento sustentável (1980 a 2014)	28
Quadro 8: As principais aplicações dos elementos de TR	45
Quadro 9: Linha do tempo do nióbio	46
Quadro 10: Identificação e conteúdo do fluxograma proposto	70
Quadro 11: Balanço de massa do ferronióbio e do óxido de nióbio	74
Quadro 12: Geração de resíduos sólidos.....	77
Quadro 13: Emissões atmosféricas	79

LISTA DE SIGLAS

ABCV	Associação Brasileira do Ciclo de Vida
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ARBL	Aços de Alta Resistência e Baixa Liga
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATR	<i>Alumino Thermic Reduction</i>
CBMM	Companhia Brasileira de Mineração e Metalurgia
CEI	Comunidade dos Estados Independentes
CEMPRE	Compromisso Empresarial Para a Reciclagem
CETEA	Centro de Tecnologia de Embalagem
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DS	Desenvolvimento Sustentável
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
GANAP	Grupo de Apoio à Normalização Ambiental
GCL	Geocompostos Argilosos
GEE	Gases Efeito Estufa
GHG	<i>Greenhouse Gas</i>
HPAL	Lixiviação Ácida de Alta Pressão
HSLA	<i>High Strength Low Alloy</i>
IABr	Instituto Aço Brasil
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
IPT	Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IUPAC	<i>International Union on Pure and Applied Chemistry</i>
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i>
LCI	<i>Life Cycle Inventory</i>
LED`s	<i>Light Emitting Diodes</i>
MME	Ministério de Minas e Energia

MRI	<i>Midwest Research Institute</i>
NBR	Norma Brasileira Recomendada
OECD	<i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i>
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PVC	Polivinil Clorado
REPA	<i>Resource and Environmental Profile Analysis</i>
RIMA	Relatório de Impacto ao Meio Ambiente
RMN	Ressonância Magnética Nuclear
ROM	<i>Run of Mine</i> (Minério Bruto)
SETAC	<i>Society of Environmental Toxicology and Chemistry</i>
TBL	<i>Triple Bottom Line</i>
TENR	<i>Technologically Enhanced Natural Radioaction</i>
TR	Terras Raras
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
VG	<i>Vacuum Grade</i>

ALVES, A.R.: Proposição de um modelo para a avaliação do ciclo de vida do nióbio. Santa Bárbara d'Oeste; 2015. (Tese de Doutorado) – Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo da UNIMEP.

RESUMO

Nas últimas décadas os conceitos de desenvolvimento sustentável (DS) têm resultado no aumento das pressões ambientais para melhorar a eficiência da utilização dos recursos naturais e a redução da geração e emissão de resíduos. Neste contexto, pode ser incluída a indústria metalúrgica que é uma das maiores consumidoras destes recursos e de energia e grande geradora de resíduos. O presente trabalho tem por objetivo avaliar a produção do ferronióbio (FeNb) e do óxido de nióbio (Nb_2O_5) por meio da abordagem da ferramenta ciclo de vida, tendo-se em vista que a produção e o consumo do Nb têm aumentado de forma significativa. Por outro lado, destaca-se o ineditismo do presente trabalho, em função da ausência de referências com relação à ACV do Nb na literatura científica. Foram realizados levantamentos de dados por meio de pesquisa bibliográfica, em relatórios e de visitas técnicas à empresas mineradoras e do setor metalúrgico. Foram feitos fluxogramas do processo de beneficiamento do minério contendo concentração de 2,5% de Nb no sentido de quantificar o balanço de massa com relação aos produtos acabados, assim como dos resíduos gerados. Os dados mostram que 90,2% do Nb têm aplicações na fabricação de aços de alta resistência e baixa liga, inoxidáveis e resistentes ao calor; 3,0% em superligas; 3,4% em ligas supercondutoras e 3,4% em cerâmicas e catalisadores. De acordo com os dados, partindo de 100 t de minério contendo 2,5% de Nb, são produzidos 2.200 Kg de FeNb e 300 Kg de Nb_2O_5 , e que o beneficiamento do minério agride o meio ambiente por meio da geração de resíduos sólidos que não são reaproveitados, além da degradação ambiental causada pela extração do minério. Por outro lado, o uso do Nb na indústria metalúrgica é indispensável, no sentido de proporcionar o avanço em inúmeros campos da ciência e Tecnologia.

Palavras chave: Nióbio, Ferronióbio, Óxido de Nióbio, ACV, Sustentabilidade.

ABSTRACT

In recent decades the concepts of sustainable development (SD) has resulted in increased environmental pressures to improve the efficient use of natural resources and reducing the generation of waste and emissions. In this context, it may be included metallurgical industry is one of the largest consumers of these resources and energy and major generator of waste. This study aims to evaluate the production of niobium (FeNb) and niobium oxide (Nb₂O₅) through the life cycle tool approach, bearing in mind that the production and consumption of Nb have increased significantly . On the other hand, there is the novelty of this work, due to the absence of references regarding the ACV of Nb in the scientific literature. Data surveys were conducted by means of literature, reports and technical visits to mining companies and the metallurgical sector. Flowcharts were made from ore beneficiation process containing concentration of 2.5% Nb to quantify the mass balance with respect to finished products, as well as the waste generated. The data show that 90.2% of Nb have applications in the manufacture of high strength low alloy steels, stainless and heat resistant; 3.0% superalloys; 3.4% in superconducting alloys and 3.4% in ceramics and catalysts. According to the data, based on 100 ton ore containing 2.5% of Nb, they are produced 2.200 Kg 300 Kg FeNb and Nb₂O₅, and that harm the beneficiation of the ore through ambientepor through the generation of waste which does not they are reused, as well as environmental degradation caused by the ore extraction.

Key Words: Niobium, Ferroniobium, Niobium Oxide, LCA, Sustainability.

1. INTRODUÇÃO

Na segunda metade do século XVIII, iniciou-se na Inglaterra um conjunto de transformações técnicas e econômicas, conhecido como Revolução Industrial, que culminou com a substituição das ferramentas de trabalho pelas máquinas e da fabricação doméstica pelo sistema fabril. Impulsionadas pelas pesquisas científicas, as fábricas passaram a dispor de uma infinidade de produtos, modificando tanto o cotidiano como também as relações econômicas, sociais e ambientais.

A partir de então, verificou-se o uso em larga escala dos recursos naturais, sem a preocupação com o seu esgotamento, assim como com a geração de resíduos sólidos, líquidos e gasosos. A abundância dos recursos naturais talvez seja uma das razões pelas quais os economistas negligenciaram as questões ambientais em épocas anteriores, afinal, a economia vem sendo definida como a ciência que aloca recursos escassos para fins alternativos (CLEMENTE, HIGACHI; 2000).

Os danos causados ao meio ambiente de origem antrópica acompanharam o ritmo do crescimento econômico. A partir do século XIX, com a intensificação do processo de industrialização e dos sistemas agropecuários, a demanda por recursos naturais e, como consequência, os danos ao meio ambiente tornaram-se crescentes. A constatação de que a capacidade de suporte do planeta estava chegando ao seu limite, seja pela quantidade de poluentes lançados no ambiente ou pela exaustão dos recursos naturais, ocorreu no final dos anos de 1960 (FINNVEDEN *et al.*, 2009).

Nas últimas décadas, os conceitos de desenvolvimento sustentável (DS) têm resultado em aumento nas pressões ambientais para melhorar a eficiência da utilização dos recursos e reduzir significativamente a geração e a emissão de resíduos. Estas preocupações por sua vez chamaram a atenção para as cadeias de abastecimento e os ciclos de vida em que os minerais e o processamento de recursos energéticos estão envolvidos com destaque para a geração de resíduos, como resultados das diversas transformações física e

químicas que ocorrem frequentemente nas indústrias metalúrgicas em geral (NORGATE *et al.*, 2007).

Uma maneira de alcançar uma maior eficiência na utilização dos recursos consiste na "desmaterialização", que é definida como a redução da quantidade de energia e de materiais necessários para atender as funções econômicas, por exemplo, a produção de bens de consumo ou prestação de serviços. A elaboração do ciclo de vida dos produtos, por meio da re-utilização de materiais, complementa o processo de desmaterialização. Entre os materiais usados pela sociedade, os metais apresentam vida útil limitada, natureza não biodegradável, além de serem provenientes de fontes não renováveis, com disponibilidade natural limitada. Não obstante, os metais apresentam enormes potenciais para reciclagem, o que permite contribuir para a redução do impacto causado ao meio ambiente, que é resultante de sua exploração e beneficiamento (NORGATE *et al.*, 2007; SEPPALA *et al.*, 2002).

Por outro lado, segundo Seppala *et al.* (2002), a indústria metalúrgica é um dos setores que apresentam maiores índices de consumo de energia e de recursos naturais e, ao mesmo tempo, é uma grande geradora de resíduos, de modo que deve-se envolver cada vez mais com as questões voltadas à sustentabilidade.

Tendo em conta estas preocupações, é esperado que cada vez mais as mineradoras estejam envolvidas em projetos e programas para reduzir seus impactos ambientais. No entanto, considerando o grande número de fluxos de minério primário, os fluxos de subprodutos, de resíduos, assim como os insumos energéticos associados à extração de recursos naturais e seu beneficiamento, torna-se indispensável a avaliação dos processos de produção de novos metais, ou dos já existentes, para atingir as metas de sustentabilidade. Nesse sentido, a Figura 1 e a Figura 2 mostram os diagramas simplificados do ciclo de vida do processo de produção dos metais, com base nos conceitos de sustentabilidade (SEPPALA *et al.*, 2002; NORGATE *et al.*, 2007).

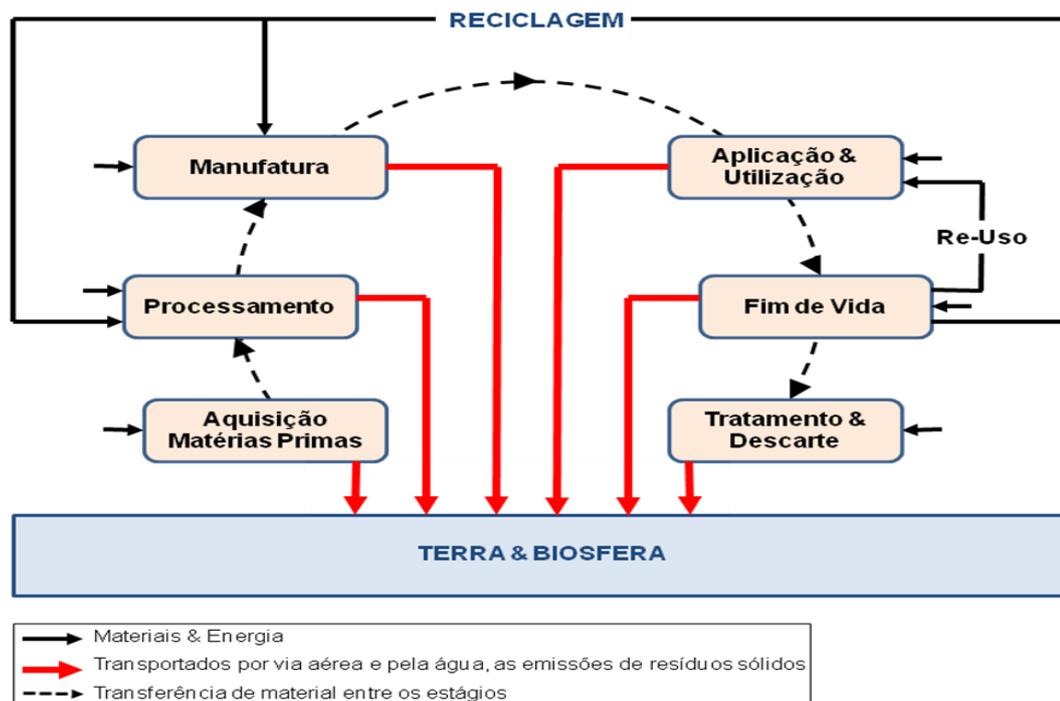


Figura 1: Diagrama simplificado para avaliação do ciclo de vida dos metais (Fonte: adaptado de NORGATE *et al.* 2007).

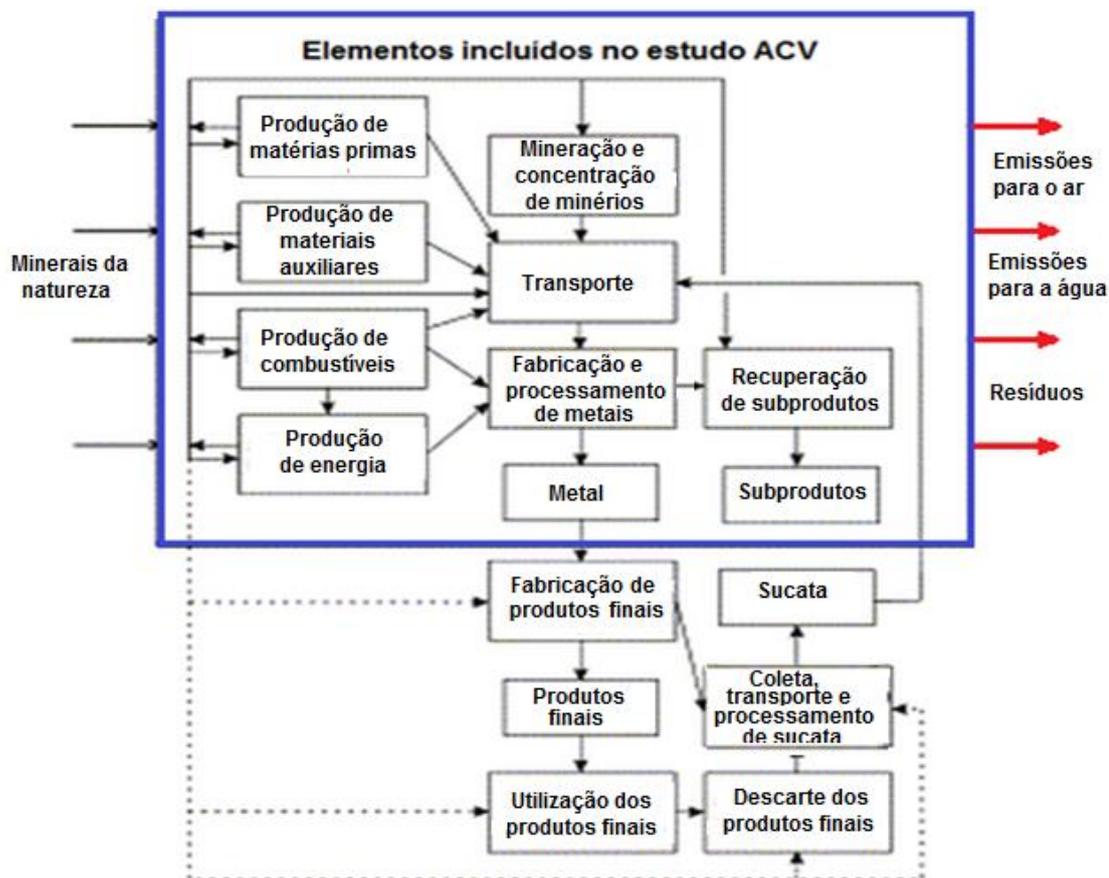


Figura 2: Elementos dos sistemas de produtos incluídos no estudo da ACV (Fonte: adaptado de SEPALLA *et al.* 2002).

Baseando-se nos fluxogramas da Figura 1 e da Figura 2, a aquisição das matérias primas relacionada à exploração de metais, apresenta um enorme gasto de energia com as máquinas usadas na lavra e transporte do minério bruto da mina até o pátio de homogeneização, como também com os resíduos transportados para o aterro.

Nas etapas de processamento e de manufatura, ocorre o maior consumo de energia, além da entrada de outros insumos, como reagentes e água, de materiais que são reutilizados no processamento do Nb. Por outro lado, ocorre a geração dos resíduos que podem ser reutilizados e os que são lançados na barragem de rejeitos, ou os que são enviados para aterros.

Assim, os fluxogramas mostrados na Figura 1 e Figura 2, que envolvem as principais etapas relacionadas ao ciclo de vida dos metais, foram tomados como base para o desenvolvimento do presente trabalho, que está voltado à proposição de um modelo de avaliação do ciclo de vida (ACV) do nióbio.

1.1 IMPORTÂNCIA DO TRABALHO

A sustentabilidade vem se tornando com o passar dos anos, uma combinação de fatores com o intuito de desenvolver metodologias e processos a fim de manter o sistema produtivo atual, sintonizando-o de forma benéfica com o meio ambiente. Sustentabilidade pode, portanto, ser considerada como a integração de critérios ambientais, sociais e econômicos, que juntos são denominados *Triple Bottom Line* (TBL), mantendo um equilíbrio entre esses três pilares com o objetivo de fornecer suporte a uma organização, em termos de competitividade a longo prazo, tal que as mudanças em prol do meio ambiente beneficiem também a corporação e não sejam vistas apenas como prejuízos (CARTER e ROGERS, 2008).

De acordo com o estudo da Secretaria de Ciência e Tecnologia do Estado de São Paulo (1987), elaborado pelo Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo (IPT), os principais impactos causados pela atividade de mineração correspondem à contaminação do lençol de água subterrânea e dos

rios, a poluição do ar e do solo, os impactos sobre a fauna e a flora, assoreamento, erosão, mobilização de terra, instabilidade de taludes, encostas e terrenos em geral, lançamento de fragmentos e vibrações, além da poluição visual e sonora.

O ecossistema, de uma maneira geral, possui ciclos biogeoquímicos que mantêm uma sinergia entre a produção e o consumo dos seus recursos naturais e energias, que há muito tempo vem sendo mais consumidos do que gerados pelas atividades humanas. Como exemplo tem-se a extração de minérios e de petróleo, com uma preocupação tênue com relação ao retorno destes recursos de maneira adequada para a natureza (CARTER e ROGERS, 2008).

A mineração do pirocloro e o processamento do ferronióbio produzem toneladas de resíduos, lamas, rejeitos e escórias, que são depositados em tanques e aterros, construídos para evitar a contaminação do meio ambiente. Por outro lado, nos últimos anos estão sendo feitos trabalhos com vistas ao reaproveitamento de componentes metálicos presentes nos tanques de rejeitos, por exemplo, a recuperação de terras raras como cério, lantânio, neodímio e praseodímio (GEOFÍSICA BRASIL, 2012).

A aplicação mais importante do nióbio é como elemento de liga para conferir melhoria de propriedades em produtos de aço, especialmente nos aços de alta resistência e baixa liga usados na fabricação de automóveis e de tubulações para transmissão de gás sob alta pressão. Vem a seguir seu emprego em superligas que operam a altas temperaturas em turbinas das aeronaves a jato. O nióbio é também adicionado ao aço inoxidável utilizado em sistema de escapamento dos automóveis, e ainda na produção de ligas supercondutoras de nióbio-titânio usadas na fabricação de magnetos para tomógrafos de ressonância magnética. Encontra aplicação também em cerâmicas eletrônicas e em lentes para câmeras (CBMM-b, 2014).

A importância do presente trabalho está relacionada à proposição de um modelo para avaliação do ciclo de vida (ACV) para o metal nióbio (Nb), com destaque para o ferronióbio e o óxido de nióbio. Destaca-se também, que não

foram encontradas referências na literatura científica com relação à ACV do Nb, de modo que o presente trabalho pode ser considerado inédito no meio científico. Além disso, destaca-se o fato de que o Brasil detém as maiores reservas globais do minério e é o maior produtor mundial de Nb.

Neste sentido, este trabalho consiste de uma pesquisa exploratória, sendo que os dados incluídos no modelo de ACV do Nb foram obtidos por meio de revisão de literatura científica no que se refere às aplicações tecnológicas do Nb, aos rejeitos da exploração e processamento do minério e do processo de produção. Com relação a quantificação dos dados do balanço de massa, a maioria dos dados relativos ao processo produtivo do ferronióbio e do óxido de nióbio foi obtida por meio de diversos estudos científicos e coleta de dados do processo, os quais permitiram elaborar um modelo de ciclo de vida do nióbio.

Com relação à elaboração do modelo, *i.e.*, do fluxograma da ACV do Nb, este foi elaborado com base no modelo de Sepalla *et al.* (2002) e de Norgate *et al.* (2007), apresentados anteriormente (Fig. 1 e Fig. 2) e por meio de modelos encontrados na literatura científica para outros metais, como o alumínio (TAN *et al.*, 2005; LIU *et al.*, 2012), o cobre (STEWART *et al.*, 2006; PETRIE, 2007; TANIMOTO *et al.*, 2010; MEMARY *et al.*, 2012), o níquel (PETRIE, 2007; ECKELMAN, 2010) e o aço (IABr, 2010; BURCHART-KOROL, 2011; YELLISHETTY *et al.*, 2011) e trabalhos realizados por Pires do Rio (2002).

1.2 JUSTIFICATIVA

Diante do cenário apresentado, sob ponto de vista científico, a realização do presente trabalho pode ser justificada pela inexistência de um modelo de avaliação do ciclo de vida do Nb; desde a inexistência de um fluxograma da ACV em que estão incluídos o balanço de massa das matérias primas e insumos, as diversas aplicações tecnológicas do Nb, a identificação e quantificação dos resíduos depositados nos tanques de rejeitos e da cadeia pós-consumo dos produtos que empregam Nb em sua composição, no sentido de avaliar as possibilidades de reciclagem e reuso de seus componentes.

1.3 PROBLEMAS DA PESQUISA

O presente trabalho visa contribuir com um modelo de ACV do nióbio para responder algumas questões inerentes à exploração, produção e uso do ferronióbio (FeNb) e do óxido de nióbio (Nb₂O₅), como exemplo:

- Como pode ser elaborado um modelo de ACV para o metal nióbio e seus principais subprodutos: o FeNb e o Nb₂O₅?
- Como é o balanço de massa e como pode ser feita a identificação dos elementos presentes nos resíduos da produção do Nb, considerando desde a exploração e beneficiamento do minério?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do presente trabalho é propor um modelo para ACV do nióbio, por meio da elaboração de um fluxograma que contempla as diversas etapas do processo produtivo, da realização do balanço de massa de todo o processo, das aplicações tecnológicas, da identificação dos resíduos gerados e as possibilidades de reuso, assim como suas destinações ambientalmente corretas.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Realizar o levantamento *in loco*, em um ambiente industrial, do processo de produção do ferronióbio e do óxido de nióbio, com vistas à elaboração do balanço de massa do processo;
- b) Identificar e quantificar os elementos depositados nos tanques de rejeitos do processamento do Nb;
- c) Avaliar as possibilidades de reciclagem e reuso dos componentes presentes nos rejeitos do processamento do Nb.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho possui 6 capítulos, que serão detalhados a seguir.

Capítulo 1 – **Introdução** – Neste capítulo são apresentados: a importância do trabalho, a justificativa, os problemas a serem estudados, os objetivos geral e específicos e a estrutura do trabalho.

Capítulo 2 - **Referencial Teórico** – Este capítulo está dividido em subcapítulos que abordam as pesquisas referentes ao histórico da ACV; o panorama da ACV no Brasil; aplicação da ferramenta ACV na mineração e na metalurgia, que aborda as pesquisas sobre alguns metais, como a aplicação de ACV na produção do alumínio, do cobre, do níquel e do aço; o desenvolvimento sustentável, que aborda seus conceitos e mineração; os resíduos sólidos, que aborda as pesquisas sobre a caracterização química e mineralógica dos rejeitos, a bacia de rejeitos e a geração e classificação dos resíduos; os impactos ambientais da mineração que está dividido em Impacto radiológico ambiental ligado à exploração mineral; terras raras; o metal nióbio, que contempla um breve histórico, pesquisas sobre sua ocorrência natural, propriedades, a produção do nióbio no mundo, o processo industrial e as principais aplicações industriais e tecnológicas do nióbio.

Capítulo 3 - **Abordagem metodológica** - Neste capítulo é feita a descrição da metodologia empregada para o desenvolvimento do presente trabalho, que consiste de levantamentos em literatura científica por meio da busca de artigos científicos nacionais e internacionais, visando consultar a diversidade de trabalhos existentes e disponíveis sobre o tema; o levantamento de dados publicados a partir de empresas mineradoras e do setor metalúrgico; a elaboração de fluxogramas relacionados à exploração, produção e uso do Nb; o levantamento de dados com relação a estrutura de mercado de Nb e a evolução da produção de Nb no Brasil; assim como levantamentos e análises de dados do processo de produção do ferronióbio e óxido de nióbio; o levantamento de dados para elaboração do balanço de massa em uma unidade industrial, a avaliação dos impactos ambientais relativos a cadeia da exploração/produção do Nb com enfoque nos conceitos de sustentabilidade.

Capítulo 4 - **Resultados e discussão** – Este capítulo, consiste da elaboração de um fluxograma que contempla as diversas etapas do processo produtivo, no sentido de propor um modelo de ACV para o nióbio, por meio da realização do balanço de massa da produção do FeNb e Nb₂O₅, a identificação dos resíduos gerados e as possibilidades de reuso, assim como suas destinações ambientalmente corretas e os impactos radiológicos ambientais causados pela mineradora de Nb.

Capítulo 5 – **Conclusão** - Neste capítulo são apresentadas as conclusões com base nos objetivos, no referencial teórico e nos resultados obtidos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo aborda os temas principais ligados à pesquisa, contando com assuntos relacionados aos conceitos e normas da avaliação do ciclo de vida, desenvolvimento sustentável, impactos ambientais da mineração, processo de produção do FeNb e Nb₂O₅, aplicações industriais e tecnológicas do nióbio e rejeitos da produção do FeNb e Nb₂O₅, todos estes com vista a elaboração do modelo de ACV do Nb, com ênfase aos subprodutos: FeNb e Nb₂O₅.

2.1 HISTÓRICO DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

De acordo com a Organização Internacional para Padronização (ISO), a ACV é definida como a "compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida". As normas ISO descrevem um conjunto de protocolos para a realização de um estudo de ACV, dividido em quatro fases distintas: a definição do objetivo e do escopo, a análise de inventário, a avaliação de impacto e a interpretação (BAUMANN e TILLMAN, 2004).

Os primeiros estudos vinculados com a questão ambiental que tratavam da quantificação de energia dos processos industriais eram os chamados "análises de energia". Porém, para se construir o fluxograma do consumo de energia, era necessário efetuar o balanço da massa das matérias-primas e dos recursos empregados nos processos; de modo que, alguns analistas referiam a estes estudos como "análises de recursos", ou ainda como "análises de perfil ambiental" (MANZINI e VEZZOLI, 2005; SANTOS *et al.*, 2011).

O Quadro 1 mostra de forma resumida a evolução cronológica dos trabalhos produzidos e publicados com relação a avaliação do ciclo de vida dos materiais, relacionados a evolução dos conceitos, as principais normas e aplicações.

Quadro 1. A evolução dos conceitos e aplicações da ACV.

Época	Foco	Referência
Década de 1960	Pressões ambientalistas nos EUA sobre a indústria de embalagens levaram à realização de estudos de análise de energia e de recursos aplicados aos processos de produção. Um dos primeiros estudos foi executado pelo <i>Midwest Research Institute</i> (MRI) para a empresa <i>The Coca Cola Company</i> , em 1969, incluindo recursos, cargas de emissão e fluxos de resíduos para diferentes recipientes de bebidas, embalagens de refrigerante e selecionar qual deles se apresentava mais adequado do ponto de vista ambiental com relação à preservação dos recursos naturais. O processo de quantificação da utilização dos recursos naturais e de emissões, utilizado pela Coca-Cola, passou a ser conhecido como <i>Resource and Environmental Profile Analysis</i> –REPA, ou “análise de recursos e de perfil ambiental”.	Guinée <i>et al.</i> (2011) Huppés (1991)
1974	A metodologia conhecida como REPA, foi aprimorada pelo MRI durante a realização de estudos para a Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA), sendo considerada a precursora da metodologia denominada Avaliação do Ciclo de Vida – ACV.	Manzinie Vezzoli (2005)
Década de 1980	Realização de acordos internacionais visando a redução das emissões de gases do efeito estufa (GEE). As análises ambientais começaram a incorporar e quantificar estes fatores em sua metodologia, passando a ser chamadas de “ecobalço”, ou “ecoperfil” ou ainda “análise de berço ao túmulo” (<i>cradle to grave</i>).	Santos <i>et al.</i> (2011) Chehebe (1998)
1985	A Comunidade Européia publicou a Norma Diretiva 85/339, sobre embalagens para líquidos de consumo humano, obrigando as empresas de bebidas a monitorar o consumo de energia, de recursos naturais e do resíduo sólido associado ao seu produto. A partir da evolução destes estudos que surgiu a denominação <i>Life Cycle Assessment - LCA</i> .	Manzinie Vezzoli (2005) Matthias <i>et al.</i> (2013)
Década de 1990	O EMPA publicou novos bancos de dados, com informações sobre embalagens, introduzindo na metodologia REPA um sistema de ponderação que utilizava padrões de referência para a saúde humana e para agregar dados sobre os impactos ambientais.	Santos <i>et al.</i> (2011) Guinée <i>et al.</i> (2011)
1990 a 2013	A SETAC - <i>Society of Environmental Toxicology and Chemistry</i> iniciou trabalhos de sistematização e padronização dos termos e critérios da ACV, que resultaram publicação <i>Guidelines for Life Cycle Assessment: a Code of Practice</i> . O documento serviu de base para orientar a normatização internacional, desenvolvidos pela <i>International Organization for Standardization</i> (ISO), que em 1993 criou o Comitê Técnico TC207, que foi o responsável por umas das mais importantes séries de normas internacionais, a série ISO 14.000, que inclui as normas de ACV.	Jolliet <i>et al.</i> (2005) Reid <i>et al.</i> (2009) ISO 14.040 (2001) Santos <i>et al.</i> (2011) Swart <i>et al.</i> (2013) Matthias <i>et al.</i> (2013)

2.2 PANORAMA DA ACV NO BRASIL

No Brasil, as legislações ambientais, assim como o tema ACV, começaram a obter maior destaque a partir do início da década de 1990, principalmente após a realização do evento ECO 92, no Rio de Janeiro (CHEHEBE, 1998).

Após a Conferência realizada no Rio de Janeiro, o termo DS passou a estar presente em diversos discursos políticos e sociais, além do surgimento de diversas idéias e posições por parte de muitos segmentos sociais. No ano de 1993 foi criado no Brasil o Grupo de Apoio à Normalização Ambiental - GANA, precursor de outros grupos ambientais. No final da mesma década, foi publicado um dos primeiros artigos nacionais sobre o assunto, intitulado “Análise do Ciclo de Vida de Produtos”, de Chehebe (1998) (MANZINI e VEZZOLI, 2005; SANTOS *et al.*, 2011).

No início do ano 2001 foi lançada a versão nacional da norma internacional ISO, a NBR ISO 14.040 (2001), regulamentando a metodologia para a realização de estudos de ACV, além das práticas voltadas a Gestão Ambiental.

No ano seguinte, o órgão denominado Compromisso Empresarial Para a Reciclagem - CEMPRE, em parceria com o Centro de Tecnologia de Embalagem - CETEA, publicou textos sobre os princípios e aplicações da ACV. A partir do ano de 2003 o Brasil passou a contar com uma associação específica para o assunto, a Associação Brasileira do Ciclo de Vida - ABCV. No ano de 2007 foi realizado em São Paulo o primeiro evento da área de ACV no Brasil, denominado Congresso Internacional de *Life Cycle Assessment* – CILCA (MANZINI e VEZZOLI, 2005; SANTOS *et al.*, 2011).

A série ISO 14.000 foi lançada no Brasil no ano de 2001, com base nas seguintes normas internacionais:

- ISO 14.040 *Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework* (1997), que estabelece os princípios básicos e requisitos para a realização e divulgação dos resultados de estudos de ACV;

- ISO 14.041 *Environmental Management - Life Cycle Assessment - Goal scope definition and inventory analysis* (1998), que detalha os requisitos para o estabelecimento do objetivo e escopo de um estudo de ACV;
- ISO 14.042 *Environmental Management - Life Cycle Assessment - Life cycle impact assessment* (2000), que apresenta os princípios gerais para a realização da avaliação de impactos, a seleção das categorias de impacto, descrevem as etapas de classificação e de caracterização;
- ISO 14.043 *Environmental Management - Life Cycle Assessment - Life cycle interpretation* (2000), que apresenta os requisitos e recomendações para a interpretação dos resultados de uma análise de inventário ou avaliação de impacto.

A ISO 14.040 (1997) apresenta uma estrutura no sentido de possibilitar a implementação da ferramenta ACV, segundo um diagrama simplificado, mostrado na Figura 3.

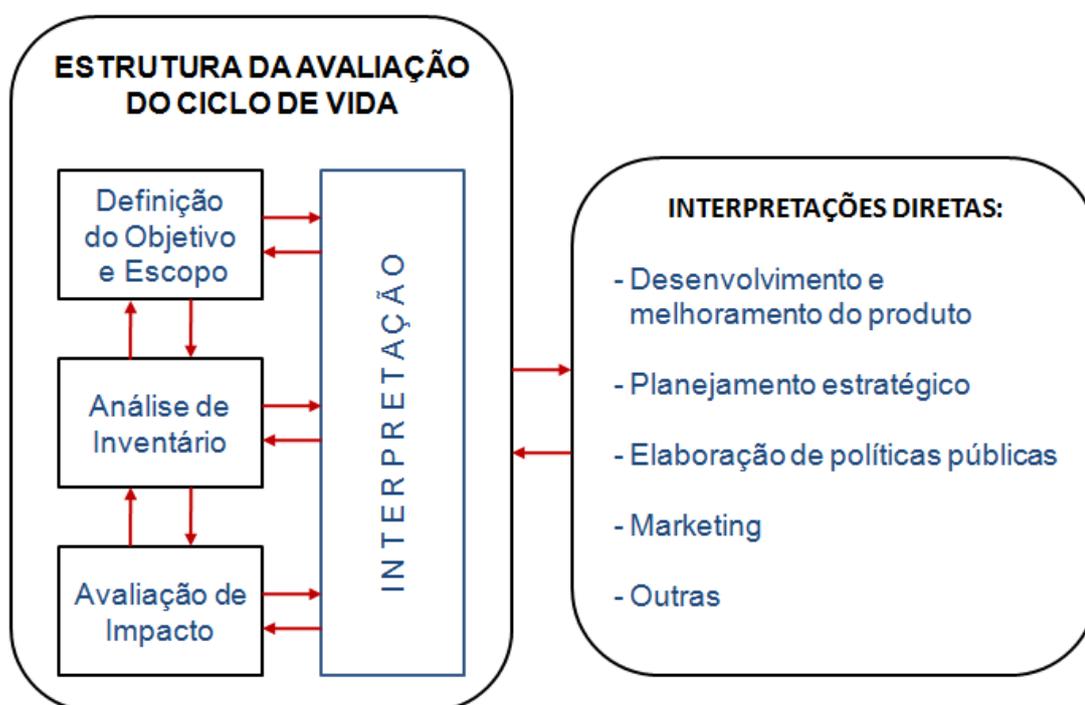


Figura 3: Fases de uma ACV (Fonte: adaptado de ISO 14040, 1997).

As principais etapas da ACV, segundo as normas NBR ISO 14040 (1997), NBR ISO 14041 (2006) e ILCD (2012), são descritas resumidamente a seguir:

Definição do Objetivo e Escopo: devem ser consistentes com a aplicação pretendida e definidos, identificando o contexto das decisões, assim como os resultados pretendidos. O escopo inclui ainda uma distribuição dos itens a serem seguidos de acordo com a linha central do estudo, as funções do sistema, os aspectos e impactos ambientais a serem investigados, as possíveis limitações, entre outras características;

- *Análise de Inventário:* envolve a coleta e o processamento dos dados, no sentido de quantificar as entradas e saídas do sistema de produção, podendo incluir os aspectos ambientais que sejam alterados pelo sistema. O inventário é iterativo, em que as suas alterações podem levar para uma reflexão do objetivo e/ou escopo do trabalho, devido as incertezas na coleta de seus dados. A primeira validação dos dados são realizados nesta fase:
- *Avaliação do Impacto:* esta fase é dirigida para a significância dos impactos ambientais potenciais (resíduos sólidos e líquidos, consumo de água, emissão de GEE), usando como resultados os inventários. Esta etapa envolve a interpretação dos resultados relacionados a seus impactos, visando compreender a magnitude e características dos impactos ao meio ambiente.
- *Interpretação do Ciclo de Vida:* é a fase na qual as constatações das fases anteriores são combinadas, relacionando-as com o objetivo e o escopo do estudo, começando com as questões mais significativas encontradas. A interpretação envolve a integridade, sensibilidade e consistência, de acordo com as incertezas e a precisão dos resultados.

A partir da estrutura simplificada apresentada, assim como dos conceitos e definições das etapas, a ACV pode ser considerada como um processo iterativo, onde repetições são necessárias para obter resultados consistentes, tendo-se em vista que a norma ISO 14.000 busca direcionar os estudos e padronizar as pesquisas em prol do meio ambiente.

2.3 APLICAÇÃO DA FERRAMENTA ACV NA MINERAÇÃO E NA METALURGIA

A ACV é uma importante ferramenta de avaliação de sustentabilidade para os setores industriais em geral, incluindo os segmentos da mineração e da metalurgia. A partir do ano 2000, o uso dos conceitos de definições da ACV no setor de minerais foi intensificado por meio do desenvolvimento de bases de dados de inventário de ciclo de vida - ICV (*Life Cycle Inventory - LCI*), cientificamente adotado, por exemplo, pelo *National Exposure Research Laboratory – NERL*, pela agência *Environmental Protection Agency - EPA*, Ecoinvent e Eco-Indicator 99 (YELLISHETTY *et al.*, 2011).

Stewart (2006) fez uma abordagem, por meio de síntese do processo para o desenvolvimento de ICV para a exploração de minerais, com base em uma metodologia voltada a produção de chapas metálicas, por meio de informações de balanço de massa do processo produtivo. Esta abordagem permite a criação de fluxogramas das atividades de processamento de minerais, a partir do qual é possível gerar inventários utilizando práticas para o mapeamento dos fluxos de recursos e emissões de resíduos para o meio ambiente.

Os conceitos e definições de ACV, segundo Stewart *et al.*, (2003 e 2006), são usados como ferramentas para a coleta de informações nas áreas de mineração e de metalurgia. Também são poucas as informações com relação a definição do teor de impurezas que têm de ser removidos do minério; a variação da qualidade do minério durante a vida útil de uma mina; a demanda de energia para as transformações do minério durante seu processamento; a quantificação da geração de finos durante o beneficiamento e refino dos metais, e outros.

Ainda, segundo Stewart (2006) é necessário incorporar uma metodologia para aquisição de dados, no sentido de fornecer uma medida de desempenho do processamento dos minérios e documentar os fluxos de recursos e emissões ambientais. Além disso, é importante o desenvolvimento de ICV de vida para o sistema produtivo, por meio de balanços de massa e de energia do processamento dos minerais.

A abordagem global para aplicação da ferramenta ICV inclui quatro etapas principais (STEWART *et al.*, 2003 e 2006): a identificação, a coleta e aplicação de dados para elaboração de fluxograma do processo produtivo, o desenvolvimento das premissas de modelagem para unidades individuais dentro de um fluxograma de processo global; a aplicação da base de conhecimento para determinar os balanços de massa e de energia para um produto e a utilização dos perfis para gerar ICV's.

Essa mesma abordagem pode ser utilizada para documentar o desempenho de minerais, por meio de uma série de modelos de processo ou de fluxogramas, permitindo a criação de ICV a partir de diversas tecnologias, matérias primas, ou setores industriais. Por exemplo, a Figura 4 mostra um diagrama simplificado voltado a aplicação da ferramenta ACV, em alguns setores industriais na África do Sul e na Austrália, como a indústria do ouro, a produção de carvão, de metais não-ferrosos, metais ferrosos, metais do grupo da platina, de titânio, uranio e outros (STEWART *et al.*, 2006).

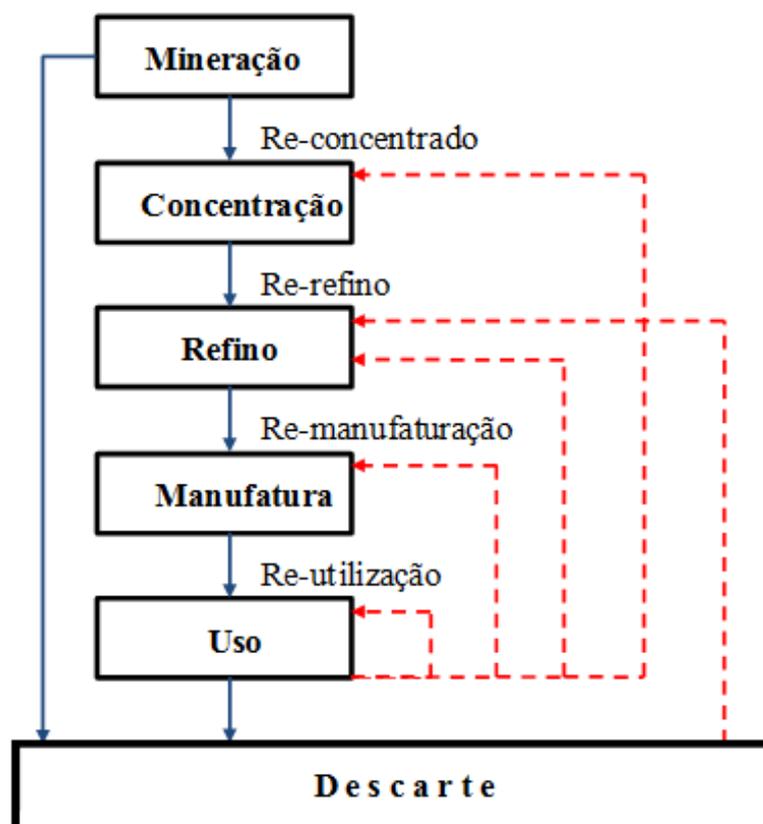


Figura 4: Ciclo de Vida dos Metais (Fonte: adaptado de STEWART *et al.*, 2006).

2.3.1 A ACV DA PRODUÇÃO DO ALUMÍNIO

O Quadro 2, a Tabela 1 e as Figuras 5, 6 e 7 apresentam resumidamente estudos feitos com relação a ACV do alumínio, que foram tomados como base para a elaboração do modelo da ACV do Nb.

Quadro 2. Aplicação de ACV na produção do alumínio.

Descrição	Referência
A produção do Al a partir do minério bauxita é um dos segmentos industriais que exige mais energia e que contribui para a emissão de grandes quantidades de GEE.	Norgate <i>et al.</i> (2007) IEA (2009) Norgate <i>et al.</i> (2010)
O componente Al ₂ O ₃ , a alumina, é a matéria-prima para a produção do Al. A conversão de bauxita em alumina e sua transformação em Al são processos de utilização intensiva de energia e de enorme quantidade de coque como elemento redutor. São gerados resíduos como lamas e emissões de CO ₂ .	Tan <i>et al.</i> (2005) Liu <i>et al.</i> (2011) e (2012)
A bauxita é convertida em alumina pelo Processo de Bayer, que inclui a digestão do minério, a clarificação do fluxo de lixiviação, a precipitação e a calcinação de alumina (Figura 5). São produzidas mais de duas toneladas de lama para cada tonelada de alumina.	Authier-Martin <i>et al.</i> (2001) Tan <i>et al.</i> (2005)
A alumina é submetida ao processo de fundição (Figura 6) através do uso de coque e do uso de enorme quantidade de energia elétrica. Na unidade industrial o metal de Al fundido é processado em lingotes, ou tarugos.	Tan <i>et al.</i> (2005) Liu <i>et al.</i> (2011)
O ciclo de vida do processo de produção do Al é mostrado na Figura 7, que compreende a mineração e a produção do Al a partir da bauxita ou a partir de sucata; a fabricação de lingotes; a aplicação; a gestão e a reciclagem dos resíduos gerados.	Liu <i>et al.</i> (2011) e (2012)
Para obtenção do alumínio primário são necessárias as etapas de mineração, refino e redução. O refino consome entre 150 kWh/t à 400 kWh/t de energia elétrica.	Jeronymo (2007)
Em uma indústria integrada de alumínio, cujo processo é eletrointensivo, a cada tonelada de alumínio produzido consome em torno de 16.000 kWh de energia.	Bermann (2007)
A reciclagem de alumínio a partir de sucata requer energia cerca de 20 vezes menor do que a produção primária, o que torna a ACV do Al a partir do processo de reciclagem uma etapa promissora e voltada ao conceito de produção sustentável, comparada ao uso da bauxita, como elemento primário.	Liu <i>et al.</i> (2011) e (2012)

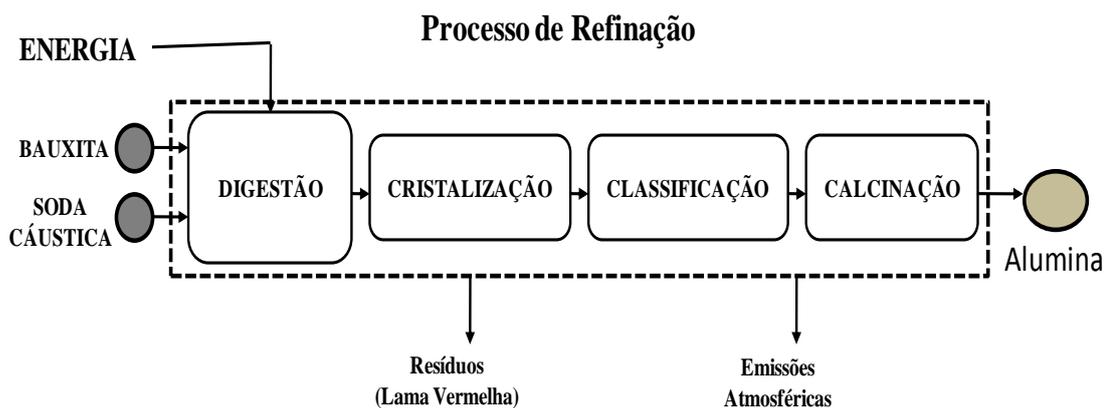


Figura 5: O Processo de Refinação do Alumínio (Fonte: adaptado de TAN *et al.*, 2005).

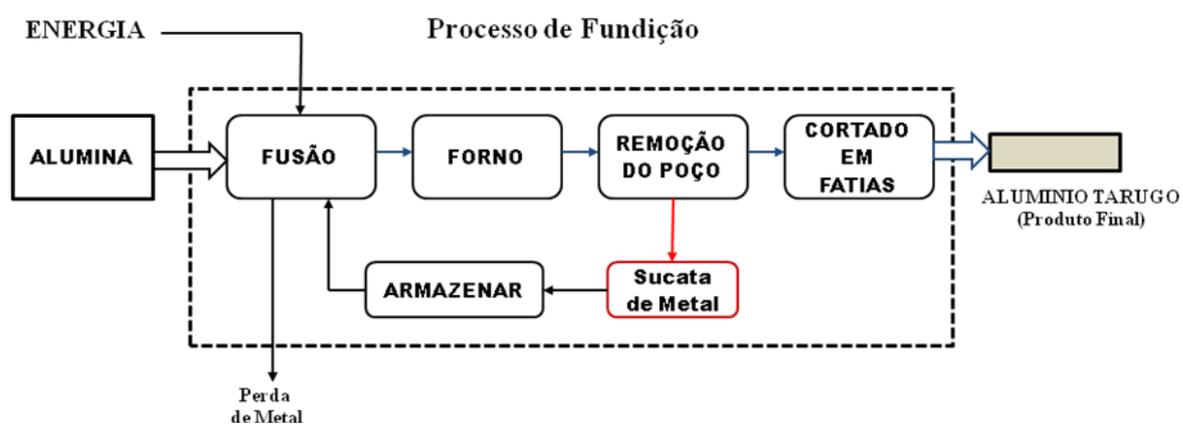


Figura 6: O Processo de Fundição do Alumínio (Fonte: adaptado de TAN *et al.*, 2005).

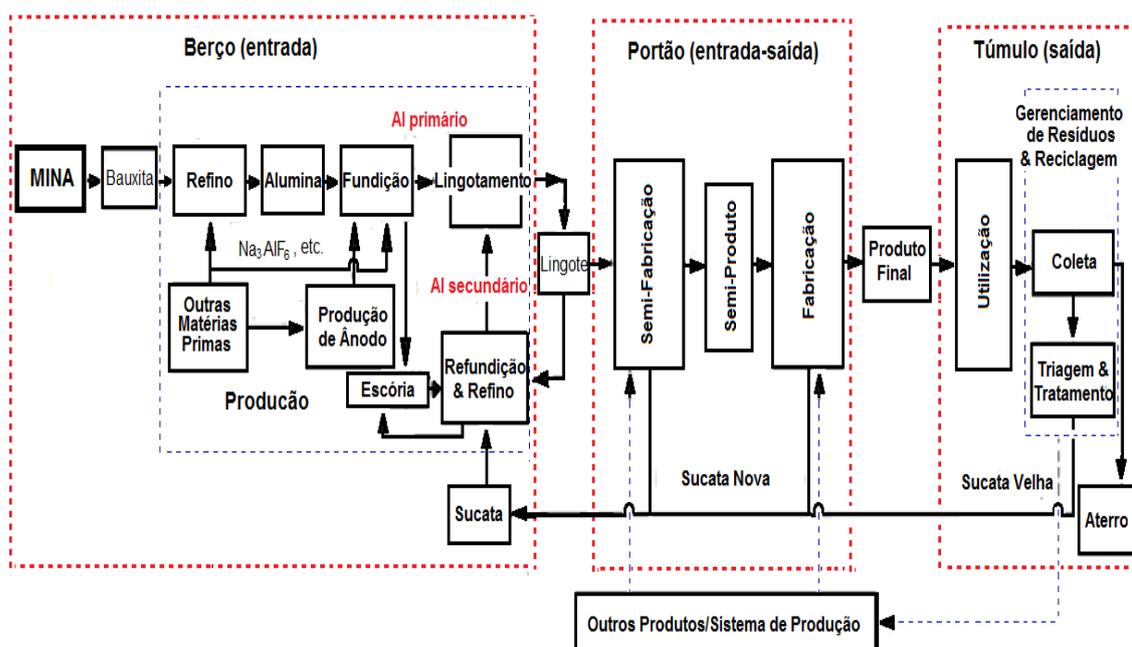


Figura7: Diagrama da ACV da produção de Al (Fonte: adaptado de LIU *et al.*, 2012).

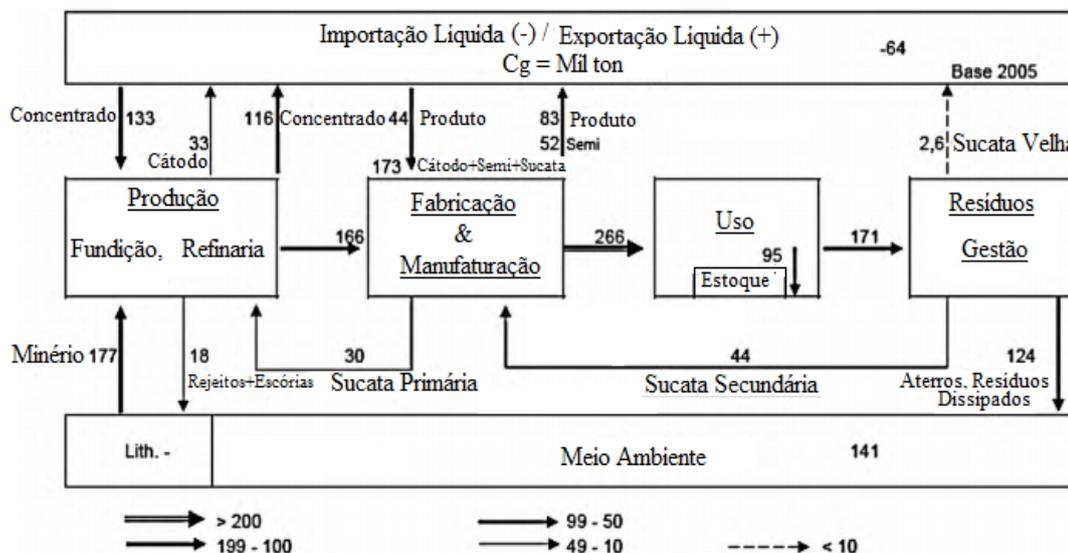
Tabela 1. Etapas e parâmetros para produção do alumínio primário.

Insumos/Consumo Energético	Problemas ambientais	Quantidades
BAUXITA (Extração e Beneficiamento)		
Lenha, Carvão, Óleo Combustível p/ Transporte Energia: 1,2 - 3,5 Gj / t Eletricidade: 100 kwh / t	Escória (resíduos), Poeira e Degradação do Solo	1 t / 1 t Bauxita, em base seca (bs)
ALUMINA (Refino da Bauxita)		
Soda Cáustica, Cal, Ácido Sulfúrico Energia: 55,7 Gj / t Eletricidade: 350 kwh / t	Lama Vermelha - Óxidos de Ferro, Óxido de Titânio, Silicatos de Sódio e Alumínio, Emissão de SO ₂ - acidificação	1 t / 2 - 2,5 t Bauxita 1,2 t / 1 t Alumina 1,2 kg H ₂ SO ₄ / t Alumina
ALUMÍNIO (Fundição e Redução da Alumina)		
Coque, Piche, Óleo Combustível, Anodos de Carbono, Criolita, Fluoretos Energia: 74,6 – 107,6 Gj / t Eletricidade: 15 – 16 Mwh / t	Particulados de Fluoretos, Fluoretos Gasosos (Hf), Gases CO ₂ e SO ₂	1 t / 1,92 – 2 t Alumina Fluoretos: 20-30 kg / t Anodos: 0,4-0,5 t / t Coque: 400-500 kg / t Piche: 140-160 kg / t Gás Hf: 1,5 kg / t

(Fonte: adaptado de JERONYMO, 2007).

2.3.2 A ACV DA PRODUÇÃO DO COBRE

As Figuras 8, 9 e 10, o Quadro 3 e a Tabela 2 apresentam resumidamente estudos feitos com relação a ACV do cobre, que também foram tomados como base para a elaboração do modelo da ACV do Nb.

Figura 8: Fluxograma da produção de cobre no Brasil (Fonte: TANIMOTO *et al.*, 2010).

Quadro 3. Aplicação de ACV na produção de cobre.

Descrição	Referência
No Brasil os primeiros trabalhos sobre a ACV do cobre, foram feitos em 2005, como mostra a Figura 8.	Tanimoto <i>et al.</i> (2010) Lavandaio (2008)
Foram produzidos 300 kg de cobre a partir de 1 tonelada de minério concentrado, sendo consumo de energia elétrica de 17.420 kWh/t para fusão e 26.520 kWh/t para refinação.	Valero e Botero (2002)
A produção de resíduos no Brasil foi de 1.411 kg/hab/ano, sendo que 43% são considerados resíduos não perigosos e industriais, 26% e 27% são resíduos sólidos urbanos e de construção e demolição, como mostra a Tabela 2. A produção de resíduos não perigosos e industriais, é de 611 kg/hab/ano.	Tanimoto <i>et al.</i> (2010) Lifset <i>et al.</i> (2002) Bertram <i>et al.</i> (2002)
A taxa de reciclagem de resíduos de cobre foi de 25%, abaixo dos valores estimados para a Europa (48%), para América do Norte (60%), e África (34%).	Lifset <i>et al.</i> (2002)
A Figura 9 mostra as tecnologias da África do Sul (A) e da Austrália (B), destacando as diferenças para a ICV do cobre, que podem ser usados para informar sobre a seleção de tecnologia e otimização, e fornecer uma perspectiva sobre as diferenças, do ponto de vista de mineração e produção.	Van Beers <i>et al.</i> (2003) Stewart <i>et al.</i> (2006) Memary <i>et al.</i> 2012
A Figura 10 mostra de forma resumida as principais etapas da aplicação do cobre na cadeia industrial de subprodutos.	Petrie, (2007)

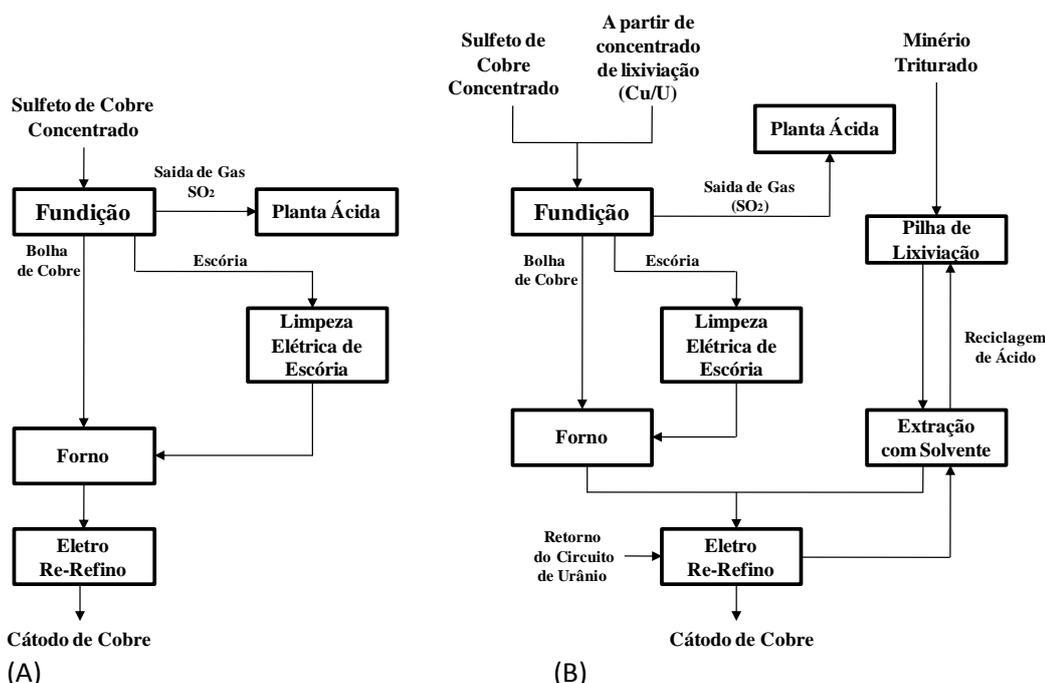
Figura 9: Fluxograma simplificado da refinação de cobre na África do Sul (A) e na Austrália (B) (Fonte: STEWART *et al.*, 2006).

Tabela 2. Produção de cobre e teores residuais da indústria no Brasil.

Tipo de Resíduos	Geração		Concentrado de Cu (mg/kg)	Fluxo de Cobre		
	Kg resíduo/hab/ano	(%)		Kt Cu/ano	Kg Cu/hab/ano	(%)
Resíduos Sólidos Urbanos (MSW)	365	25,9	500	33,6	0,183	19,7
Construção & Demolição	384	27,2	670	47,4	0,257	27,8
Resíduos de Equipamentos Eletro-Eletrônicos (WEEE)	3,4	0,2	7,6%	47,3	0,257	27,7
Veículos em Fim de Vida (ELV)	9	0,6	1,1%	16,7	0,091	9,8
Lodo Sólido (SS)	12	0,8	255	558	0,003	0,3
Industriais & Resíduos de Risco (I&HW)	27	1,9	500	2,5	0,014	1,5
Industriais & Resíduos Sem Risco (I&NHW)	611	43,3	200	22,4	0,122	13,2
Total	1411	100		170,6	0,926	100,0

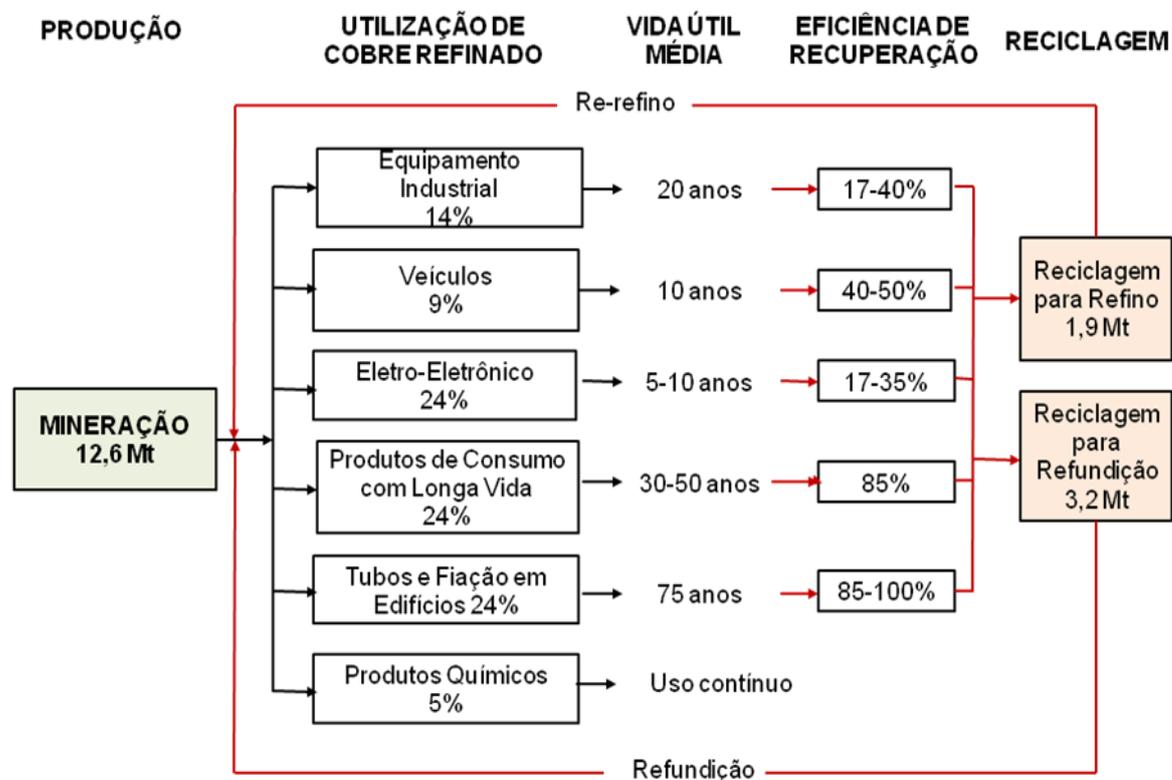
(Fonte: adaptado de TANIMOTO *et al.*, 2010).

Figura 10: Fluxo global das principais aplicações do cobre (Fonte: adaptado de PETRIE, 2007).

2.3.3 A ACV DA PRODUÇÃO DO NÍQUEL

O Quadro 4 e a Figura 11, apresentam resumidamente estudos feitos com relação a ACV do níquel, que também foram tomados como base para a elaboração do modelo da ACV do Nb.

Quadro 4. Aplicação de ACV na produção do Níquel.

Descrição	Referência
<p>O ciclo de vida do Ni é complexo, tal como da maioria dos metais, cerca de 70% do Ni é usado para a fabricação de aço inoxidável, sendo 7% utilizado em outros tipos de aço, 11% na composição de ligas à base de cobre, 6% para o processo de eletrodeposição de niquelação, 3% em fundição e 4% para outros usos especiais.</p>	<p>Kuck (2006) Reck <i>et al.</i> (2008)</p>
<p>A Figura 11 mostra um diagrama das principais aplicações do níquel e subprodutos, como ligas de níquel e aço inoxidável.</p>	<p>Petrie (2007) Eckelman (2010)</p>
<p>O processo de mineração e de produção consome grandes quantidades de energia elétrica, nas etapas de moagem, beneficiamento e fundição, que é a fase mais importante em termos de consumo de energia e emissões de GEE. A produção resulta na variedade de produtos intermediários de Ni, derivados do processo de fusão, incluindo ferro-níquel, níquel fosco, níquel sinterizado, óxido de níquel e de ferro-gusa. Além disso, a análise energética da produção de produtos do Ni envolve dois processos principais: a pirometalurgia e a hidrometalurgia utilizando lixiviação ácida de alta pressão (HPAL) e solvente de extração.</p>	<p>Norgate (2001) Eckelman (2010)</p>
<p>Consumo de 67 GJ/t para a concentração e 100-200 GJ/t para a refinação. Hancock (1984) propôs um consumo de energia total de 285,6 GJ/t de níquel obtido a partir de minérios sulfurosos e, a partir de minérios oxidados, 6,3 GJ/t para a concentração e entre 340-800 GJ/t para o refino. Valero (2002) mostrou que o consumo de energia elétrica varia de 67-200 GJ/t como os valores finais para obter este metal.</p>	<p>Chapman e Roberts (1983-a) Hancock (1984) Valero <i>et al.</i> (2002)</p>
<p>Etapas de fundição e refino consomem mais a energia primária e são responsáveis pelas maiores emissões de GEE, o transporte responde por 2 a 11% enquanto a mineração e concentração são responsáveis por 7 a 35%. As emissões de CO₂ são de 18 kg por tonelada de concentrado. As intensidades de energia de produtos de Ni são variáveis, que dependem das fontes de matérias-primas, das rotas de processos e de sub-produtos.</p>	<p>Eckelman (2010)</p>

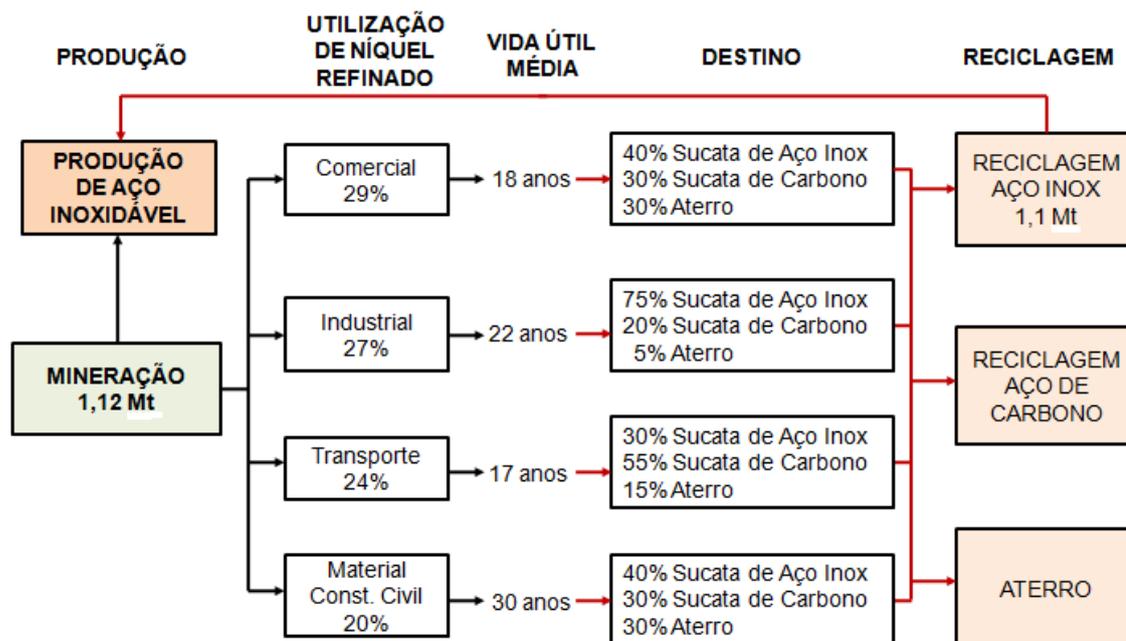


Figura 11: Fluxo de principais aplicações do níquel
(Fonte: adaptado de PETRIE, 2007; ECKELMAN, 2010).

2.3.4 A ACV DA PRODUÇÃO DO AÇO

A Figuras 12 e 13 e o Quadro 5, apresentam resumidamente estudos feitos com relação a ACV do aço, que também foram tomados como base para a elaboração do modelo da ACV do Nb.

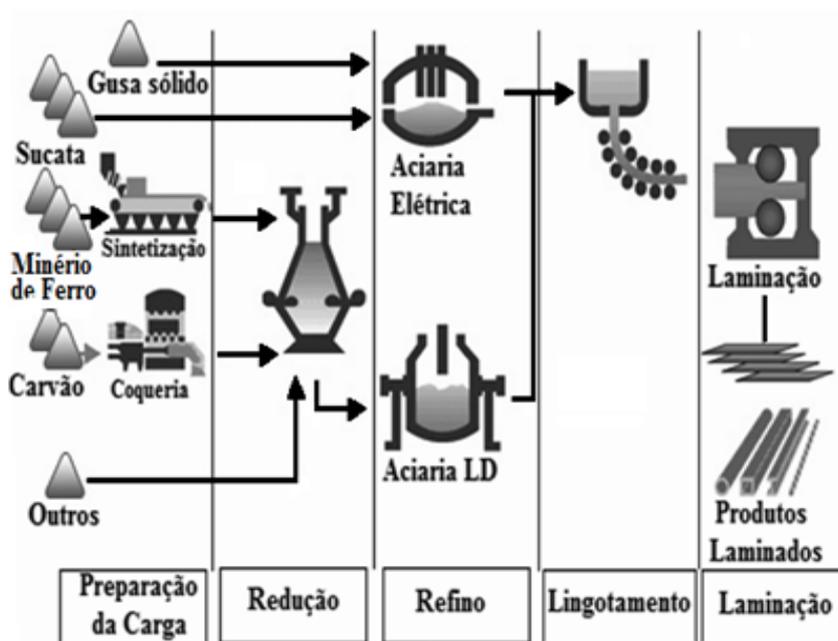


Figura 12: Fluxograma Simplificado da Produção do Aço (Fonte: IABr, 2010).

Quadro 5. Aplicação de ACV na produção do aço.

Descrição	Referência
<p>Em geral nas siderurgias até 75% das emissões de CO₂ oriundas da fabricação de aço ocorrem durante a produção de ferro-gusa no alto-forno, que corresponde à etapa de redução do minério de ferro. O percentual restante resulta do transporte de matérias-primas, da geração de energia elétrica e de calor.</p>	<p>IABr (2010) Yellishetty <i>et al.</i> (2011)</p>
<p>A quantidade de subprodutos da produção do aço gira em torno de 500 kg/t de aço bruto produzida, com as escórias siderúrgicas representando mais de 70% deste total. Em função da grande quantidade de escórias siderúrgicas geradas, as indústrias siderúrgicas estão em busca de alternativas para sua reciclagem, tendo a construção civil como mercado consumidor.</p>	<p>IABr (2010) Yellishetty <i>et al.</i> (2011)</p>
<p>No Brasil foram gerados 19,23 milhões de toneladas de resíduos em 2011, destacando-se a escória de aciaria. A cada tonelada de aço produzido são gerados entre 100 - 150 kg de escórias.</p>	<p>IABr, (2010) Yellishetty <i>et al.</i> (2011)</p>
<p>Há duas rotas para produção de aço: produção primária de aço usando minério de ferro e a produção secundária, que utiliza a sucata. O fluxograma simplificado de produção de aço é apresentado na Figura 12.</p>	<p>IABr (2010)</p>
<p>A fundição consome de 500 a 800 kWh/t. O alto-forno e a aciaria representam 60% da energia consumida em uma usina integrada. As <i>mini-mills</i> consomem 540 kWh/t, enquanto as integradas apenas 180 kWh/t. O consumo de energia bruta para a obtenção do aço líquido é duas vezes maior nas usinas integradas do que nas <i>mini-mills</i>, onde o consumo até a obtenção do produto final é 60% a 70% menor em relação à energia necessária às integradas.</p>	<p>Andrade <i>et al.</i> (2000) Smith <i>et al.</i> (2012)</p>
<p>O ciclo de vida de aço é apresentado na Figura 13.</p>	<p>Burchart-Korol (2009)</p>
<p>O processo de sinterização de minério de ferro é a fonte de emissão dominante na usina siderúrgica. Análises realizadas e a aplicação ACV para a tecnologia de processo de sinterização mostrou que a maior influência deste processo é o dano à "saúde humana" causada por efeitos respiratórios.</p>	<p>Burchart-Korol (2011) Yellishetty <i>et al.</i> (2011)</p>

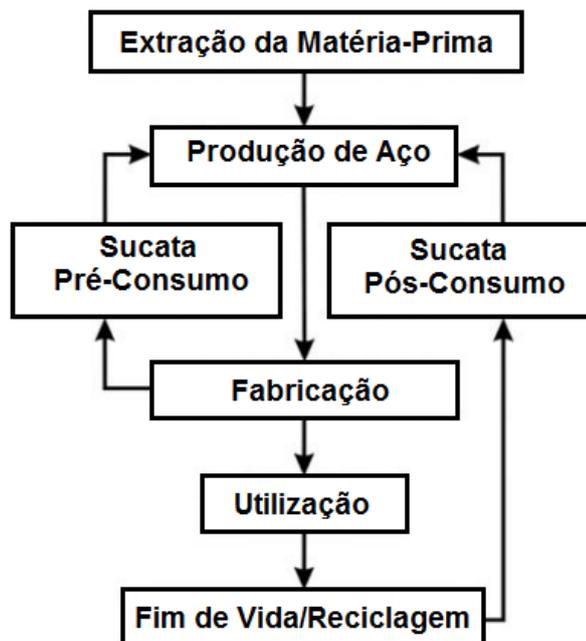


Figura 13: Fluxograma Simplificado da AVC do Aço (Fonte: adaptado de BURCHART-KOROL, 2011).

Portanto, diante dos processos de beneficiamento e produção dos metais apresentados anteriormente (alumínio, cobre, níquel e aço), observa-se que cada um possui uma rota de preparação, de geração de resíduos e de aplicação industrial, que compõem os respectivos fluxogramas do processo produtivo e, por consequência do próprio modelo de ACV. Assim, os dados relativos aos metais mencionados, foram tomados como base para compor o modelo proposto para a elaboração do fluxograma da ACV do nióbio.

Além disso, tem-se que o desempenho ambiental dos produtos e dos processos tornou-se um assunto primordial, de modo que a busca por maneiras de minimizar seus impactos sobre o meio ambiente tornou-se uma necessidade e, ao mesmo tempo, uma tendência mundial. Neste contexto, muitas empresas encontraram caminhos para melhoria de desempenho, que vão além das estratégias de prevenção e dos programas de gerenciamento ambiental, sendo que um destes caminhos consiste na metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (CURRAN, 1996).

2.4 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E MINERAÇÃO

Os seres humanos ao longo de sua existência desenvolveram a civilização, multiplicando e ocupando os ecossistemas, consumindo recursos naturais e gerando rejeitos de suas atividades. Na maior parte da história, obtiveram subsistência por meio de combinação de fatores, em busca de alimentos. Esta característica de vida permitiu ao homem se espalhar pela terra, na forma de organização que até hoje causou os menores danos ao meio natural, sendo admitida por toda uma linha da antropologia como o instante no qual a humanidade se encontrou em sua dimensão ótima quanto a estas interações do ponto de vista quanti-quali cultural (PONTING, 1995).

Esta dimensão tem se alterado nos últimos dois milênios. Em função do crescimento populacional, ocorreu o aumento em busca dos recursos naturais renováveis e não renováveis, tornando cada vez mais intensa estas mudanças e, também, distanciando a sociedade do ponto ideal de interface com o meio ambiente natural, criando um desequilíbrio natural (de OLIVEIRA *et al.*, 2013).

O Quadro 6 mostra um resumo em ordem cronológica, feito com base em pesquisa bibliográfica com relação aos conceitos e aplicações do tema DS no período de 1700 a 1980 e o Quadro 7 no período de 1980 a 2014.

Os dados mostrados nos Quadros 6 e 7 permitem observar a preocupação com as questões econômicas, sociais e ambientais desde 1798 e, a partir do século XIX, observa-se que a intensificação da industrialização e da agropecuária, a demanda por recursos naturais e os danos ao meio ambiente tornaram-se crescentes.

Nota-se o conceito de DS com denominação de eco-desenvolvimento no contexto das relações entre crescimento econômico e meio ambiente. Em 1987 é adotado o Protocolo de Montreal, voltado à eliminação de substâncias poluentes da camada de ozônio

Quadro 6. Linha do tempo do Desenvolvimento Sustentável (1700 a 1980).

Época	Foco	Referências
1798	O texto publicado em 1798: <i>Essay on Population</i> de Thomas Malthus, já apontava o desequilíbrio natural, que tem como foco central a conexão entre crescimento populacional e suas conseqüências sócio econômicas, apresentando a idéia de que o crescimento da população se dá em progressão geométrica à medida que o aumento da produção de alimentos se dá em progressão aritmética.	Hugon (1980); Vilas Bôas (2011)
Segunda Metade Século XVIII	Iniciou-se na Inglaterra a Revolução Industrial. Impulsionadas pelas pesquisas científicas, as fábricas passaram a dispor para os agentes econômicos uma infinidade de produtos, modificando o cotidiano e as relações econômicas, sociais e ambientais.	Clemente e Higachi (2000)
Meados século XIX	A escola neoclássica ignorou as relações dos recursos naturais com o sistema econômico, considerando a economia funcionando de forma independente do meio ambiente.	Meadows (1973).
1960	A partir do século XIX, com a intensificação da industrialização e da agropecuária, a demanda por recursos naturais e os danos ao meio ambiente tornaram-se crescentes, tal que a capacidade do planeta estava chegando ao limite, no final de 1960.	Finnveden <i>et al.</i> (2009)
1971	A revolução do pensamento econômico-ambiental ocorreu com a publicação de <i>The Entropy Law and the Economic Process</i> , cuja obra relaciona a economia com as leis da termodinâmica, e se aplica à natureza do processo econômico, bem como a maneira pela qual o homem está esgotando os recursos naturais.	Georgescu-Roegen (1986)
1972	“Primeira Cúpula da Terra” é realizada em Estocolmo, onde se adotam recomendações para o meio-ambiente, para o controle da poluição e alertas para mudanças climáticas.	Vilas Bôas (2011)
1973	Nasce o UNEP (<i>United Nations Environment Programme</i>) e o PNUMA (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente).	Vilas Bôas (2011)
Década 1970	Surge o conceito de desenvolvimento sustentável (DS), com denominação de eco-desenvolvimento, no contexto das relações entre crescimento econômico e meio ambiente, com base na publicação do Relatório do Clube de Roma, o qual pregava o crescimento como forma de evitar a catástrofe ambiental.	IBRAM (2012)
1979	Em Berlim é realizada a Conferência Internacional sobre o Eco-desenvolvimento e Eco-agricultura.	Vilas Bôas (2011)

Quadro 7. Linha do tempo do Desenvolvimento Sustentável (1980 a 2014).

Época	Foco	Referências
1984	É publicado o livro “Eco-desenvolvimento: conceitos, projetos, estratégias”	Weiep (2000)
1985	É pactuada a Convenção de Viena sobre a camada de Ozônio.	Vilas Bôas (2011)
1987	O relatório BRUNDTLAND consistiu em um modelo de desenvolvimento econômico harmonizado com a conservação ambiental, que visa não esgotar os recursos naturais para o futuro, por meio de um desenvolvimento político, social, cultural e ambiental equilibrado.	WCED (1987); Vilas Bôas (2011); Gallo <i>et al.</i> (2012)
1987	Adotado o Protocolo de Montreal, voltado à eliminação de substâncias poluentes da camada de ozônio.	(PAN, J.N., <i>et al.</i> 2009)
1990	Reavaliação do Protocolo de Montreal em Londres.	Vilas Bôas (2011)
1992	Reavaliação do Protocolo de Montreal em Copenhagen.	Gallo <i>et al.</i> (2012);
1995	Reavaliação do Protocolo de Montreal em Viena.	“
1997	Reavaliação do Protocolo de Montreal em Montreal.	“
1999	Reavaliação do Protocolo de Montreal em Pequim.	“
2005 a 2014	Educação para o Desenvolvimento Sustentável, através da orientação internacional da <i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation</i> (UNESCO)	Gadotti (2008) Fiorini e Jabbour (2014)

Os problemas ambientais que ameaçam a humanidade derivam principalmente da busca pela riqueza material e de problemas relacionados com a contaminação causada por produtos químicos. Outras características negativas incluem o consumo excessivo de bens, assim como o uso ineficiente e insustentável dos recursos naturais e seus produtos. Nos EUA, Alemanha e Holanda, são consumidos em torno de 85 toneladas de recursos naturais *per capita* por ano, enquanto no Japão, o consumo é por volta de 45 toneladas. Mesmo no Japão, cuja produtividade dos recursos é quase o dobro dos países pertencentes à OECD - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico, onde as taxas de reciclagem de metais não ferrosos ainda são baixas, sendo de 66% para o Cu e o Pb, de 54% para o Al, de 28% para o Cd e de 20% para o Zn. Portanto, em média, em torno de 50% dos metais não são aproveitados após o uso pelos países da OECD. Não obstante, no Canadá os metais reciclados, apresentam contribuição de 45% para a produção do ferro e

aço, de 43% para o Cu, de 32% para o Al, de 55% para o Pb, de 19% para o Zn e de 55% para o aço inoxidável (HALADA *et al.*, 2001).

Devido ao impacto que a mineração e produção de metais causam no meio ambiente, este setor tem sido foco de pesquisas voltadas a avaliação do ciclo de vida. Por exemplo, Kusik e Kenahan (1978), trabalhando para o *EUA Bureau of Mines*, apresentaram resultados sobre o uso de energia para a produção primária e secundária para muitos metais, assim como mostraram os benefícios da reciclagem na otimização do consumo de energia. Chapman e Roberts (1983-b) desenvolveram modelos energéticos para a produção de metais, assim como sua reciclagem.

McLellan *et al.* (2012) investigaram o potencial para reduzir as emissões de GEE na indústria metalúrgica utilizando oportunidades de sinergia com o desenvolvimento de energias renováveis. A abordagem estimou o uso de energia e as emissões atribuíveis à indústria de minerais nos principais países produtores, seguida de uma avaliação do potencial desses países para o uso de energia renovável para complementar as necessidades de mineração e processamento de minerais. A produção de aço e de cimento tem sido o foco de atenção no que diz respeito à produção de GEE devido à sua contribuição predominante para emissões industriais.

Alguns casos, em busca do desenvolvimento ecologicamente correto por parte das indústrias do setor de minerais ou no setor residencial, também foram examinados como uma oportunidade para reduzir os impactos ambientais globais e o uso de energia. Alguns setores, como a indústria de alumínio, que é fortemente dependente de energia elétrica no processo de oxi-redução, têm sido foco dos movimentos em busca de novas operações que permitam usar energias renováveis e seguras.

As emissões relacionadas à etapa de transporte da matéria prima, até o consumidor final dos produtos, são também importantes. Para o transporte a granel, as emissões são relacionadas com a massa e a distância. Quanto maior a separação geográfica entre o local de produção e o local de processamento, os componentes mais valiosos não contribuem para as

emissões do ciclo de vida do produto (LI *et al.*, 2011). As emissões atuais de transporte de minerais a granel são estimadas entre 2 e 9% das emissões do ciclo de vida de minerais importantes. A eliminação do transporte de minérios e concentrados (por processamento no local) poderia reduzir estas emissões.

A indústria de minerais é responsável por 15% do uso total de energia elétrica, 11% do consumo final de energia e 38% do consumo industrial de energia final. Incluindo a conversão de carvão de coque e de utilização em altos-fornos, bem como o uso direto, a indústria utiliza 19% de carvão e produtos de carvão, além de 5% de todo o gás natural e 2% de todo o óleo fornecido globalmente.

A indústria extrativa utiliza cerca de metade da energia em nível mundial com o processamento de metais não-ferrosos, ou 6% da indústria de minerais (IEA, 2010b; McLELLAN *et al.*, 2012).

A Tabela 3 mostra os dados relativos às emissões da indústria, às emissões específicas e uso de energia por tonelada de produto, assim como a emissão de GEE devido a queima de combustível (DCC, 2010) e consumo de energia elétrica (IEA, 2010a), com relação aos diversos setores para cada país. As relações de energia podem ser convertidas em energia primária, utilizando-se as taxas de eficiência estimadas para a conversão do combustível em eletricidade (McLELLAN *et al.*, 2012).

Tabela 3. Síntese da produção, do uso de energia e das emissões de carbono da indústria mineral.

Setor	Produção (Mt)	Consumo de Energia ^a (PJ)	Emissão de CO ₂ ^b (Mt CO ₂)	Relação de Energia (GJ/t de produção)	Proporção de Carbono ^b (t CO ₂ /t de produção)
Ferro e aço	1.330	25,1	2.551	18,8	1,92
Metais não-ferrosos	73	4.638,0	508	60,1	6,58
Minerais não-metálicos	3.921	13,2	1.120	3,4	0,29
Minas e Pedreiras ^c	20.000 40.000	2.651,0	241	0,07-0,13	0,006-0,012

(Fonte: McLELLAN *et al.*, 2012)

^a Consumo de energia final (no caso do ferro e do aço, isso inclui o carvão usado).

^b Emissões de CO₂ e relação carbono são baseadas apenas na queima de combustível. Emissões de CO₂ na produção de cimento são estimados em 1.500 Mt CO₂.

^c Há incerteza em torno dos números de produção para mineração e pedreiras.

As Tabelas 4 e 5 mostram a contribuição de cada setor mineral e fonte de energia usada na indústria e de emissões de GHG. Observa-se a maior contribuição para a energia e as emissões correspondentes ao uso de combustível fóssil (ECKELMAN, 2010; McLELLAN *et al.*, 2012).

Tabela 4. Contribuição de emissões GEE por setor e produto energético.

Setor	Eletricidade	Combustível Fóssil	Resíduos, Combustíveis, Energias Renováveis e Calor	Total (%)
Ferro e aço	11%	46%	0%	58%
Metais não-ferrosos	9%	3%	0%	12%
Minerais não-metálicos	6%	20%	0%	25%
Minas e Pedreiras	3%	2%	0%	5%
Total (%)	29%	71%	0%	100%

(Fonte: adaptado de ECKELMAN, 2010; McLELLAN *et al.*, 2012)

Tabela 5. Contribuição para o consumo total de energia por setor e produto.

Setor	Eletricidade	Combustível Fóssil	Resíduos Combustíveis Energias Renováveis	Calor	Total (%)
Ferro e aço	7%	46%	0.5%	1.1%	55%
Metais não-ferrosos	6%	4%	0%	0.2%	10%
Minerais não-metálicos	4%	24%	0.7%	0.3%	29%
Minas e Pedreiras	2%	3%	0%	0.2%	6%
Total (%)	19%	77%	1,2%	1,8%	100%

(Fonte: adaptado de ECKELMAN, 2010; McLELLAN *et al.*, 2012)

A pressão ambiental causada pela manufatura de metais tem resultado em programas voltados à redução dos impactos ambientais em determinadas fases do ciclo de vida dos produtos acabados. Devido ao aumento da sensibilização para as questões ambientais, clientes e financiadores das empresas de fabricação de metais tornaram-se interessados na gestão ambiental das empresas. A fim de responder às exigências dos mercados e melhorar o desempenho ambiental das empresas, começaram a dirigir sua atenção para a redução de intervenções (extração de matérias-primas, emissões e uso da terra) ao longo do ciclo de vida dos produtos. Além disso, em vários países da Europa, foram iniciados programas para mover o foco ambiental para produtos e sistemas de produção em busca do desenvolvimento ecologicamente sustentável, com base nos conceitos da eco-

eficiência, que expressa a eficiência com que os recursos ecológicos são utilizados para satisfazer as necessidades humanas (SEPPALA *et al.*, 2002).

2.5 RESÍDUOS SÓLIDOS

Até meados de 2010, o Brasil possuía legislação ambiental que tinha como concepção a prevenção do dano ambiental e como seu instrumento o Estudo de Impacto Ambiental (EIA), consolidado no Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), no qual era decidido o licenciamento ambiental (BARRETO, 1993).

Atualmente, a Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, instituiu no Brasil a Política Nacional de Resíduos Sólidos, a qual define resíduos sólidos, em seu Artigo 3º, inciso XVI, como: "material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade (...)". No mesmo Artigo, inciso VII, a Lei dos Resíduos Sólidos estabelece que a destinação final dos resíduos tenha que ser "ambientalmente adequada" e lista as opções da reutilização: reciclagem, compostagem, recuperação e o aproveitamento energético, definindo o gerador dos resíduos como responsáveis pela logística reversa.

No caso de impossibilidade técnica ou economicamente inviável do encaminhamento para uma dessas opções, os resíduos sólidos passarão a se denominar rejeitos.

O conjunto de artigos da lei que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos exige para seu cumprimento uma visão sistêmica de todos os envolvidos no processo de consumo do produto final e que estes considerem as variáveis ambiental, social, cultural, econômica, tecnológica e de saúde pública.

Ainda, a legislação traz a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto, delimitando as atribuições individualizadas entre fabricantes, importadores, distribuidores, consumidores e dos titulares dos serviços público de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos. Seguindo o conceito de ciclo de vida do produto como: "série de etapas que envolvem o

desenvolvimento do produto, a obtenção de matéria prima e insumos, o processo produtivo e a disposição final”.

A norma prioriza a ordem ideal como metas a serem atingidas no gerenciamento dos resíduos sólidos, quais sejam: não geração; redução; reutilização; reciclagem; tratamento e disposição final ambientalmente adequada (MANSANO *et al.*, 2012; MONTEIRO *et al.*, 2014).

Na atividade de mineração grandes volumes e massas de materiais são extraídos e movimentados. A quantidade de resíduos gerada pela atividade depende do processo utilizado para a extração do minério, da concentração da substância mineral estocada na rocha matriz e da localização da jazida em relação à superfície (ABRÃO, 1987; FEAM, 2010).

No caso do nióbio, os rejeitos gerados no processo de beneficiamento do minério de Nb são provenientes das etapas de separação magnética, deslamagem e flotação. Segundo Abrão (1987), o primeiro rejeito gerado no processo consiste na magnetita, que é removida do minério por meio de separadores magnéticos, mostrado na Figura 14. Na seqüência, Figura 15, ocorre a deslamagem, na qual o minério passa por baterias de ciclones nas quais as frações granulométricas inferiores a 0,005 mm são removidas do minério e direcionadas para a barragem de rejeitos por gravidade e por meio de um canal. A última etapa da concentração é a flotação, mostrada na Figura 16, constituindo o terceiro tipo de rejeito da planta industrial, que é também encaminhado por gravidade até a barragem de contenção de rejeitos.

Segundo Trevizan (2013), o aproveitamento de rejeitos torna-se viável quando pode ser comercializado na forma de subproduto. Nesse sentido, tem sido realizadas pesquisas para o desenvolvimento de novas tecnologias com objetivo de reaproveitamento de subprodutos oriundos dos rejeitos que apresentem valor agregado, de modo a contribuir com as questões de sustentabilidade da mineração, além de obter benefícios financeiros.



Figura 14: Unidade de concentração: (a) Separadores magnéticos; (b) Saída da Magnetita (Fonte: LEMOS JÚNIOR, 2012).



Figura 15: Unidade de Concentração: etapa de Deslamagem (Fonte: LEMOS JÚNIOR, 2012).



Figura 16: Unidade de Concentração: Etapa de Flotação (Fonte: LEMOS JÚNIOR, 2012).

Segundo Trevizan (2013), o aproveitamento de rejeitos torna-se mais atrativo quando na medida em que se torna viável a comercialização desse rejeito como uma forma de subproduto. Nesse sentido, tem sido realizadas pesquisas para o desenvolvimento de novas tecnologias com objetivo de reaproveitamento de subprodutos oriundos dos rejeitos que apresentem valor agregado, de modo a contribuir com as questões de sustentabilidade da mineração, além de obter benefícios financeiros.

Ainda, segundo Menezes *et al.* (2002), do ponto de vista econômico, as principais razões que motivam os países a reciclar seus rejeitos são: a maior demanda por recursos minerais, o esgotamento das reservas de matérias primas de origem mineral, visto que não são recursos renováveis, o crescente volume de resíduos sólidos, que põe em risco a saúde pública, ocupa o espaço e degrada os recursos naturais.

Além do aproveitamento direto de rejeitos das usinas de beneficiamento, é importante ressaltar a possibilidade de reuso de parte dos minerais já processados que se encontram em barragem de rejeitos, no sentido de proporcionar o aumento da vida útil dos minerais, *i.e.*, de estender seu ciclo de vida. A reciclagem preserva os principais insumos de matérias-primas minerais e reduz a necessidade de abertura de novas minas com impactos ambientais associados. Além disso, em muitos casos, o processamento secundário de matérias-primas minerais é ambientalmente menos nocivo e necessita de menos energia do que a produção de matérias-primas minerais primárias.

A Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM-b, 2014) iniciou em maio de 2012 a produção de concentrados refinados de terras raras em sua unidade de Araxá (MG). Os metais são extraídos dos rejeitos de nióbio, e a produção atinge a 3 mil toneladas de concentrado por ano. A partir desses rejeitos a mineradora extrai duplos sulfatos e hidróxidos de metais como neodímio e praseodímio, em processo até então inédito no Brasil. É a primeira vez no mundo que as terras raras são obtidas como subproduto da produção de nióbio (GEOFÍSICA BRASIL, 2012).

2.5.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DOS REJEITOS

Os teores de Nb_2O_5 e os rejeitos gerados em atividades de mineração do nióbio têm suas características químicas e mineralógicas diretamente ligadas ao minério explorado, às formações geológicas e geoquímicas da mina e ao processo de beneficiamento. Na planta industrial localizada em Araxá/MG, o minério é lavrado a partir do denominado Complexo Carbonatítico do Barreiro. O complexo é aproximadamente circular, com um diâmetro de superfície de 5km. Cerca de 90 milhões de anos atrás sua intrusão nos quartzitos e xistos do Grupo Araxá causou arqueamento que deu origem a uma estrutura abobadada com fraturas concêntricas e radiais, bem como intensa quebra dos quartzitos. O complexo dispõe de anomalias magnéticas e radioativas, especialmente no centro (ISSA FILHO *et al.*, 2001; SANTANA *et al.*, 2008; KLEMME, 2010).

A geologia local é constituída basicamente por carbonatito dolomítico com carbonatite calcita subordinada, glimmerite phlogopite e o minério primário. Este último está presente em carbonatite plutônico fresco formando o núcleo da estrutura, e consiste de cumulatos contendo magnetite com ilmenite, flogopite, pirocloro e ilmenite com apatita associado. Os cumulatos são cortados por veios finos de diferentes larguras e tamanhos de grãos compostas de várias associações minerais, que inclui os principais elementos: a magnetita, flogopita, dolomita, Fe-Cu, sulfuretos minerais, carbonato de bário (*norsethite*). A presença de carbonato de bário em carbonatite é incomum, mas pode ser uma consequência da presença de um manto rico em Ba, refletida por altos teores de Ba em muitos compostos neoproterozóico, mesozóica e rochas ígneas terciárias na região (ISSA FILHO *et al.*, 2001; OLIVEIRA *et al.*, 2007; SANTANA *et al.*, 2008; KLEMME, 2010).

2.5.2 BARRAGEM DE REJEITOS

Segundo Martin *et al.* (2002), as estruturas usadas para disposição de rejeitos devem ser operadas por completo e com manutenções periódicas que garantam sua segurança. Além disso, a integridade física e ambiental deve ser mantida sempre, inclusive após o seu fechamento.

Após cada etapa de beneficiamento, os rejeitos são encaminhados para a barragem de contenção, seja por bombeamento (como é o caso da magnetita), ou por gravidade, como ocorre com a lama e os rejeitos da flotação.

No Brasil, a maior parte dos rejeitos é descartada das unidades de concentração na forma pastosa, ou de polpa, que consiste de uma mistura de água e sólidos, que são armazenados em uma barragem ou dique. Estes materiais apresentam basicamente três tipos de comportamento: líquido sobrenadante, com tendência à floculação das partículas de menor tamanho; rejeito em processo de sedimentação apresentando comportamento semi-líquido a semi-viscoso; e rejeito em processo de adensamento comportando-se como um material particulado.

As barragens de rejeitos são construídas, em alguns casos, por meio da utilização do próprio rejeito, na forma de um dique construído em solo compactado (Figura 17). Os principais métodos construtivos empregados são: método de alteamento para montante, método de alteamento para jusante e de alteamento por linha de centro. Os principais fatores a serem analisados para a escolha do método construtivo mais adequado são: a natureza do processo de mineração, as condições geológicas e topográficas da região, as propriedades mecânicas dos materiais e a composição química do rejeito. De acordo com Vick (1983), existem casos em que as características químicas dos rejeitos podem ser determinantes na definição as melhores formas de disposição.



Figura 17: Barragem de Rejeitos. (Fonte: CBMM-b, 2014)

Os sistemas de disposição de rejeitos devem ser projetados para resíduos classificados como: inertes, não inertes e perigosos, de acordo com a norma NBR 10.004 (ABNT, 2004). No projeto de disposição dos resíduos que se enquadram nas duas últimas classificações é necessária a utilização de sistemas de impermeabilização. Dentre as alternativas destacam-se as camadas de argila compactada e a utilização de geossintéticos, como geomembranas e/ou geocompostos; além de camadas de concreto, mantas impregnadas com diversas substâncias (exemplo de betume impregnado a um geotêxtil), geocompostos argilosos (GCL), geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD) e polivinil clorado (PVC).

2.5.3 GERAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS

Os resíduos sólidos, resultantes do processamento dos minerais, são caracterizados em função da procedência natural, das etapas do processo de beneficiamento, de produção do metal, das diversas formas de aplicação industrial e de seus subprodutos. Com relação ao Nb, os resíduos são classificados da seguinte forma (SEMAD, 2012):

- **Estéril** – consiste de material proveniente da mina sem teores minerais de interesse para o aproveitamento industrial, que é retirado para viabilizar as operações de lavra. Não é perigoso e, portanto, depositado a céu aberto;
- **Escória de aluminatos** – corresponde aos resíduos gerados na unidade de metalurgia, para produção de ferronióbio tipo *standard*. Compreende reação aluminotérmica que ocorre em forno elétrico, do concentrado de Nb com outros insumos, como o pó de alumínio, óxido de ferro em pó ou sucata de ferro e cal. Consiste de um resíduo classificado como de Classe II;
- **Escória de alumina** – consiste de resíduos sólidos gerados na unidade de ligas especiais, por exemplo, na produção de FeNb-VG e NiNb-VG, a partir de óxido de nióbio; Trata-se de um resíduo Classe II.
- **Sólidos do processo de refino do concentrado** – Compreendem os resíduos coletados nos filtros de mangas da unidade de desfosforação, de modo que são classificados como resíduos Classe I.

2.6 IMPACTOS AMBIENTAIS LIGADOS À EXPLORAÇÃO MINERAL

De acordo com Brasil (2001a), o equacionamento da questão ambiental na mineração, por diversas razões, é diferente dos outros setores econômicos, destacando-se:

- A primeira razão é derivada do fato de que o objeto da atividade mineral consiste na extração de um recurso natural, ao contrário dos outros setores, que simplesmente os incorporam à sua atividade produtiva;
- A segunda razão é que esse recurso natural é classificado como não-renovável. Isso porque, para essa visão e usando um *slogan* ilustrativo, “minério não dá duas safras”. Essa concepção teve sua maior expressão política a partir da 2ª Guerra Mundial e se estendeu até a década de 1980;
- A terceira razão, diz respeito ao tipo de recuperação das áreas degradadas, uma vez que o objeto da atividade é o próprio recurso mineral. É impossível a recuperação da área com base no princípio da reconstituição, uma vez que o minério retirado, não poderá ser repostos;
- A quarta razão é o impacto ambiental gerado pelo setor mineral, o visual, que é confundido como “o impacto”, particularmente nas minas e atividades extrativas a céu aberto. Esse dano necessita ser levado em conta, pois sua relevância é enorme, não propriamente pelas causas objetivas que provoca, mas pelas subjetivas, as psicológicas, sobre as pessoas e instituições, governamentais e não-governamentais, nacionais e estrangeiras.

De acordo com o estudo da Secretaria de Ciência e Tecnologia do Estado de São Paulo (1987), elaborado pelo Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo (IPT), os principais impactos ambientais da atividade de mineração são: alteração de lençol de água subterrâneo, poluição sonora, visual, da água, ar e solo, impactos sobre a fauna e a flora, assoreamento, erosão, mobilização de terra, instabilidade de taludes, encostas e terrenos em geral, lançamento de fragmentos e vibrações.

Segundo Brasil (2001a), existem diversos instrumentos utilizados para minimizar impactos ambientais causados pelo desenvolvimento de atividades econômicas consideradas efetiva ou potencialmente poluidoras, tais como:

- Os **legais**: referentes ao licenciamento ambiental, estudo e relatório de impacto ambiental, plano de controle ambiental, recuperação de áreas degradadas;
- Os **econômicos**: incentivos, caução ambiental e,
- Os **técnicos**: desenvolvimento de novas tecnologias e parâmetros ambientais.

A radiação natural tecnologicamente aumentada *Technologically Enhanced Natural Radioaction – TENR*, consiste de uma gama de atividades industriais, que englobam, desde a produção de energia elétrica não nuclear, a extração e refino de minérios, até a reciclagem de rejeitos industriais (BAXTER, 1996).

Muitas indústrias não nucleares são capazes de gerar exposições importantes a grupos críticos, ou exposições coletivas à radiação, ou ambas. Estas exposições poderão ser incorridas tanto por trabalhadores, quanto pela população que vive nas circunvizinhanças das indústrias, ou mesmo por população remota pelo uso de subprodutos. No entanto, é importante notar que, nos processos industriais, tais como os associados à extração e processamento de minérios que contém urânio e tório associados ao mineral principal, o risco à saúde devido à radiação deve ser considerado, mesmo sendo reduzido quando comparado aos causados pelas substâncias químicas empregadas no processo e que possam ser liberadas no meio ambiente. Por este motivo, geralmente não são feitas avaliações de impacto radiológico naquelas instalações. Além disso, não são feitos monitoramentos da radiação no meio ambiente, uma vez que não existe a percepção do risco nem regulamentação que o exija. Como consequência, os dados para a avaliação da exposição são baseados em informações incompletas e estudos isolados, embora a sua quantificação seja relevante (PIRES do RIO *et al.*, 2002).

As atividades de mineração e beneficiamento de minérios podem conduzir a exposições à TENR. De acordo com Pires do Rio (2002), um dos exemplos

consiste no caso da mineração e beneficiamento de urânio, com exposições podendo ocorrer com os próprios mineiros, com a população que vive nas proximidades ou que faz uso da água da drenagem pluvial daquelas áreas, com a população que utiliza material proveniente das bacias de rejeitos para fins de construção, entre outros.

A mineração e moagem de minérios com níveis de elementos radioativos podem levar o impacto ambiental em córregos de água, solos e aquíferos, e a valorização da exposição do público à radiação natural. Esse impacto pode ser observado durante a fase operacional das instalações mineradoras e após a cessação das atividades (UNSCEAR, 1993).

Entre os radionuclídeos de maior toxicidade para o homem destacam-se o ^{238}U , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{222}Rn , ^{210}Pb , ^{210}Po , e ^{232}Th . Estes são chamados de radionuclídeos de meia-vida longa das series naturais do ^{238}U e ^{232}Th (CETEM, 2003).

A exploração e o beneficiamento do pirocloro apresentam impacto ambiental que pode ser caracterizado pelas etapas que iniciam com a própria exploração do minério, por meio de escavação e movimentação do minério; seguido pelo beneficiamento com vista à concentração do minério e sua industrialização. Estudos feitos por Pires do Rio (2002) constataram fontes de possíveis impactos ambientais, de caracterísitica radiológica, durante a operação e após o encerramento das atividades.

Segundo Pires do Rio (2002), o Nb ocorre no bariopirocloro, que é essencialmente um complexo óxido/hidróxido de nióbio, bário, titânio, e de terras raras do grupo do cério e tório. Ou seja, consiste de um minério radioativo devido à presença de tório, na matéria prima original, tanto no bariopirocloro quanto na monazita. O minério apresentou um teor de urânio e tório de aproximadamente 75 e 1570 ppm, respectivamente.

A Tabela 6 apresenta a caracterização radiológica das amostras do processo operacional no estudo de Pires do Rio *et al.* (2002), na mineradora de Minas Gerais. O beneficiamento físico (separação magnética, deslamagem e flotação) não alterou de modo significativo as concentrações de atividade dos

radionuclídeos no material, uma vez que não houve ataque químico à matriz geológica do mineral. O beneficiamento químico envolveu a etapa da lixiviação clorídrica do minério e conduziu a diferenças expressivas nas concentrações dos radionuclídeos nas etapas subseqüentes, em relação ao minério.

Tabela 6. Caracterização radiológica das amostras de processo da mineradora.

Etapa do Processo	Concentração de Atividade (Bq/kg)				
	²³⁸ U	²²⁶ Ra	²¹⁰ Pb	²³² Th	²²⁸ Ra
Minério	930 ± 62	805 ± 97	1330 ± 231	6390 ± 655	5176 ± 716
Separação Magnética	1091 ± 74	340 ± 43	720 ± 63	863 ± 90	750 ± 166
Deslamagem	1265 ± 83	1381 ± 158	2029 ± 311	8995 ± 924	5278 ± 720
Flotação	770 ± 50	990 ± 120	2440 ± 360	3100 ± 320	1440 ± 243
Concentrado de Pirocloro	14620 ± 955	1370 ± 156	710 ± 162	83000 ± 8500	8900 ± 1285
Sulfato de Bário	42 ± 2	26250 ± 3100	7400 ± 1000	43 ± 1	197000 ± 27600
Escória Metalúrgica	23138 ± 1520	3290 ± 313	2400 ± 355	117600 ± 12000	20200 ± 3606

(Fonte: adaptado de PIRES do RIO *et al.*, 2002)

O rejeito da separação magnética apresentou as menores concentrações de atividade dos diversos radionuclídeos analisados, sendo que a deslamagem apresentou as maiores concentrações.

Os rejeitos associados ao sulfato de bário e à escória metalúrgica apresentaram os teores mais elevados de radionuclídeos em comparação aos demais rejeitos do processo operacional. Com base nestes resultados, Pires do Rio (2002) inferiu que os rejeitos de sulfato de bário e da escória metalúrgica são fontes potenciais de impacto ambiental e de exposição à radiação.

Os resultados do fluxo de atividade radioativa gerados em cada etapa do processo operacional estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Fluxo de atividade radioativa gerado pela mineradora.

Etapa do Processo	Fluxo de atividade radioativa (Bq/ano)					
	²³⁸ U	²²⁶ Ra	²¹⁰ Pb	²³² Th	²²⁸ Ra	Total
Minério (145 [*])	1,1.10 ¹²	9,8.10 ¹¹	1,6.10 ¹²	7,8.10 ¹²	6,3.10 ¹²	1,8.10 ¹³
Separação Magnética (22 [*])	2,0.10 ¹¹	6,3.10 ¹⁰	1,3.10 ¹¹	1,6.10 ¹¹	1,4.10 ¹¹	6,9.10 ¹¹
Deslamagem (17,3 [*])	1,8.10 ¹¹	2,0.10 ¹¹	2,9.10 ¹¹	1,3.10 ¹²	7,7.10 ¹¹	2,7.10 ¹²
Flotação (89,7 [*])	5,8.10 ¹¹	7,5.10 ¹¹	1,8.10 ¹²	2,3.10 ¹²	1,1.10 ¹²	6,5.10 ¹²
Escória Metalúrgica (3 [*])	5,8.10 ¹¹	8,3.10 ¹⁰	6,1.10 ¹⁰	3,0.10 ¹²	5,1.10 ¹¹	4,2.10 ¹²
Sulfato de Bário (0,6 [*])	2,1.10 ⁸	1,3.10 ¹¹	3,7.10 ¹⁰	2,2.10 ⁸	9,9.10 ¹¹	1,2.10 ¹²

(*) Fluxo de Massa, th (Fonte: adaptado de PIRES do RIO *et al.*, 2002)

A tabela 7 mostra, com relação ao valor dos somatórios dos fluxos a partir de cada etapa do processo operacional que, no caso do ²³²Th, 44% da atividade é resultante do processo junto à escória metalúrgica, sendo esta a etapa mais significativa para o radionuclídeo; também, mostra que o processo de deslamagem foi responsável por 20% do total. Para o ²³⁸U a escória metalúrgica respondeu pelo mesmo percentual em relação à flotação. Estes resultados mostraram que as duas etapas são igualmente significativas em relação à atividade radioativa gerada no processo, ou seja, o material estéril de mineração, a escória metalúrgica, o sulfato de bário e os rejeitos de flotação, constituem fontes potenciais de comprometimento radiológico ambiental, mesmo após o encerramento das operações.

Segundo Pires do Rio (2002), os resultados obtidos mostraram que a área não pode ser liberada para utilização irrestrita, com valores de dose, para todos os tipos de rejeitos, superiores a 10 mSv/ano, de modo que as doses estimadas devido à utilização da escória metalúrgica são superiores às aquelas estimadas para o material estéril. Estes resultados mostram que os rejeitos não podem ser utilizados como aterro, para a construção de casas, uma vez que o nível para intervenção para radônio dentro de casa é de 10 mSv/ano.

Os resultados preliminares obtidos indicam um impacto potencial da ordem de 0,03 mSv/ano, devido à liberação de efluentes líquidos das bacias de rejeitos, sendo os radionuclídeos que mais contribuem para a dose são ^{210}Pb e ^{238}Ra .

2.7 TERRAS RARAS

As terras raras (TR) compreendem um grupo de 17 elementos químicos metálicos de ampla distribuição na crosta terrestre, mas em baixas concentrações. As maiores reservas encontram-se na China, na Comunidade dos Estados Independentes (CEI), nos Estados Unidos da América (EUA), na Índia e na Austrália. Além dos escassos recursos minerais que lhe servem de matéria-prima, a sintetização de cada elemento requer alta tecnologia, o que onera substancialmente a cadeia de produção (ROCIO *et al.*, 2012).

As reservas brasileiras de TR localizam-se nos estados de Minas Gerais e do Rio de Janeiro e totalizam cerca de 31 mil toneladas de metais contidos. Sabe-se, também, que o país dispõe de reservas minerais significativas, ainda não exploradas, localizadas nos municípios de Presidente Figueiredo (AM) e de Catalão (GO) (GWMG, 2009; ROCIO *et al.*, 2012).

A maioria dos elementos constituintes das terras raras é utilizada na indústria eletroeletrônica e em produtos de alta tecnologia, como LED's (*Light Emitting Diodes*), catalisadores para produção de gasolina, turbinas eólicas, motores elétricos, entre outros. O aumento da produção no segmento industrial da eletrônica, como os dispositivos de informática e de telecomunicações, assim como na indústria de motores elétricos tem contribuído para o aumento da demanda e da importância das terras raras na economia e indústria (BUYS, B., 2012). O Quadro 8 mostra algumas das principais aplicações das TR.

No Brasil, uma mineradora do Estado de Minas Gerais desenvolveu tecnologia para produzir comercialmente os concentrados refinados de terras raras, em sua unidade de Araxá (MG). Os metais são extraídos dos rejeitos de nióbio (GEOFÍSICA BRASIL, 2012).

Quadro 8. As principais aplicações dos elementos de TR.

Elemento	Símbolo	Aplicações
Escândio	Sc	Em ligas de alumínio para componentes aeroespaciais; adicionado ao mercúrio em lâmpadas a vapor.
Ítrio	Y	Em laser de ítrio-alumínio; supercondutores de alta temperatura; em vanadato de ítrio como receptor do európio (pigmento em tubos de raios catódicos); filtro de micro-ondas de ítrio-ferro.
Lantânio	La	Vidros de alto índice de refração; armazenamento de H ₂ ; eletrodos de bateria; lentes de câmeras; catalisadores de fluidos em refinarias de petróleo.
Cério	Ce	Agente oxidante; pó para polimento; colorante em vidros e cerâmicas; catalisadores em fornos autolimpantes; catalisadores de fluidos em refinarias de petróleo.
Praseodímio	Pr	Ímãs; lasers; iluminação de arco de carbono; colorantes em vidros e esmaltes; aditivo em lentes de óculos de soldagem.
Neodímio	Nd	Ímãs; lasers; colorante violeta em vidros e cerâmicas; capacitores de cerâmica.
Promécio	Pm	Baterias nucleares.
Samário	Sm	Ímãs; lasers; captura de nêutrons.
Európio	Eu	Pigmento em tubos de raios catódicos; lasers; adicionado ao mercúrio em lâmpadas a vapor; agente de relaxação em RMN.
Gadolínio	Gd	Ímãs; vidros de alto índice de refração; lasers; tubos de raios X; chips de memória; captura de nêutrons; agente de contraste em imagens de RMN.
Térbio	Tb	Ímãs permanentes; pigmento verde em tubos de raios catódicos; lasers; lâmpadas fluorescentes.
Disprósio	Dy	Ímãs permanentes; lasers.
Hólmio	Ho	Lasers.
Érbio	Er	Lasers; liga de aço-vanádio.
Túlio	Tm	Máquinas portáteis de raios X
Itérbio	Yb	Lasers de infravermelho; agente químico redutor.
Lutécio	Lu	Detectores para tomografia por emissão de pósitrons; vidros de alto índice de refração.

(Fonte: adaptado de JHA, 2014).

2.8 O NIÓBIO – BREVE HISTÓRICO

O expressivo potencial das reservas brasileiras de pirocloro concede ao Brasil posição destacada no cenário internacional, pois além de deter tais recursos é o maior produtor do minério, inclusive sob a forma de concentrado e do principal produto metalúrgico, a liga de ferronióbio (BRASIL, 2010).

Os recursos e reservas de Nb estão concentrados nos seguintes estados: Minas Gerais (75%), no município de Araxá; Amazonas (23%), no município de São Gabriel da Cachoeira; Goiás (2%), nos municípios de Catalão e Ouidor. Em termos geológicos, esses depósitos estão associados ao Complexo Carbonático-Alcalino (BRASIL, 2010).

O Quadro 9 mostra, resumidamente, a história da descoberta do mineral nióbio.

Quadro 9. Linha do tempo do Nióbio.

Época	Descrição	Referências
1801	Primeiro relato da existência do nióbio pelo químico Charles Hatchett. Nomeou-o como “colúmbio” em homenagem a Cristóvão Colombo.	Oliveira (2006); Quellas (2007)
1844	O nome nióbio foi dado por Heinrich Rose, que extraiu o metal de uma amostra de tântalo. Foi em homenagem a deusa grega Nióbe, filha do rei mitológico Tântalo.	Oliveira (2006); Quellas (2007)
1892	Descobertas no Brasil as primeiras jazidas de pirocloro pelo geólogo Eugenio Hussak na região de Catalão-GO.	CBMM-a (2012)
1950	A União Internacional de Química Pura e Aplicada (<i>International Union on Pure and Applied Chemistry</i> – IUPAC) adotou oficialmente o nome nióbio (Nb) embora o nome colúmbio ainda seja utilizado em alguns países.	Oliveira (2006); Quellas (2007)
1953	O geólogo Djalma Guimarães descobriu jazidas de Nb em Araxá-MG. Sua exploração só se iniciou uma década depois.	CBMM-a (2012)
Década 1950	Foram descobertas reservas de Nb na forma de óxido, chamado também de pirocloro.	Quellas (2007)

2.8.1 O NIÓBIO – OCORRÊNCIA NATURAL

O Nb possui uma grande afinidade geoquímica com o tântalo. Isto faz com que ambos apresentem propriedades semelhantes e sejam encontrados juntos na maioria das rochas e minerais presentes na natureza. Em geral, estes minerais são denominados tantalitas quando apresentam uma predominância de tântalo e de columbitas quando há a predominância de Nb. Estes minerais podem ser confundidos com a magnetita, ilmenita e cassiterita pela semelhança de aspectos. A Tabela 8 apresenta as principais espécies de minerais à base de Nb, dentre as 90 já catalogadas e encontradas na natureza (DNPM, 2013).

Até a descoberta, quase simultânea na década de 1950, no Canadá e no Brasil, de depósitos de pirocloro (nome dado ao minério nióbio), associado a carbonatitos, o uso do Nb tinha oferta limitada, tendo-se em vista que era um subproduto do tântalo e de custo elevado. A partir do início da produção primária de Nb, o metal ganhou importância no desenvolvimento de novos materiais metálicos (FERNANDES *et al.*, 2011).

Tabela 8. Principais minerais com incidência de Nb.

Mineral	Composição Química	Teor de Nb (%)
Columbita-Tantalita	(Fe, Mn) (Nb, Ta) ₂ O ₆	76
Pirocloro	(Na ₃ , Ca) ₂ (Nb, Ti) (O, F) ₇	71
Bariopirocloro	(Ba, Sr) ₂ (Nb, Ti) ₂ (O, OH) ₇	67
Loparita	(Ce, Na, Ca) ₂ (Ti, Nb) ₂ O ₆	20
Pandaíta	(Ba, Sr) ₂ (Nb, Ti, Ta) ₂ (O, OH, F) ₇	Não informado

(Fonte: adaptado de DPNM, 2009)

No minério primário, *i.e.*, na rocha original, as maiores concentrações de Nb são encontradas na porção central da estrutura rochosa. O minério primário contém carbonatos, flogopita, magnetita e apatita; é usualmente rico em pirocloro, o mineral-minério de Nb (CBMM-a, 2012).

A concentração média de Nb no minério primário é de 1,5% de Nb, enquanto os teores máximos atingem 8% de Nb. As reservas de Nb são praticamente inesgotáveis, considerando o seu mercado atual (CBMM-a, 2012).

Segundo o *United States Geological Survey* - USGS, os recursos globais identificados de Nb alcançam três milhões de toneladas. Esses recursos estão concentrados no Brasil (86,7%), seguindo a Austrália (10,7%) e o Canadá (3,1%). O USGS considera que os recursos mundiais conhecidos são suficientes para atender as necessidades mundiais no longo prazo.

2.8.2 AS PROPRIEDADES DO NIÓBIO

O metal prateado tem a característica de adquirir coloração azulada quando exposto ao ar durante um longo período e por possuir apenas um isótopo estável. Na tabela periódica, localiza-se no 5º período, grupo 5, bloco d (SOUZA *et al.*, 2013). A estrutura cristalina do Nb é cúbica de corpo centrado, apresenta parâmetro de rede (a) 0,3294 nm, diâmetro atômico de 0,294 nm e plano de cisalhamento [110]. Possui peso atômico de 92,9064 e massa específica a 20 °C de 8,57 g/cm³ (ASM, 1990; GRAHAM, 2001).

O Nb possui alto ponto de fusão e é um metal leve, resistente à corrosão e com elevada ductilidade à temperatura ambiente (GRILL *et al.*, 2006).

O Nb é resistente à corrosão devido à formação de uma película superficial de óxido, chamada de camada de passivação. Quando combinado, exibe vários estados de oxidação, sendo o +5 o mais comum. Em condições de temperatura ambiente, o metal não reage com hidrogênio, ar, água ou ácidos, exceto o fluorídrico e sua mistura com o ácido nítrico. Sob aquecimento reage com a maioria dos elementos não metálicos e gera produtos que frequentemente são intersticiais e não estequiométricos. Nessas condições, também é resistente ao ataque de bases fundidas, mas não a ácidos minerais (GREENWOOD, 2003).

As propriedades físicas e mecânicas do Nb são influenciadas pela pureza do metal, assim, mesmo pequenas quantidades de impurezas intersticiais causam degradação de propriedades do metal. As principais impurezas de produtos

semiacabados de Nb classe técnica, de acordo com especificação da *American Society for Testing and Materials* - ASTM, são: oxigênio, nitrogênio, hidrogênio, carbono, ferro, molibdênio e tungstênio.

Segundo Souza *et al.* (2013), as propriedades físico-químicas do Nb são semelhantes as do tântalo, tendo-se em vista de ocorrerem juntos na natureza. Um dos métodos de separação consiste em usar metil-isobutil-cetona em meio ácido (hidrometalurgia). Esse procedimento permite isolar o pentóxido de Nb (Nb_2O_5) que pode ser reduzido pelo alumínio (aluminotermia), gerando Nb e óxido de alumínio (AYANDA, 2011).

A Tabela 9 e a Tabela 10 mostram, respectivamente, as principais propriedades físico-químicas e mecânicas do Nb. Observa-se valores elevados de massa específica e do ponto de fusão, sendo superior a inúmeros metais ferrosos e não ferrosos. Seu elevado ponto de fusão permite seu uso como componente de diversas ligas metálicas.

Tabela 9. Propriedades físico-químicas do nióbio.

Propriedades	Valores
Peso molecular	92,906 kg/mol
Massa específica	8,570 Kg/m ³
Número atômico	41u
Estrutura cristalina	CCC
Parâmetro de rede a 20 °C	3.294 x 10 ⁻¹⁰ m
Raio iônico cristalino	0,690 x 10 ⁻¹⁰ m (Valence +5) 1,00 x 10 ⁻¹⁰ m (Valence +1)
Equivalente eletroquímico	450 kg/A/h
Eletronegatividade	1,6 (Pauling)
Resistividade elétrica a 20 °C	13,2 – 14.8 (10 ⁻⁶ ohm.m)
Susceptibilidade Magnética	2,28 x 10 ⁻⁶
Ponto de fusão	2,195 K
Ponto de vaporização	4,854 K
Calor de sublimação a 20 °C	7,18 x 10 ⁵ kJ/kg-atom
Calor de combustão a 20 °C	1,0 x 10 ⁴ kJ/kg
Calor de fusão	2,9 x 10 ⁵ J/kg
Calor de vaporização	7,704 x 10 ⁶ J/kg
Calor específico	272 J/kg.K
CTE, linear	(20 - 100 °C) 7.10 µm/m.K (500 °C) 7.61 µm/m.K
Condutividade térmica	(20 °C) 52.3 W/m.K
Temperatura crítica	(500 °C) 63.2 W/m.K 9,23 – 9,27 K

(Fonte: adaptado de TMS, 2001).

Tabela 10. Propriedades mecânicas do nióbio.

Propriedades mecânicas	Valores
Dureza, <i>Vickers</i>	80
Tensão de tração, final	300 MPa
Deformação de alongação	30%
Módulo de Elasticidade	103 GPa
Raio de <i>Poisson</i>	0,38
Módulo de Cisalhamento	37,5 GPa

(Fonte: adaptado de TMS, 2001).

2.8.3 A PRODUÇÃO DO NIÓBIO NO MUNDO

A produção mundial de concentrado de nióbio tem crescido ao longo dos anos, atingindo 89 mil t de Nb₂O₅ em 2008. Destaca-se que apenas dois países (Brasil e Canadá) respondem por 99% dessa produção. Em 2007 foram registrados dados reduzidos de produção de minério pela Austrália, Ruanda, Nigéria, Moçambique e Etiópia, que juntos não ultrapassaram a uma participação de 1% (BRASIL, 2010).

A maior parte da produção mundial é comercializada sob a forma de ferronióbio. No ano de 2008 a produção mundial de FeNb alcançou 86.095 t e a produção de Nb₂O₅ foi de 68.000 t (BRASIL, 2010). Por outro lado, a Tabela 11 mostra as contribuições e os principais produtores mundiais de FeNb e de Nb₂O₅ no ano de 2010 (USGS, 2010; LAGOS, 2010 ; IAMGOLD, 2012).

Tabela 11. Principais produtores de Nb no ano de 2010.

Empresa	Ferronióbio	Óxido de Nióbio
CBMM (Araxá, Brasil)	72.000 t	51.720 t
<i>Anglo American</i> Brasil (Catalão, Brasil)	7.580 t	5.000 t
Niobec-IAMGOLD (St-Honoré, Canadá)	6.515 t	4.300 t

(Fonte: USGS, 2010; LAGOS, 2010 ; IAMGOLD, 2012).

A empresa *Anglo American* produziu na mina de Catalão 5.100 t de Nb no ano de 2009. No ano de 2010 houve um expressivo aumento para 7.580 t,

operação que a coloca entre as três principais produtoras do mundo. Além disso, a empresa possui capacidade operacional na usina de concentração, para tratamento de 876 mil t/ano de minério, com produção de 7,2 mil t/ano de concentrado de pirocloro e produção de 7,5 mil t/ano da liga ferro nióbio (LAGOS, 2010).

Entre os maiores produtores mundiais de Nb, constam três minas em atividade, Araxá e Catalão (Brasil), lavradas a céu aberto, e *Saint Honoré* (Canadá) por meio de lavra subterrânea; que juntas respondem por cerca de 97% do minério produzido no mundo (Tabela 12). O restante da produção origina-se da columbita-tantalita e de escórias do estanho produzidas na Malásia, Tailândia e Nigéria (BRASIL, 2010).

Tabela 12. Principais Minas de Nióbio.

Discriminação	CBMM	Anglo American	Niobec
Localização	Araxá, Brasil	Catalão, Brasil	<i>Chicoutimi</i> , Canadá
Reservas (mil t)	+ 500.000	18.000	20.000
Teores (% Nb)	2,50	1,20	0,65
Mineração	Céu Aberto	Céu Aberto	Subterrânea
Ton/ano de FeNb	90.000	6.700	6.800
Vida Útil da Mina	+ 400 anos	+ 20 anos	+ 18 anos
Produtos	FeNb <i>standart</i> , óxido Nb <i>standart</i> , óxido Nb OG, NiNb-VG; FeNb-VG e Nb metálico	FeNb <i>standart</i>	FeNb <i>standart</i>

(Fonte: adaptado de *ROSKILL information services LTD*, 2009).

Por meio da produção da CBMM, vindo a seguir, com menor participação, as empresas *Anglo American* e a Mineração Taboca, o Brasil representa 98% da produção mundial, vindo a seguir, com insignificantes participações, o Canadá (Niobec) e a Austrália (BRASIL, 2010).

As empresas brasileiras possuem capacidades instaladas para a mineração e metalurgia, suficientes para o atendimento aos atuais níveis da demanda mundial, utilizam modernas tecnologias para a lavra, concentração e metalurgia e realizam investimentos significativos na ampliação e modernização do parque produtivo, como também na pesquisa e desenvolvimento de novos produtos a

base de nióbio, estimulando o aumento, a diversificação e a utilização do nióbio em produtos siderúrgicos e metalúrgicos (BRASIL, 2010).

Até 2008, a produção nacional manteve-se com tendência sempre crescente, passando de 35.458 t em 2000 para 86.000 t em 2008. Esse crescimento é explicado pela demanda da liga FeNb, refletindo o crescimento extraordinário da produção de aço em resposta ao crescimento econômico dos países industrializados, principalmente a China (BRASIL, 2010), como é mostrado na Figura 18. Nota-se também que, devido a crise internacional em 2008, houve uma diminuição na produção do Nb.

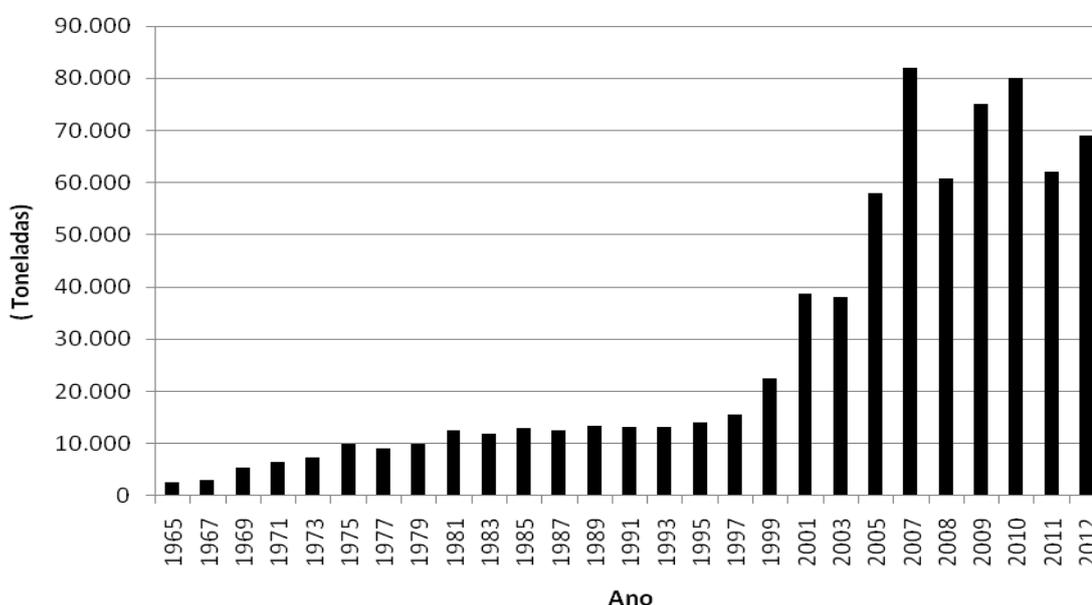


Figura 18: Evolução da produção de nióbio no Brasil (Fonte: *Globe Metals & Mining/USGS/BRAM*, 2012; ALVES e COUTINHO, 2015).

2.8.4 O PROCESSO INDUSTRIAL DA PRODUÇÃO DO NIÓBIO

O ferronióbio é produzido industrialmente por meio do processo pirometalúrgico, a partir de minério de piroclore que apresenta formulação típica: $(Ca, Na)_2 (Nb, Ta)_2 (O, OH, F)_7$ (ZHU, 2011). Produtos de Nb com elevado grau de pureza são geralmente produzidos, como subprodutos de tântalo por meio de processos hidrometalúrgicos (RITCEY, 2006). Por outro lado, o nióbio pode ser reciclado a partir do uso de sucata de ferro e aço, que é fundida em fornos elétricos (RAMACHANDRA, 2006).

2.8.4.1 O PROCESSO DE PRODUÇÃO DO FERRONIÓBIO

A operação para a obtenção de Ferronióbio é realizada em bateladas, em forno elétrico a arco, que tem por finalidade fundir uma mistura constituída de concentrado refinado, alumínio em pó, pó de ferro, sucata de ferro, pó metálico, hematita, cal granulada e fluorita, utilizando como fonte de energia o alumínio em pó e a energia elétrica (FEAM, 2010). O consumo de energia elétrica para a produção de 1 ton de FeNb é de 500 kw.h (FEAM, 2010a).

De maneira geral, as operações envolvidas no desenvolvimento do processo produtivo são:

- Recepção do minério proveniente da mina por meio de correia transportadora;
- Etapa de concentração, por meio das operações unitárias de moagem, separação magnética, deslame e flotação;
- Unidade de sinterização do minério por meio de filtragem, pelotização, sinterização em forno rotativo e britagem;
- Etapa de desfosforação em forno elétrico, seguido de granulação e secagem;
- O concentrado refinado segue para a elaboração dos produtos finais na Unidade de Metalurgia, por meio da redução aluminotérmica em forno elétrico, na planta química (óxidos), na unidade de ligas especiais grau vácuo, na unidade de nióbio metálico, de britagem e embalagem.

As etapas principais do processo de produção do ferronióbio estão apresentadas na Figura19.

A Figura 20 mostra que a mineração ocorre em céu aberto, na região de Araxá-MG.

A Figura 21 mostra o fluxograma simplificado da unidade de concentração do Nb, que resulta no concentrado final.



Figura 19: Fluxograma simplificado da produção do Ferronióbio.
(Fonte: adaptado de RIOS, 2011)

A lavra nas mineradoras do Brasil é feita a céu aberto, não sendo necessária a utilização de perfuração ou explosivos. Os equipamentos mais comuns utilizados na lavra são: o trator de esteira, a escavadeira, a carregadeira e caminhões.



Figura 20: Mina a céu aberto (Fonte: LEMOS JÚNIOR, 2012).

A partir da barragem, há o reaproveitamento de 95% da água, de modo que o consumo específico para o processamento do nióbio é da ordem de 6 m³/t de minério processado (ANGLO AMERICAN BRASIL – 2004).

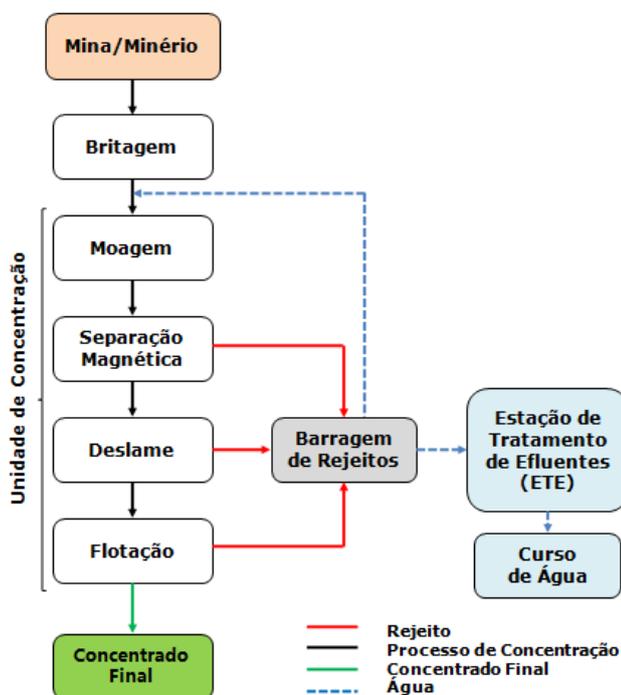


Figura 21: Fluxograma do processo de concentração do nióbio (Fonte: adaptado de LEMOS JÚNIOR, 2012).

De acordo com Rios (2011), o minério proveniente da mina, já britado, chega por meio de correia transportadora, passa por classificação, moagem, separação magnética, deslamagem e flotação. Tais operações visam obter um produto denominado de “concentrado de pirocloro”, ou simplesmente “pirocloco”, rico em óxido de nióbio, sendo da ordem de 55 a 60% de Nb.

A etapa de **britagem, ou moagem**, dispõe de um alimentador de placas, de peneira vibratória e de britador de impacto. O minério triturado é transportado por correias para os silos de concentração. Depois é descarregado, também por meio de correia transportadora, e alimenta um moinho de bolas. Assim, os grãos de pirocloro com diâmetro médio da ordem de 1 mm, após a moagem apresentam proporção em torno de 95% inferiores a 104 µm (ISSA FILHO *et al.*, 1984; SOUZA, 2001; BRASIL, 2010).

A **separação magnética** elimina a magnetita mineral com alto teor de fósforo. Por exemplo, o minério da região de Araxá contém de 10 a 25% de magnetita, que é removido por campo magnético de baixa intensidade (800-900 Gauss), por meio de separadores magnéticos. O minério não magnético é enviado para o processo de deslame e a fração magnética, contendo em torno de 67% de Fe é bombeada para depósito especial, onde é estocada para comercialização. A etapa seguinte, o **deslame** remove as frações de minério inferiores a 5 µm em ciclones de 25 mm. A flotação do pirocloro é sensível a presença de lama, de modo que o deslame é feito em três estágios de ciclonagem (ISSA FILHO *et al.* 1984; BRASIL, 2010).

A natureza laterítica do minério implica na existência de uma grande quantidade de finos, que se somam aos finos produzidos na moagem. A concentração do Nb é feita por **flotação** do pirocloro, na qual as partículas de pirocloro são expostas a reagentes químicos e coletadas em bolhas geradas pela injeção de ar no fundo das células. As frações sólidas não incorporadas pelas bolhas gasosas são removidas pela parte inferior das células; a polpa deslamada é condicionada por 15 minutos com coletor catiônico tipo amina, um agente umectante e um fluorsilicato de sódio. O concentrado flotado é espessado e logo filtrado, contendo altos teores de fósforo, enxofre e chumbo (BRASIL, 2010). Segundo Issa Filho *et al.*, (1984), o circuito de flotação é acidificado com ácido clorídrico e o pH é controlado entre 2,5 - 3,5. Após o processo de flotação (pirocloro e sulfuretos), os concentrados flutuados, com teor de umidade da ordem de 11% estão prontos para **refinação** (ISSA FILHO *et al.*, 1984) e os minerais segregados são dispostos em barragem de rejeitos (PEREIRA, 2006; RIOS, 2011).

O concentrado de pirocloro chega às **unidades de sinterização** por meio de tubulações ou recipiente do tipo *bags*, sendo associado com insumos para pelotização, sinterização, britagem e classificação. Além de propiciar a aglomeração do material, estas unidades destinam-se à retirada do enxofre e água contidos no concentrado. O produto é um concentrado sinterizado (SOUZA, 2001; PEREIRA, 2006; BRASIL, 2010; RIOS 2011).

O concentrado sinterizado é refinado em fornos elétricos de onde o componente ferro-fósforo é segregado. O concentrado refinado é granulado, secado e enviado para a unidade metalúrgica ou unidade de óxidos por meio de *bags* (SOUZA, 2001; PEREIRA, 2006; BRASIL, 2010; RIOS 2011).

O material concentrado refinado, acondicionado em *bags*, segue até a **unidade de metalurgia**, onde é misturado com matéria-prima e insumos como alumínio em pó e ferro, homogeneizado e processado em fornos elétricos. O ferronióbio padrão (FeNb *standard*), produto final desta unidade, é vazado, resfriado, britado, classificado, embalado e expedido para clientes (SOUZA, 2001; PEREIRA, 2006; BRASIL, 2010; RIOS 2011).

Aunidade de óxidos tem como objetivo produzir óxidos de alta pureza, como Óxido de Nióbio *standard* e Óxido de Nióbio Grau Óptico. O concentrado refinado acondicionado em *bags*, proveniente também da desfosforação, chega a esta unidade por meio de caminhões prancha e passa por reações em etapas alcalina e ácida, sendo depois calcinado. Parte da produção é direcionada para as unidades de produção de ligas especiais e unidade de nióbio metálico. Parte é vendida e parte é purificada para atingir especificações especiais (SOUZA, 2001; PEREIRA, 2006; BRASIL, 2010; RIOS 2011).

Na **unidade de ligas especiais** o material alimentado passa por homogeneização, reação aluminotérmica, desenformamento e limpeza superficial da liga. Desta última etapa, tem-se dois produtos, a alumina ATR de nióbio que segue para a unidade de Nióbio Metálico e os produtos finais NiNb-VG e FeNb-VG que são britados, embalados e armazenados para expedição (SOUZA, 2001; PEREIRA, 2006; BRASIL, 2010; RIOS 2011).

Na **unidade de nióbio metálico** o ATR é alimentado em forno de feixe de elétrons, gerando lingotes puros de 600 ou 1500 quilos. Antes da venda o produto é usinado em sua superfície para eliminação de impurezas presentes em partes por milhão (ppm). Testes físicos e embalagem precedem a expedição (ISSA FILHO *et al.*, 1984; SOUZA, 2001; PEREIRA, 2006; BRASIL, 2010; RIOS 2011).

Ao longo das etapas do processo produtivo há momentos em que se têm entradas, ou seja, alimentação com as matérias-primas pirocloro e insumos (pó de ferro média pureza, sucata de aço, pó de ferro alta pureza e pó de níquel); além da adição de outros insumos (cal virgem calcinado, ácido clorídrico, ácido fluossilícico, hidróxido de potássio líquido, gás líquido de petróleo, soda cáustica líquida, carvão vegetal de 3,5 a 25,0 mm, coque de petróleo e querosene) e saídas com o descarte de efluentes líquidos e emissões atmosféricas (FEAM, 2010).

Durante a etapa de **calcinação**, são formados ácido clorídrico e cloreto de chumbo, que são volatilizados e capturados na torre de arrefecimento. Também, o cálcio substitui o bário na estrutura cristalina do pirocloro, de modo que o cloreto de bário é formado e eliminado como o sulfato de bário, após precipitação com ácido sulfúrico (SOUZA, 2001).

Além disso, em outra etapa do processamento, o concentrado de pirocloro é refinado por meio de **processo pirometalúrgico** para a remoção de impurezas (enxofre, fósforo e chumbo), que inclui pelotização e sinterização do concentrado flutuado, seguido de fusão redutora, ou desfosforação. Este processo pirometalúrgico substitui inteiramente a etapa de lixiviação, com a vantagem de eliminar a emissão de efluentes sólidos e líquidos, pois libera apenas resíduos gasosos não-poluentes. Os ganhos para o meio ambiente se completam com a substituição de insumos, evitando a operação com alguns materiais poluentes presentes no processo antigo. Também, apresenta vantagem econômica, com custos 20% inferiores aos da lixiviação, devido ao uso de carvão vegetal como combustível do forno termoelétrico envolvido no processo (RIOS, 2011).

2.8.4.2 A PRODUÇÃO DO ÓXIDO DE NIÓBIO

A Figura 22 mostra o fluxograma simplificado da produção do ferronióbio e do óxido de nióbio, partindo do minério com concentração de 2,5% de Nb.

O óxido de Nb é obtido diretamente do concentrado de pirocloro por meio de deposição em ácido fluorídrico, seguido de extração química por meio de *methyl-isobutyl-ketone*. Outro processo consiste de redução que é feita por meio de aluminotermia. O desenvolvimento e a disponibilidade do óxido de Nb favoreceram a pesquisa tecnológica para a produção de ligas especiais, níquel-nióbio e ferronióbio de alta pureza.

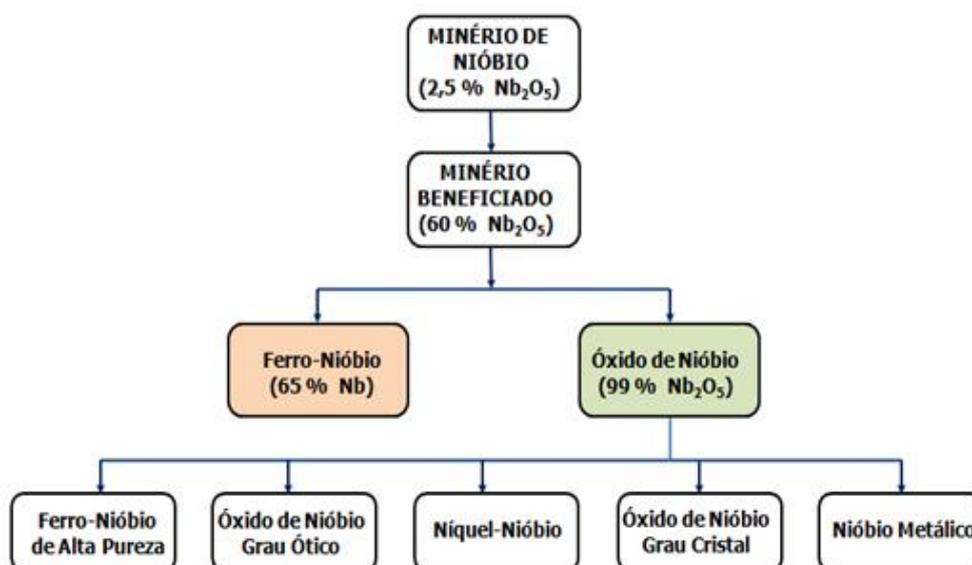


Figura 22: Fluxograma Simplificado da Produção do Ferronióbio e do Óxido de Nióbio (Fonte: adaptado de CBMM-b, 2014).

Portanto, duas tecnologias podem ser utilizadas para a produção de Nb. Na rota do pirocloro, o óxido de Nb é convertido em unidades de ferronióbio (HSLA) por intermédio do processo de redução aluminotérmica, que é o mais comum, ou pela redução em forno arco elétrico. Este processo, conhecido internacionalmente por *Alumino Thermic Reduction* - ATR consiste na reação do óxido do metal com alumínio metálico, produzindo o metal e a escória. Esta escória, dependendo da pureza dos reagentes e de eventuais aditivos, é em sua maior parte constituída por alumina (óxido de alumínio – Al₂O₃). Trata-se de um processo semelhante ao que é utilizado para a produção do ferronióbio de alta pureza e da liga níquel-nióbio. A redução aluminotérmica (ATR) do Nb₂O₅ seguida da fusão por feixe eletrônico de eletrodos de ATR tem sido utilizada para a obtenção do Nb puro (NUNES, 1999).

2.8.5 Principais Aplicações Industriais e Tecnológicas do Nióbio

O Nb possui muitas utilidades e aplicações em diversos ramos da siderurgia e em setores intensivos em tecnologia. A aplicação mais comum do Nb, ao contrário dos demais metais refratários, encontra uso principalmente na siderurgia e ocasionalmente no segmento não metalúrgico (DNPM, 2013).

Devido ao elevado ponto de fusão (2468 °C), o Nb é utilizado na produção de materiais estruturais sólidos; na construção de turbinas de termelétricas; em sistemas de propulsão da indústria aeronáutica e aeroespacial; na fabricação de ligas supercondutoras e sem resistência à passagem de corrente elétrica; para fabricação de peças de tomógrafos por RMN e em outros segmentos (IT, 2013). O Nb é também aplicado em processos de soldagens, nas indústrias nucleares, na eletrônica, na ótica e na joalheria.

O comportamento da demanda do Nb apresenta uma estreita relação com o desempenho da siderurgia mundial, incluindo os níveis de produção e consumo dos aços tipo *High Strength Low Alloy* – HSLA, em função das alterações no perfil da demanda do aço, das mudanças tecnológicas na elaboração e utilização de produtos siderúrgicos. Além disso, a importância que o aço possui na economia mundial, em função de ampla utilização nos diversos segmentos industriais faz com que os determinantes da demanda do Nb sejam dependentes do desempenho das indústrias consumidoras do aço (SILVA, 1994).

O uso do Nb tem aumentado aceleradamente devido a sua vasta aplicação em diversos segmentos da indústria sidero-metalúrgica de modo que sua crescente aceitação decorre de três fatores principais: versatilidade, vantagens econômicas e disponibilidade de suprimento em longo prazo.

A demanda mundial da liga ferronióbio varia entre 90.000 e 100.000 t/ano. Os principais países consumidores são os EUA (30%), China (23%) e Japão (11%). A China, que desde 2009 se tornou o maior importador de Nb do Brasil, deverá nos próximos anos, exercer forte liderança na demanda mundial face às taxas de crescimento e aos crescentes investimentos em infra-estrutura básica (JORNAL ANGLO AMERICAN COMUNIDADES, 2014).

A Tabela 13 e a Figura 23 apresentam um resumo das principais aplicações do Nb em diversos segmentos da ciência e tecnologia industrial.

Tabela 13. Tipos de Produtos de Nióbio.

Produtos	Principais Produtores	Produtos % Nb	Aplicações	Principais Mercados
Ferronióbio Standard-Grade (HSLA FeNb) 60% Nb	<ul style="list-style-type: none"> • CBMM • Anglo American • IAMGOLD/Niobec 	90,2	<ul style="list-style-type: none"> • Aço de Alta Resistência e Baixa Liga (HSLA) • Aço Inoxidável • Aços Resistentes ao Calor 	<ul style="list-style-type: none"> • Ind. Automotiva • Eng. Pesada e Infra-Estrutura • Setor Petroquímico • Usinas • Gasodutos (Gas/Petróleo)
Ferronióbio Vacuum Grade (VG FeNb) 99% Nb	<ul style="list-style-type: none"> • CBMM 	3,0	<ul style="list-style-type: none"> • Superligas 	<ul style="list-style-type: none"> • Motores de Aeronaves • Geração de Energia • Setor Petroquímico
Nióbio Metálico e Ligas (50-65% Nb)	<ul style="list-style-type: none"> • CBMM 	3,4	<ul style="list-style-type: none"> • Supercondutores 	<ul style="list-style-type: none"> • Aceleradores de Partículas • Ressonância Magnética
Produtos Químicos (99% Nb)	<ul style="list-style-type: none"> • CBMM 	3,4	<ul style="list-style-type: none"> • Cerâmicas Funcionais • Catalizadores 	<ul style="list-style-type: none"> • Óticos • Eletrônicos

(Fonte: adaptado de *ROSKILL information services LTD, 2009*)

Observa-se na coluna 1 da Tabela 13 os principais produtos que são obtidos a partir da mineração e processamento do Nb. A coluna 2 mostra as principais empresas mineradoras e metalúrgicas de Nb, que respondem por 99% da produção mundial. Nesta coluna destaca-se a empresa CBMM (Companhia Brasileira de Mineração e Metalurgia) que produz o Ferronióbio de elevado grau de pureza, denominado Nb *vacuum grade*, o Nb metálico e outros produtos. A terceira coluna mostra a participação percentual de Nb no mercado, sendo que 90,2% do Nb têm aplicação na fabricação de aços de alta resistência e baixa liga, de aços inoxidáveis e de aços resistentes ao calor; 3,0% são empregados em superligas; 3,4% em ligas supercondutoras e 3,4% em componentes cerâmicos e catalisadores. A coluna 4 mostra a aplicação, para cada faixa de mercado e a coluna 5 indica os principais mercados consumidores dos produtos de Nb.

O diagrama simplificado, mostrado na Figura 23, apresenta os produtos da liga de Ferronióbio (com teor de 65% de Nb) e o Óxido de Nióbio (com teor de 99%

de Nb), e os subprodutos, como ligas metálicas de alta pureza, Nb metálico e óxidos especiais. Como destaque, observa-se que o ferronióbio tem aplicações industriais na composição de aços; as ligas metálicas de alta pureza têm aplicações industriais nas superligas; o Nb metálico tem aplicações industriais nas ligas supercondutoras e os óxidos especiais têm aplicações industriais em componentes óticos e eletrônicos.

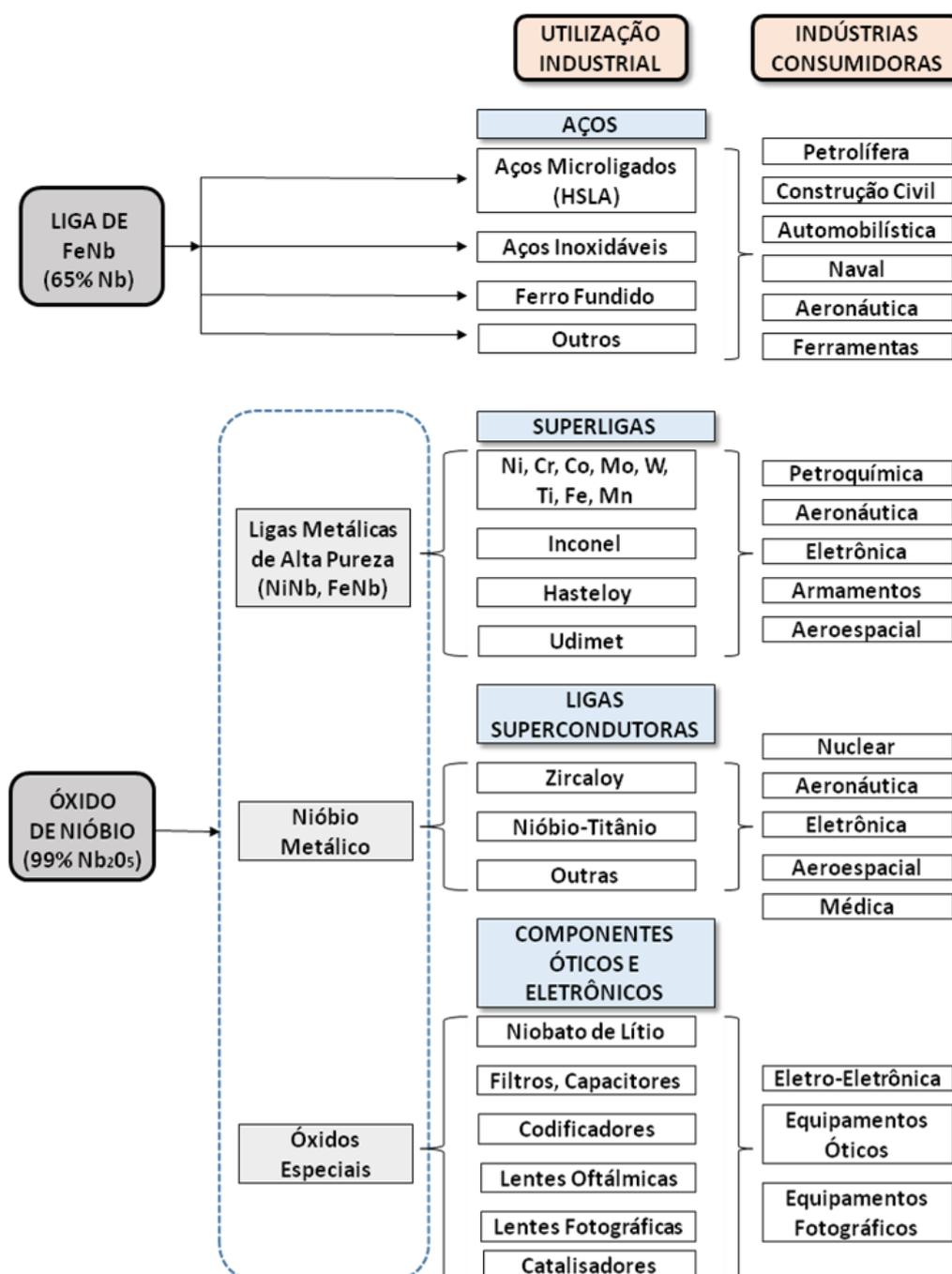


Figura 23: Aplicações industriais e principais indústrias consumidoras do ferronióbio e do óxido de nióbio (Fonte: adaptado de SILVA, 1994).

A Figura 24 apresenta de forma resumida as principais aplicações do Nb, em que 83% engloba as aplicações nos setores automobilístico, estruturais e de gasodutos e oleodutos.

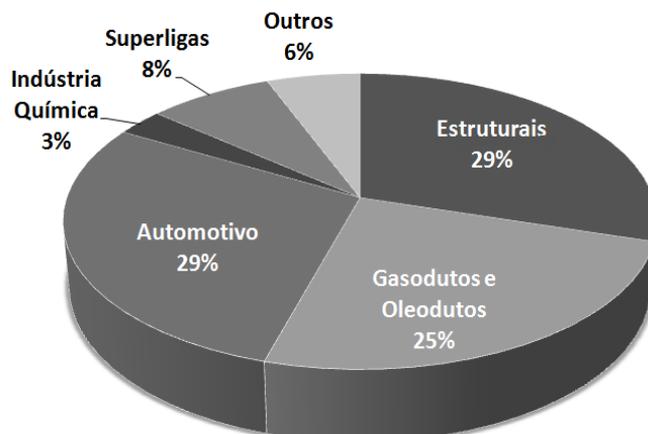


Figura 24: Principais aplicações industriais do Nb (Fonte: compilado pelo Autor).

A Figura 25 mostra um modelo da estrutura do mercado do Nb, que envolve os setores de consumo e os usuários, que compreendem as indústrias produtoras de aço, de ligas, de superligas e outros (SILVA, 1994; MME, 2010).

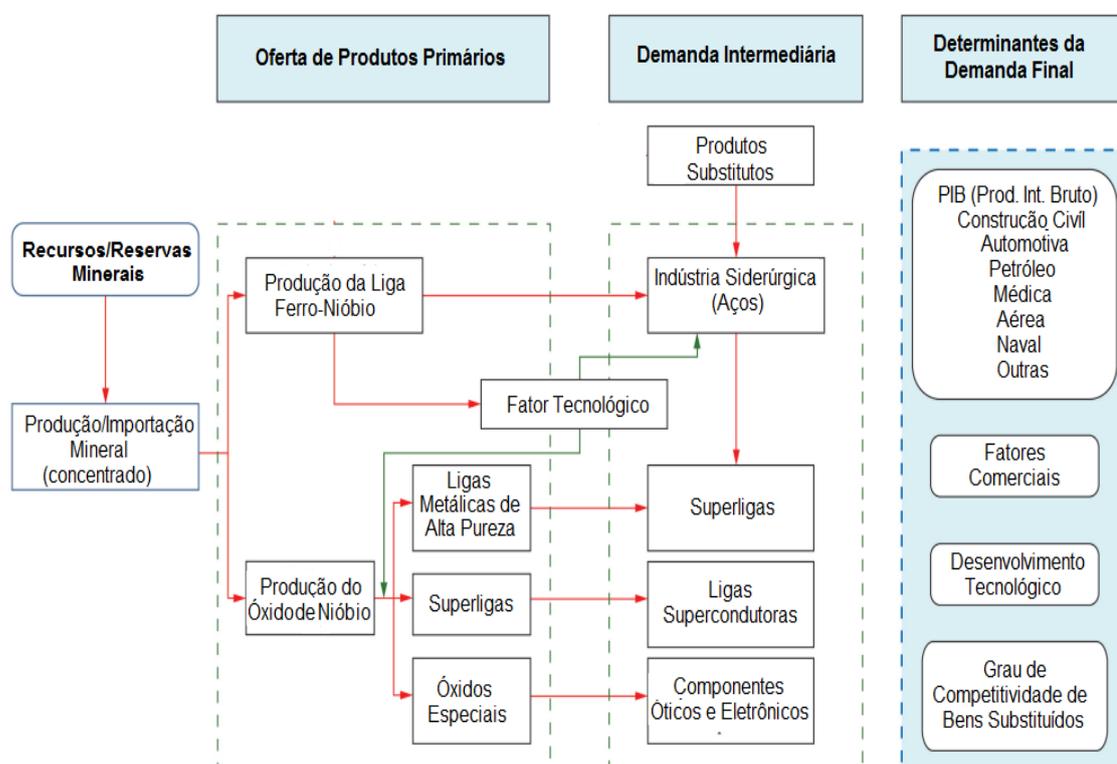


Figura 25: Diagrama simplificado do mercado de nióbio (Fonte: adaptado de SILVA, 1994; MME, 2010; ALVES e COUTINHO, 2015).

2.8.6 Considerações finais sobre o referencial teórico

Este capítulo apresentou os levantamentos em literatura científica com relação aos fundamentos, aos conceitos e às principais normas relacionadas a ACV; seguido pelo levantamento de modelos anteriormente elaborados para alguns metais, como o Al, Cu, Ni e aço.

Na sequência, foram realizados levantamentos em literatura científica com relação ao desenvolvimento sustentável na mineração, o histórico, as principais propriedades e as principais aplicações industriais e tecnológicas do Nb.

Também, foram feitos levantamentos de dados por meio de relatórios técnicos relacionados ao processo industrial da produção do FeNb e do Nb₂O₅, assim como levantamentos em protocolos de licenciamento ambiental inerentes às caracterizações químicas e mineralógicas dos resíduos sólidos, líquidos e atmosféricos ligados aos impactos ambientais, da exploração, beneficiamento, uso e descarte do Nb e seus subprodutos.

Portanto, com base nos conceitos, nas normas técnicas, nos modelos propostos para alguns metais, e nos dados técnicos do processo de produção, da caracterização dos resíduos, foi desenvolvido o presente trabalho no sentido de proposição do modelo de ACV do nióbio.

3 ABORDAGEM METODOLÓGICA

Neste capítulo é feita a descrição do método empregado para o desenvolvimento do presente trabalho, com base nos conceitos da avaliação do ciclo de vida, para o caso específico do metal nióbio.

Este trabalho consiste em propor um modelo para a ACV do Nb, de modo que seja compreendido de forma específica para este metal, devido à complexidade dos diversos fenômenos que a compõe, incluindo a exploração, produção, aplicação, reuso e destinação dos resíduos.

Em relação aos objetivos, a presente pesquisa se caracteriza como exploratória descritiva, que consiste em uma pesquisa que tem por objetivo descrever um determinado fenômeno, se baseando em descrições quantitativas ou qualitativas, com observação participativa, sendo flexível quanto aos procedimentos de amostragem de modo a considerar os mais variados aspectos relativos ao fato estudado (LAKATOS e MARCONI, 2002).

Foi utilizada a abordagem qualitativa neste trabalho, que possui algumas características básicas, tendo os ambientes natural e industrial como suas fontes diretas para obtenção de dados. Também, permite abordar um ambiente menos explorado, com a característica de não se contentar em testar o que já é conhecido, mas descobrir novas abordagens que geram múltiplas fontes de evidências, além de destacar a importância da realidade organizacional (GODOY, 1995; FLICK, 2004). Também, segundo Miguel *et al.* (2012) a pesquisa qualitativa tem como foco os processos do objeto em estudo, tal que as interpretações individuais formam um mosaico organizacional que o pesquisador precisa capturar para entender a complexidade pesquisada com atenção, pois ao mesmo tempo em que as evidências se complementam, elas também se divergem, o que se torna imprescindível para validar ou não sua hipótese. Assim, a abordagem qualitativa é bastante recomendada quando se trata de uma pesquisa com cunho exploratório.

Além disso, também pode ser considerado que o método adotado neste trabalho foi de investigação por meio de um estudo de caso, que é definido como uma análise profunda de um ou mais objetos (casos), com o uso de instrumentos de coleta de dados e a presença da interação entre o pesquisador e o objeto de pesquisa. Também, o estudo de caso se caracteriza ainda pelo fato de investigar um fenômeno atual, considerando que as fronteiras entre o fenômeno e o contexto em que ele se insere não são claramente definidas (CAUCHICK MIGUEL, 2010; YIN, 2001).

Por outro lado, com relação aos conceitos que foram tomados como base para o desenvolvimento deste trabalho, destaca-se a ferramenta ACV (avaliação do ciclo de vida) que é utilizada para comparar, analisar e avaliar as entradas e saídas de materiais na unidade industrial, a partir dos recursos naturais, desde a extração, processamento e transformação dos recursos em matérias-primas. Nas saídas da unidade de produção são identificadas as emissões de GEE e substâncias químicas causadoras dos impactos ambientais associados com o desenvolvimento de produtos (ILCD, 2010 e 2012), que no presente trabalho são referentes aos resíduos gerados a partir da exploração, beneficiamento e produção do FeNb e Nb₂O₅.

A ACV, proposta por Peng *et al.* (2013), consiste basicamente em quatro fases: conhecer; definir as metas e escopo; análise de inventário e a avaliação e interpretação dos impactos ambientais, por meio do balanço de massa e de energia, envolvidos no processo de produção. Também, a fase da avaliação do impacto no ciclo de vida considera o consumo de matéria prima e insumos, a discriminação das categorias de substâncias químicas, responsáveis pelas emissões de poluentes, e considerações com a relação de causa-efeito para os diferentes problemas ambientais causados pela exploração e beneficiamento do Nb (CHERUBINI *et al.*, 2008 e 2009; KORONEOS *et al.*, 2006).

Para elaboração do modelo de ACV relativo à produção do Nb, foi feita adaptação incremental, realizada pela associação metodológica com base nos trabalhos desenvolvidos por Seppala *et al.* (2002) e Norgate *et al.* (2007), juntamente com os conceitos e metodologias propostos pela norma ISO-14040 (1997), para um determinado produto ou um conjunto de produtos.

Nesse contexto, este trabalho consiste de uma pesquisa exploratória, envolvendo um levantamento bibliográfico por meio da busca de artigos científicos nacionais e internacionais, visando consultar a diversidade de trabalhos existentes e disponíveis sobre o tema; o levantamento de dados publicados a partir de empresas mineradoras e do setor metalúrgico; a elaboração de fluxogramas relacionados à exploração, produção e uso do Nb; o levantamento de dados com relação à estrutura de mercado de Nb e a evolução da produção de Nb no Brasil; assim como levantamentos e análises de dados do processo de produção do $FeNb$ e Nb_2O_5 e avaliação dos impactos ambientais relativos à cadeia da exploração e produção do Nb, com enfoque nos conceitos de sustentabilidade.

Com relação aos dados relativos às matérias primas, insumos, produção de combustíveis, sucata, emissões atmosféricas, resíduos líquidos, resíduos sólidos e escória metalurgia, estes foram obtidos por meio de dados divulgados em relatório técnico (SEMAD, 2012).

Finalmente, com relação à elaboração do modelo, *i.e.*, do fluxograma da ACV do Nb, este foi elaborado com base nos modelos conceituais de Sepalla *et al.* (2002) e de Norgate *et al.* (2007), apresentados anteriormente nas Figura 1 e Figura 2. Com relação à quantificação, *i.e.*, para elaboração do balanço de massa, o fluxograma foi complementado com base nos modelos encontrados na literatura científica para outros metais, como o alumínio (TAN *et al.*, 2005; LIU *et al.*, 2012), o cobre (STEWART *et al.*, 2006; PETRIE, 2007; TANIMOTO *et al.*, 2010; MEMARY *et al.*, 2012), o níquel (PETRIE, 2007; ECKELMAN, 2010) e o aço (IABr, 2010; BURCHART-KOROL, 2011; YELLISHETTY *et al.*, 2011) e em trabalhos realizados por Pires do Rio (2002).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 26 mostra o fluxograma geral, como um modelo para elaboração do ciclo de vida do nióbio. O fluxograma compreende desde a prospecção da matéria prima, seu processamento, as principais aplicações nos segmentos tecnológicos e industriais, a identificação, classificação de destino dos resíduos. Também, apresenta o balanço de massa da produção de FeNb e de Nb₂O₅, com base na entrada de 100 t de minério, com teor de 2,5% de Nb. No fluxograma estão destacadas, em ordem numérica, as matérias primas, as etapas do processo de beneficiamento do minério, os produtos e os resíduos gerados.

Juntamente com as matérias primas principais que entram no processo de produção (o minério de Nb, denominado pirocloro), são inseridos diversos insumos, com a finalidade de atuar no processo químico (pó de ferro de média pureza, pó de ferro de alta pureza, sucata de aço, pó de níquel, água, cal virgem calcinado, ácido clorídrico, ácido fluossilícico, hidróxido de potássio líquido, soda cáustica líquida), nos processos térmicos (alumínio em pó, gás liquefeito de petróleo, carvão vegetal, coque de petróleo e querosene).

Além das matérias primas e insumos em geral, outro agente de suma importância é a energia elétrica, responsável por promover os processos térmicos e alumino-térmicos, de modo que em média são empregados da ordem de 500 KWh por tonelada de FeNb produzido.

Ao fim dos processos térmicos e alumino-térmicos são produzidos o ferronióbio de alta pureza, o óxido de nióbio grau ótico, o óxido de nióbio VG (VG – *vacuum grade*), nióbio metálico e as ligas especiais, como a liga FeNb-VG e a NiNb-VG. Como subprodutos, destacam-se os aços microligados (HSLA), os aços inoxidáveis, o ferro fundido, as ligas metálicas de alta pureza (NiNb, FeNb), as ligas supercondutoras, os componentes óticos e eletrônicos. Além disso, como resíduos passíveis de reuso, destacam-se a sucata e escória, que ainda contém nióbio em menor proporção e que podem ser reciclados por meio de fusão em fornos elétricos.

O Quadro 10 identifica o conteúdo e a destinação final dos materiais do fluxograma proposto como modelo para a elaboração da ACV do nióbio.

Quadro 10. Identificação e conteúdo das etapas do fluxograma proposto.

Item	Conteúdo	Destinação
1- Matérias Primas	Pirocloro, pó de ferro média pureza, pó de ferro alta pureza, sucata de aço e pó de níquel.	Processamento
2- Insumos	Alumínio em pó, ferro, água, cal virgem calcinado, ácido clorídrico, ácido fluossilícico, hidróxido de potássio líquido, gás líquido de petróleo, soda cáustica líquida, carvão vegetal de 3,5 a 25,0 mm, coque de petróleo e querosene;	Processamento
3 - Produção de Combustíveis	Alumínio em pó, gás liquefeito de petróleo, carvão vegetal, coque de petróleo e querosene;	Processamento
4 - Energia elétrica	Consumo de energia elétrica por tonelada de FeNb produzida = 500 kwh;	Processamento
5 - Concentração de Minérios	Separar o pirocloro dos minerais que não são de interesse.	Processamento
6 - Transporte	É realizado por meio de correias transportadoras;	Processamento
7-Processamento do nióbio	Unidade de Concentração (moagem, separação magnética, deslamagem e flotação), Unidade de Sinterização (filtragem, pelotização, sinterização e britagem), Unidade de Desfosforação (forno elétrico, granulação e secagem), Unidade de Metalurgia, Britagem e Embalagem.	Produção do metal Nb
8 - Ferronióbio e Óxido de Nióbio	FeNb e Nb ₂ O ₅	Indústrias
9 - Produtos Finais	Ferronióbio de Alta Pureza, Óxido de Nióbio Grau Ótico, Óxido de Nióbio VG, Nióbio Metálico e as Ligas Especiais FeNb-VG e NiNb-VG.	Indústrias
10 - Subprodutos	Aços microligados (HSLA), aços inoxidáveis, ferro fundido, ligas metálicas de alta pureza (NiNb, FeNb), ligas supercondutoras e componentes óticos e eletrônicos.	Indústrias
11 - Sucata	O nióbio é reciclado a partir de pedaços de ferro e aço de liga leve. A sucata é derretida no oxigênio básico e fornos elétricos.	Reuso e Aterro
12 - Emissões Atmosféricas	Material Particulado, Pb, SO ₂ , HCl e SOx.	Biosfera
13 - Resíduos Líquidos	Nb, Al, Si, P, S, Ti, Ba, Mm, Fe, Na, Ca, BaSO ₄ e os radionuclídeos ²³⁸ U, ²²⁶ Ra, ²¹⁰ Pb, ²³² Th e ²²⁸ Ra.	Reuso e Tanque de Resíduos
14 - Resíduos Sólidos	Nb, Al, Si, P, S, Ti, Ba, Mm, Fe e os radionuclídeos ²³⁸ U, ²²⁶ Ra, ²¹⁰ Pb, ²³² Th e ²²⁸ Ra.	Reuso e Tanque de Resíduos
15 - Escória Metalúrgia	60% de alumina (Al ₂ O ₃), 20% de óxido de bário (BaO), 10% de óxido de cálcio (CaO) e 10% de pequenas frações (Ti, Nb, ²³⁸ U, ²²⁶ Ra, ²¹⁰ Pb, ²³² Th e ²²⁸ Ra).	Reuso e Aterro

(Fonte: próprio autor)

Tomando-se como base o modelo proposto, por meio do fluxograma geral apresentado na Figura 26, a próxima etapa consiste na elaboração do balanço de massa do processamento do Nb (Figura 27), que é resultado do levantamento de dados em literatura científica e relatórios técnicos de empresas que atuam nos setores de mineração e metalurgia. Destaca-se que este levantamento contribui para o ineditismo do presente trabalho, tendo-se em vista que não foram encontradas referências em pesquisas feitas na literatura científica.

A Figura 27 mostra o balanço de massa relativo à produção do ferronióbio, partindo-se da exploração, beneficiamento e o processamento de 100 t do minério de pirocloro, com concentração média de 2,5% de Nb.

Após a fragmentação do minério natural, seguem os fluxos do beneficiamento, por meio da moagem, separação magnética, deslamagem e da flotação. Os resíduos (14,70 t) da separação magnética (nióbio, alumínio, silício, fósforo, enxofre, titânio, bário, manganês, ferro e os radionuclídeos ^{238}U , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{232}Th e ^{228}Ra) são bombeados para o Tanque de Resíduos 1 (TR-1).

Os resíduos das etapas de deslamagem (13,67 t) e de flotação (61,68 t) são enviados por gravidade para o Tanque de Resíduos 2 (TR-2). Neste tanque são depositados, além dos elementos e radionuclídeos depositados no TR-1, a barita, o cálcio e o sódio. Na etapa da flotação são adicionadas amina, agente umectante e fluorsilicato de sódio.

Após a flotação, 9,95 t de concentrado de pirocloro com 55 a 60% de Nb segue para a Unidade de Sinterização, onde são realizadas as operações de filtragem, pelotização, sinterização em forno rotativo e a britagem. O concentrado de pirocloro é refinado por meio de um processo pirometalúrgico, que inclui pelotização e sinterização do concentrado flutuado, seguido de fusão redutora (desfosforação). Água é utilizada apenas para granular o concentrado e para lavar os gases na fase de sinterização.

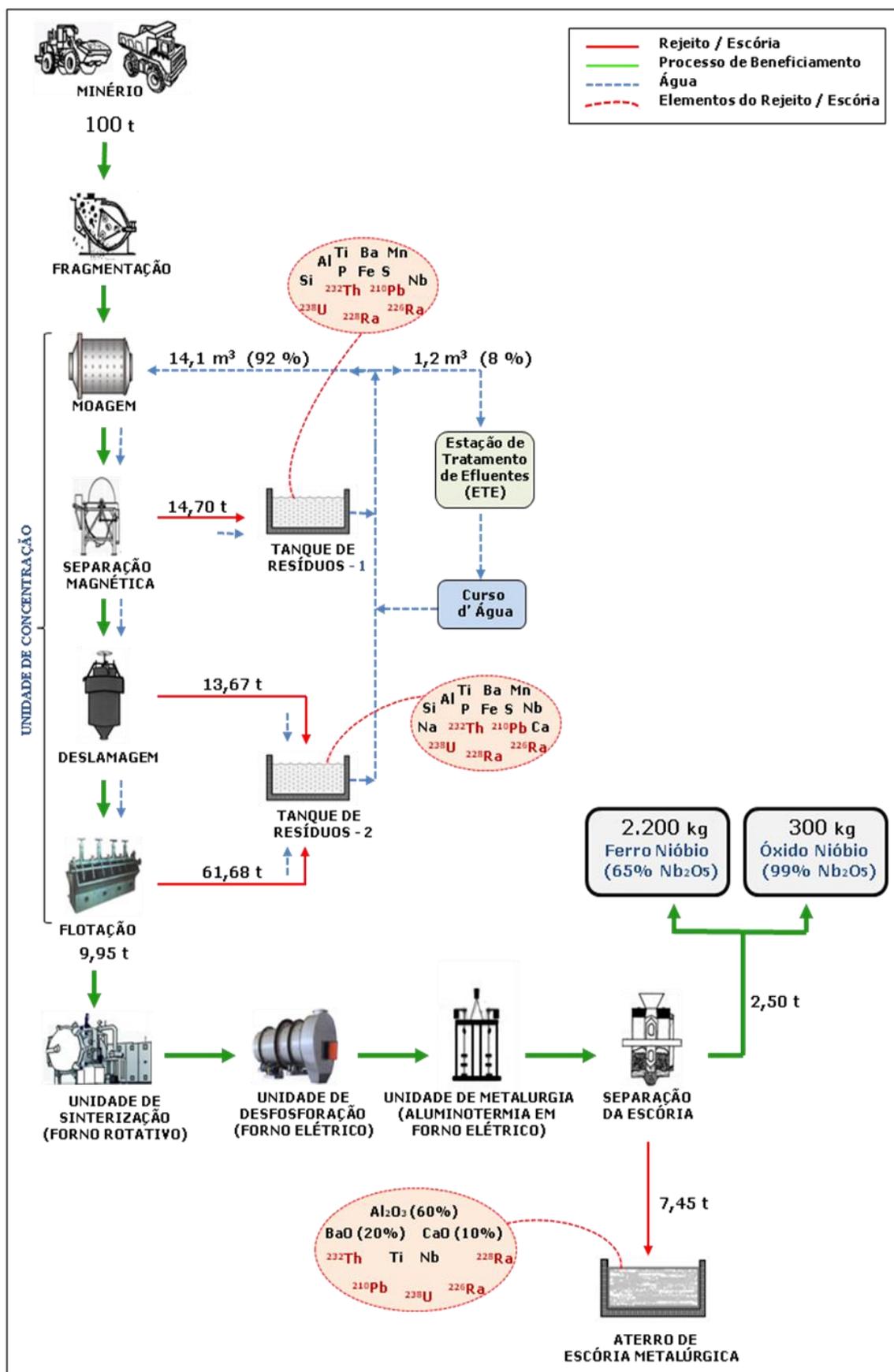


Figura 27: Balanço de massa do processamento do Nb (Fonte: próprio autor).

Em seguida, o material sinterizado (sínter) de pirocloro com 57 a 60% de Nb segue para a Unidade de Desfosforação onde é granulado e seco em forno elétrico, seguindo o concentrado refinado com 60 à 62% de Nb para a Unidade de Metalurgia, onde é adicionado ao concentrado refinado, o pó de alumínio, o óxido de ferro em pó ou sucata de ferro e o cal. Esta mistura é submetida à redução aluminotérmica em forno elétrico, na forma de fusão em altíssima temperatura e em atmosfera inerte; que resulta em uma massa metálica, denominada ferronióbio, com concentração 65% de Nb para a separação da escória. A composição básica e média do FeNb é de 66% de nióbio (Nb), 30% de ferro (Fe) e 4% de outros metais (silício, chumbo e fósforo).

Na etapa da separação da escória, 7,45 t são enviadas para o depósito de escória metalúrgica, sendo 60% de alumina (Al_2O_3), 20% de óxido de bário (BaO), 10% de óxido de cálcio (CaO) e 10% de pequenas frações e, as outras 2,5 t do material concentrado resultam em 2,2 t de FeNb com 65% de Nb e 0,3 t de Nb_2O_5 com 99% de Nb.

O balanço final mostra que, a partir de 100 t de minério, são produzidos 2.200 kg de FeNb e 300 kg de Nb_2O_5 , com proporções de 88% e 12% de Nb, respectivamente.

A unidade de concentração, composta principalmente pela moagem, separação magnética, deslame e flotação, apresenta a maior quantidade de resíduos, totalizando 90,05% do minério inicial.

O consumo específico de água no processamento do nióbio é da ordem de 6,131 m³ de água por tonelada de minério processado, sendo que 92% desta água são reutilizadas e 8% são bombeadas para a Estação de Tratamento de Efluentes (ETE), seguindo posteriormente para o curso d'água. Portanto, para produção de 2.500 kg do metal nióbio (2.200 kg de Ferro Nióbio e 300 kg de Óxido de Nióbio), são gastos em torno de 15,2 m³ de água, sendo 14,1 m³ de H₂O utilizados no processo e 1,1 m³ enviados para a ETE.

O resumo do balanço de massa do ferronióbio e do óxido de nióbio é mostrado no Quadro 11.

Quadro 11. Balanço de massa do ferronióbio e do óxido de nióbio.

Entrada	Quant.	Saída	Quant.
Matérias Primas:		Separação Magnética: nióbio,	14,70 t
Minério pirocloro 2,5% de Nb ₂ O ₅	100,0 t	alumínio, silício, fósforo,	
(pó de ferro média pureza, pó de ferro alta pureza, sucata de aço e pó de níquel)		enxofre, titânio, bário,	
		manganês, ferro, ²³⁸ U, ²²⁶ Ra,	
		²¹⁰ Pb, ²³² Th e ²²⁸ Ra	
Água	15,2 m ³	Deslamagem + Flotação:	75,35 t
Energia Elétrica	1,25 MWh	barita, cálcio, sódio, nióbio,	
		silício, alumínio, fósforo,	
Insumos:		enxofre, titânio, bário,	
alumínio em pó, ferro, água, cal virgem calcinado, ácido clorídrico, ácido fluossilícico, hidróxido de potássio líquido, gás líquido de petróleo, soda cáustica líquida, carvão vegetal de 3,5 a 25,0 mm, coque de petróleo e querosene		manganês, ferro, ²³⁸ U, ²²⁶ Ra,	
		²¹⁰ Pb, ²³² Th e ²²⁸ Ra	
		Separação da Escória:	7,45 t
		Alumina (Al ₂ O ₃)	(4,47 t)
		óxido de bário (BaO)	(1,49 t)
		óxido de cálcio (CaO)	(0,75 t)
		(Ti, Nb, ²³⁸ U, ²²⁶ Ra, ²¹⁰ Pb, ²³² Th, ²²⁸ Ra)	(0,74 t)
		Emissões Atmosféricas:	
		Material Particulado, Pb, SO ₂ ,	
		HCl, SO _x	
		Produtos Finais	
		Ferronióbio	2,20 t
		Óxido de Nióbio	0,30 t

(Fonte: próprio autor)

Ainda, em continuidade ao balanço de materiais, a Figura 28 mostra o balanço dos subprodutos do processamento do FeNb e Nb₂O₅. A liga de FeNb (2.200 kg) é empregada na indústria do aço, compondo os aços microligados (HSLA), os aços inoxidáveis, ferro fundido e outros, que são consumidos pelas indústrias petrolífera, construção civil, automobilística, naval, aeronáutica e de ferramentas.

A partir de 300 kg de Óxido de Nióbio, em torno de 196 kg são utilizados para a confecção de ligas metálicas de alta pureza (NiNb, FeNb) e 104 kg para o nióbio metálico e óxidos especiais. As ligas metálicas de alta pureza são

utilizadas nas superligas, o nióbio metálico nas ligas supercondutoras e os óxidos especiais nos componentes óticos e eletrônicos.

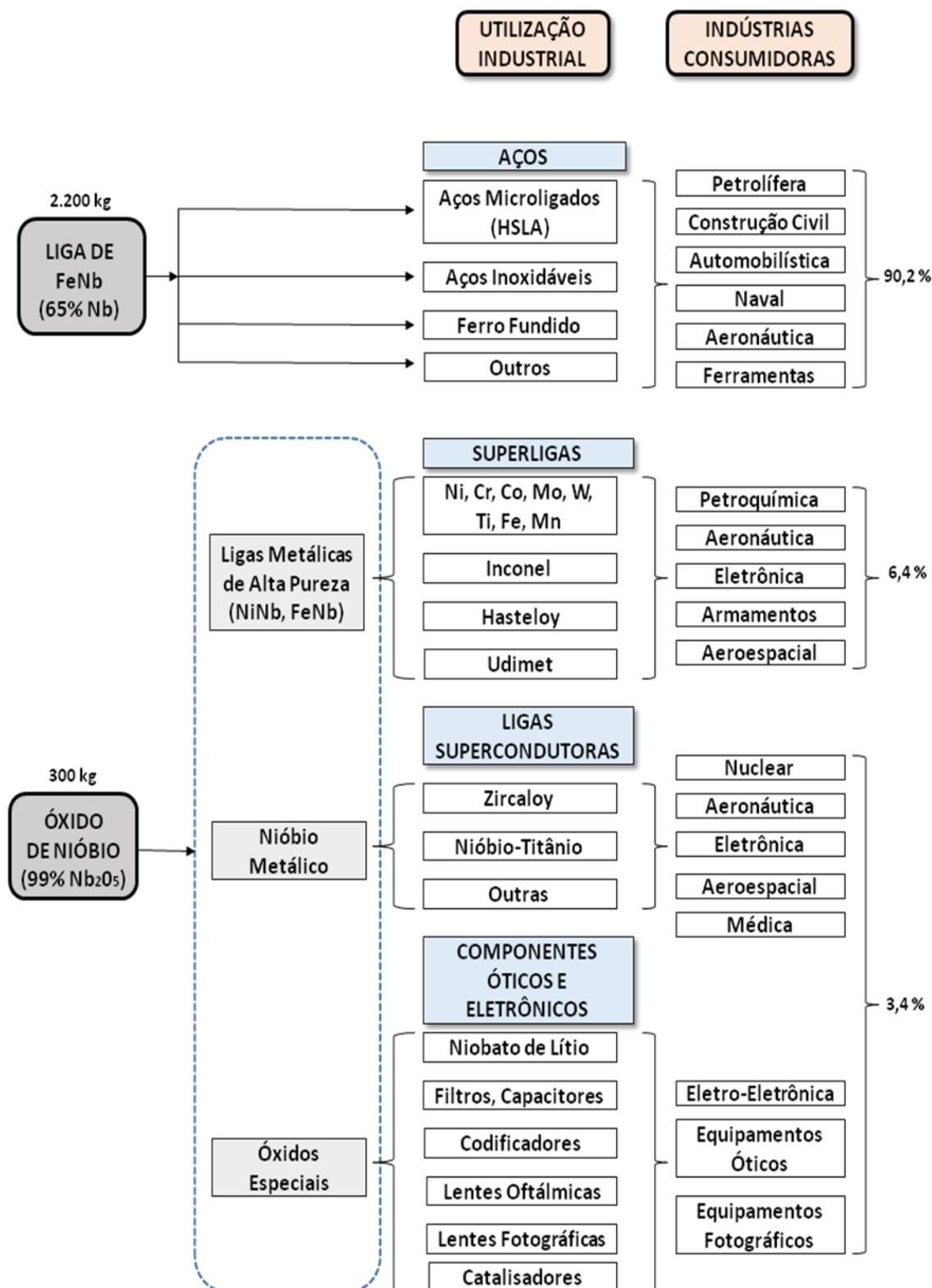


Figura 28: Balanço dos subprodutos do processamento do FeNb e Nb₂O₅ (Fonte: adaptado de SILVA, 1994).

Os impactos no ambiente acontecem nas várias fases do processo, desde o transporte, manuseio e preparação da matéria-prima, passando por sua transformação em produtos finais, até a destinação que se dá aos diversos resíduos que resultam dessas várias etapas de produção. Por exemplo, uma mineradora de nióbio pode gerar cerca de 40 t de resíduos sólidos por tonelada de FeNb. Esta proporção pode ser considerada extremamente prejudicial ao meio ambiente, tendo-se em vista que a maior parte dos resíduos sólidos é depositada em barragens de lama, de modo que, mesmo sendo preparados de acordo com a legislação ambiental, os resíduos permanecem por longo período de tempo sem condições de serem reaproveitados. Para se ter uma ideia, em termos de ordem de grandeza, uma unidade industrial com capacidade de produzir 100 mil toneladas por ano de Nb, gera 4,0 milhões de toneladas de resíduos sólidos, sem contar os demais danos ambientais, como o consumo de água, a emissão de GEE e outros.

O Quadro 12 apresenta, de forma resumida, as características dos resíduos sólidos gerados no processamento do minério de Nb, sua origem e classificação, segundo a norma NBR 10.004, assim como sua destinação final. Por outro lado, a Tabela 14 apresenta, de forma quantitativa, os principais elementos encontrados nos resíduos sólidos dos processos de separação magnética, deslamagem e flotação.

Outro exemplo, com relação aos resíduos gerados em unidades industriais que usam lixiviação ácida, são encontrados normalmente o sulfato de bário (BaSO_4), sulfato de cálcio (CaSO_4), sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), sulfato de titânio ($\text{Ti}(\text{SO}_4)_2$), sulfato de tório ($\text{Th}(\text{SO}_4)_2$), sulfato de óxido de urânio (UO_2SO_4) e sulfato de nióbio ($\text{Nb}(\text{SO}_4)_2$), além dos isótopos de ^{238}U , ^{232}Th , ^{210}Pb , ^{226}Ra e ^{228}Ra . Observa-se com destaque para a elevada concentração de metais pesados, como o ferro, bário, titânio e outros, em menor proporção. Destaca-se também, a presença de elevada concentração de enxofre, que é altamente prejudicial ao meio ambiente, em função da facilidade de sua combinação com outros elementos e, por consequência, a formação de diversos compostos poluentes.

Quadro 12. Geração de resíduos sólidos.

Resíduo	Origem	Classificação NBR 10.004	Destino
Finos de produtos intermediários ou finais	Captados em filtros de mangas e considerados material em processo	Classe II A	Reutilização reaproveitamento
Areia de fundição	Unidade de desfosforação	Classe II A	Reutilização
Areia de fundição	Unidade de metalurgia	Classell A	Aterro Industrial
Rejeito da concentração mineral	Unidade de concentração	Classe II A	Barragem de rejeito
Escória de alumina	Unidade de metalurgia (ligas especiais)	Classe II A	Aterro industrial e reciclagem
Sucata de tijolos refratários básicos dos fornos	Unidade de metalurgia (ligas especiais)	Classe II A	Aterro industrial e reciclagem
Sucata de tijolos refratários aluminosos	Unidade de metalurgia (FeNb <i>standard</i>)	Classe II A	Aterro industrial
Liga de Ferro-Fósforo	Unidade de Desfosforação	Classe II B	Aterro industrial e reciclagem
Particulado coletado no filtro de mangas	Unidade de desfosforação	Classe I	Aterro industrial
Hidróxido de alumínio (base úmida)	Unidade de calcinação	Classe II A	Aterro industrial

(Fonte: adaptado de SEMAD, 2012)

Tabela 14. Elementos presentes nos resíduos da separação e concentração do Nb.

ELEMENTO	Teores (%)	
	Separação Magnética	Deslamagem + Flotação
Al	0,4 + 0,24	0,8 + 0,19
Si	0,4 + 0,20	1,2 + 0,45
P	1,0 + 0,07	2,1 + 0,10
S	2,6 + 0,56	2,1 + 0,10
Ti	3,6 + 0,46	8,3 + 0,37
Mn	0,7 + 0,12	1,2 + 0,11
Fe	87,8 + 2,01	59,5 + 2,03
Nb	0,4 + 0,31	0,5 + 0,25
Ba	3,1 + 0,95	18,5 + 1,74
Na	-	0,3 + 0,05
Ca	-	0,1 + 0,03

(Fonte: adaptado de PIRES DO RIO, 2002)

Um exemplo de recuperação dos resíduos sólidos, *i.e.*, de parte dos resíduos sólidos, consiste na recuperação de elementos de terras raras por meio da concentração de metais extraídos dos rejeitos do processamento do Nb. Em uma unidade industrial, a quantidade dos metais extraídos pode chegar a três mil toneladas por ano, em que a mineradora extrai sulfatos e hidróxidos de metais como neodímio e praseodímio, em processo único no Brasil (CBMM-b, 2014; GEOFÍSICA BRASIL, 2012).

Com relação às emissões atmosféricas, estas são causadas por componentes voláteis originados do processo de beneficiamento e processamento do pirocloro, assim como dos componentes particulados retidos pelo sistema de filtração, em especial, pelos filtros tipo manga. O Quadro 13 mostra, de forma resumida, os dados das emissões atmosféricas, com relação aos componentes voláteis e aos componentes particulados retidos em um sistema de filtração, em uma unidade industrial de produção do Nb.

Assim, os dados do Quadro 13, mostram que em todas as unidades industriais ocorre a retenção de materiais particulados e, na maioria dos processos, ocorre a identificação de metais pesados, como o chumbo, que é um componente altamente tóxico e nocivo à saúde humana e causador de diversos danos ao meio ambiente. Observa-se também a presença de componentes sulfurosos, na forma de dióxido de enxofre, que é o grande responsável pela ocorrência de chuva ácida quando emanado à atmosfera. Além disso, nos lavadores de gases, observa-se a presença de componentes ácidos, causadores da corrosão química em inúmeros processos de contato com materiais oxidantes.

Com relação aos resíduos líquidos, estes são oriundos das unidades industriais, principalmente da unidade de concentração; além dos efluentes provenientes dos lavadores de gases, utilizados para controlar as emissões atmosféricas, dos resíduos da drenagem oleosa dos postos de abastecimento, dos efluentes sanitários e as águas pluviais que incidem sobre as unidades industriais e piso impermeabilizado. Os resíduos líquidos industriais são direcionados para a barragem de rejeitos.

Quadro 13. Emissões atmosféricas.

Unidade Industrial	Fonte Fixa de Emissão	Medida de Controle	Poluentes Monitorados
Sinterização I	Chaminés	Filtro de mangas e lavador de gases	Material particulado, Pb e SO ₂
Sinterização II	Chaminés	Lavador de gases	Material particulado e SO ₂
	Chaminés	Filtro de mangas	Material particulado e SO ₂
Unidade de Desfosforação	Chaminés	Filtro de mangas	Material particulado e Pb.
	Chaminés	Lavador de gases	Material particulado
Unidade de Calcinação	Chaminés	Lavador de gases	Material particulado Pb e SO ₂
	Chaminés	Filtro de mangas	Material particulado
Unidade de Óxidos	Chaminés	Lavador de gases	Material particulado
	Chaminés	Filtro de mangas	Material particulado
	Chaminés	Lavador de gases	Material particulado e HCl e SO _x
Unidade de Óxidos Especiais	Chaminés	Lavador de gases	HCl
Unidade de Metalurgia	Chaminés	Não emissão de vapor d'água	Material Particulado
	Chaminés	Filtro de mangas	Material Particulado
Unidade de Britagem e Expedição	Chaminés	Filtro de mangas	Material Particulado
Unidade de Ligas Especiais	Chaminés	Filtro de mangas	Material Particulado
	Chaminés	Lavador de gases	Material Particulado
Unidade de Desenvolvimento de Produtos	Chaminés	Lavador de gases	HCl

(Fonte: adaptado de SEMAD, 2012)

O modelo de avaliação do impacto ambiental causado pela produção de metais, no caso específico, da mineração e produção do Nb, é baseado no levantamento de dados qualitativos e quantitativos dos resíduos sólidos, líquidos e gasosos. O modelo depende também, de levantamento de dados com relação ao local de produção e das operações unitárias envolvidas na produção do Nb. Assim, a Figura 29 mostra um diagrama simplificado que

cobre as principais categorias de elementos poluentes, assim como os possíveis efeitos de degradação ao meio ambiente, com destaque para:

- Efeitos ecotoxicológicos (emanados para a água e o solo, como metais pesados, óleos, cianetos, etc);
- Efeitos na saúde (por exemplo, PCB, PAH, dioxinas, SO₂, NO_x metais pesados (As, Pb, Cd, Ni, etc));
- Efeitos diretos sobre a flora (SO₂, NO_x, fluoretos, particulados);
- Extração contínua de oxigênio que ocasiona a sua escassez ou desaparecimento (demanda biológica/química de oxigênio, de amônio, etc);
- Sólidos para a água.

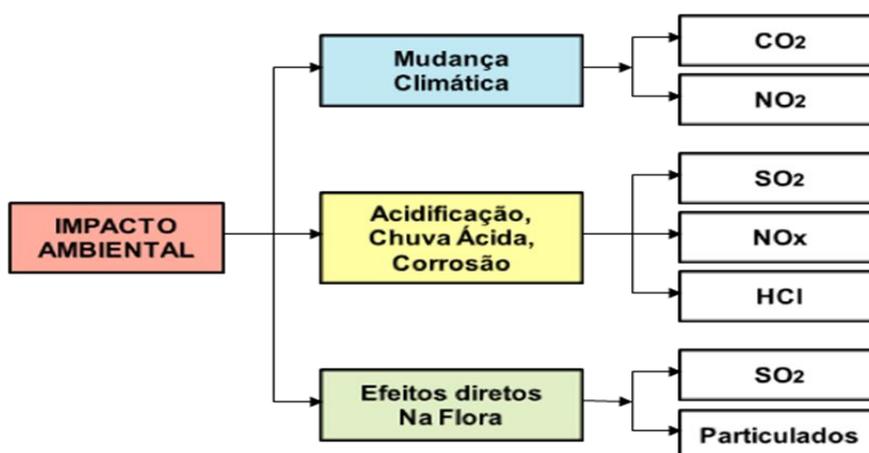


Figura 29: Diagrama simplificado do impacto ambiental ligado à mineração e produção do nióbio (Fonte: compilado pelo Autor).

Com o aumento nas demandas globais de matérias primas e de energia, simultaneamente surgem preocupações ambientais relacionadas com a mudança climática, a chuva ácida e seus efeitos sobre os seres vivos.

A poluição atmosférica pode causar mudanças climáticas que resulta da emissão de gases poluentes ou de particulados sólidos na atmosfera. As mudanças climáticas podem ser consideradas como um assunto polêmico,

devido a sua capacidade de alteração de diversos elementos do ecossistema da biosfera.

Neste mesmo contexto, a chuva ácida que é causada pela presença de gases, principalmente óxidos ácidos de enxofre e nitrogênio, que saem das chaminés industriais. Misturados à água presente no ar, hidrolisam formando ácidos que caem sobre a terra juntamente com a chuva. De qualquer modo, o controle das emissões de óxidos ácidos deve ser exercido continuamente de modo a melhorar e manter a qualidade de vida, assim como é importante realizar a captura e o tratamento dos particulados e gases gerados antes de seu lançamento na atmosfera.

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do presente trabalho permitiu elaborar um fluxograma que é proposto como modelo para avaliação do ciclo de vida do metal nióbio, desde a exploração e beneficiamento da matéria prima, também contemplam as etapas do processamento do minério, da avaliação dos resíduos, as formas de descarte e reuso, assim como as diversas aplicações tecnológicas.

Com relação ao balanço de massa do processo, os dados mostraram que, partindo de 100 t de minério, com concentração média de 2,5% de Nb, são produzidos 2.200 Kg de FeNb e 300 Kg de Nb₂O₅, onde são gastos em torno de 15,2 m³ de água e 1,25 MWh de energia elétrica.

Foram identificados os diversos resíduos sólidos resultantes do processamento do Nb, desde sua origem, classificação e destino, destacando-se o Al₂O₃, BaO e CaO. Com relação aos elementos presentes nos rejeitos da separação magnética e concentração do Nb, estes foram identificados e quantificados com destaque para o Fe, Ba e Ti. Foram também identificados os poluentes atmosféricos, em que se destacam CO₂, NO₂, NO_x, Pb, SO₂, SO_x, HCl e materiais particulados.

Com relação as possibilidades de reciclagem e reuso dos componentes presentes nos rejeitos do processamento do Nb, destaca-se a recuperação dos elementos denominados de terras raras, por meio da concentração de metais extraídos dos rejeitos do processamento do Nb. A quantidade dos metais extraídos atinge 3.000 t por ano, em que a mineradora extrai sulfatos e hidróxidos de metais como neodímio e praseodímio, em processo único no Brasil.

Também, os dados mostraram que 90,2% do Nb têm aplicação na fabricação de aços de alta resistência e baixa liga, aços inoxidáveis e aços resistentes ao calor; 3,0% em superligas; 3,4% em ligas supercondutoras e 3,4% em cerâmicas e catalisadores.

Portanto, as informações e dados obtidos neste trabalho permitiram ter uma melhor visão a respeito do balanço de massa relativo à produção do FeNb e do Nb₂O₅, bem como a identificação e quantificação dos elementos depositados nos tanques de rejeitos/escórias, atendendo assim aos objetivos inicialmente propostos.

Em relação aos impactos ambientais causados por elementos radioativos, os resultados mostraram que os rejeitos de sulfato de bário e da escória metalúrgica da mineradora são fontes potenciais de impacto ambiental e de exposição à radiação e constituem fontes potenciais de comprometimento radiológico ambiental, mesmo após o encerramento das operações.

Finalmente, destaca-se que o beneficiamento do minério consiste de um processo que agride a natureza, por meio da geração de enorme quantidade de resíduos sólidos que não são reaproveitados, além da degradação causada pela extração superficial do minério, da geração de resíduos líquidos e da emissão de gases de efeito estufa para a atmosfera. Por outro lado, do ponto de vista tecnológico o uso do Nb na metalurgia é necessário para a produção de inúmeros tipos de ligas metálicas, amplamente usadas em diversos setores industriais, assim como em inúmeros campos da ciência e tecnologia.

5.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, destacam-se:

- Complementar o balanço de massa com as quantificações referentes às matérias primas (pó de ferro de média e de alta pureza, sucata de aço e pó de níquel);
- Complementar o balanço de massa com as quantificações referentes aos insumos (alumínio em pó, ferro, água, cal virgem calcinado, ácido clorídrico, ácido fluossilícico, hidróxido de potássio líquido, gás liquefeito de petróleo, soda cáustica, carvão vegetal, coque de petróleo);

- Complementar o balanço de massa com as quantificações referentes aos resíduos da separação magnética (nióbio, alumínio, silício, fósforo, enxofre, titânio, bário, manganês, ferro, ^{238}U , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{232}Th e ^{228}Ra);
- Complementar o balanço de massa com as quantificações referentes aos resíduos da deslamagem + flotação (barita, cálcio, sódio, nióbio, silício, alumínio, fósforo, enxofre, titânio, bário, manganês, ferro, ^{238}U , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{232}Th e ^{228}Ra);
- Complementar o balanço de massa com as quantificações referentes às emissões atmosféricas (material particulado, Pb, SO_2 , HCl, SO_x);
- Incluir no modelo de ACV do Nb o balanço de energia (elétrica e térmica) envolvendo desde a exploração do minério, seu beneficiamento, o processo de produção, transporte, uso e reuso.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 10004, NORMA BRASILEIRA, 2004.
- ABNT. 2004. **Resíduos Sólidos – Classificação**. NBR10004. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 71 p. Rio de Janeiro, RJ.
- ABRÃO, P.C. 1987. **Sobre a Disposição de Rejeitos de Mineração no Brasil**. I Simpósio sobre Barragens de Rejeito e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, REGEO 87, ABMS, Rio de Janeiro, RJ, 1-9.
- ALVES, A.R.; COUTINHO, A.R. 2015. **The evolution of niobium production in Brazil**. *Materials Research*, 18, 106-112.
- ANDRADE, M.L., CUNHA, L.M., GANDRA, G. 2000. **A Ascensão das mini-mills no cenário siderúrgico mundial**. BNDES Setorial, 12, 51-76.
- ANGLO AMERICAN BRASIL – Metais básicos, **relatório para a sociedade 2004**.http://www.angloamerican.com/~/media/Files/A/Anglo-American-Plc/development/reports/csreports/2005br/br_2004-12-31d/br_2004-12-31d.pdf.
- ASM International Handbook Committee, 1990. **ASM HANDBOOK**, 10ed,v.2-4.
- AUTHIER-MARTIN, M., FORTE, G., OSTAP, S., SEE, J. 2001. **The mineralogy of bauxite for producing smelter-grade alumina**. *JOM*, 53, 12, 36-40.
- AYANDA, O.S., ADEKOLA, F.A. 2011. **A Review of Niobium-Tantalum Separation in Hydrometallurgy**. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 10, 245-256.
- BARRETO, M.L. 1993. **Uma Abordagem Crítica da Legislação Garimpeira**, Série Estudos e Documentos - SED, CETEM/CNPq, RJ, No. 19, 58 pp.
- BAUMANN, H., TILLMAN, A.M. 2004. **The Hitch Hiker's Guide to LCA: An Orientation in Life Cycle Assessment Methodology and Application**. Lund: Studentlitteratur, Print.
- BAXTER, M. S. 1996. **Technologically enhanced radioactivity: an overview**. *Journal of Environmental Radioactivity*, 32(1), 3-17.
- BERMANN, C. 2007. **Impasses and controversies of hydroelectricity**. *Estudos avançados*, 21, 59, 139-153.
- BERTRAM, M., GRAEDEL, T.E., RECHBERGER, H., SPATARI, S. 2002. **The contemporary European copper cycle: waste management subsystem**. *Ecological Economics*, 42, 1, 43-57.

- BRASIL, 2001-a. Ministério de Ciência e Tecnologia. Centro de Tecnologia Mineral. **Mineração e Desenvolvimento Sustentável: Desafios para o Brasil**. Editor Maria Laura Barreto. Rio de Janeiro: CETEM; MCT, p.216.
- BRASIL, 2001-b. Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Balanco Mineral Brasileiro**. Brasília.
- BRASIL, 2010. Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Perfil da Mineração do Niobio**. Brasília.
- BURCHART-KOROL, D. 2009. **Life Cycle Assessment (LCA) Application in Industrial Processes Analyses**. Problemy ekologii, (6), 300-306.
- BURCHART-KOROL, D. 2011. **Significance of Environmental Life Cycle Assessment (LCA) Method in the Iron and Steel Industry**. Metalurgija, 50(3), 205-208.
- BUYS, B., 2012. **Terras-Raras: Uma Oportunidade Imperdível?**. Ciência e Cultura, 64(1), 8-9.
- CARTER, C.R.; ROGERS, D.S. 2008. **A Framework of Sustainable Supply Chain Management: Moving Toward New Theory**. International Journal of Physical Distribution and Logistics Management, 38, 360-387.
- CAUCHICK MIGUEL, P. A. 2010. **Metodologia de pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. Rio de Janeiro, Elsevier.
- CBMM(a) Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração, <http://www.cbmm.com.br/portug/indes.html>, acesso em 14/10/2012.
- CBMM(b) Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração. **Usos e Usuarios Finais de Niobio**. <http://www.cbmm.com.br/portug/capitulos/uses/use&user.htm>. Acesso em: 05 mai. 2014.
- CETEM, Centro de Tecnologia Mineral - Ministério da Ciência e Tecnologia, 2003. **Impactos de Mineração e Sustentabilidade no Semi-Árido. Estudo de Caso: Unidade de Concentração de Urânio-URA (Caetité, BA)**, ABRH, 18p.
- CHAPMAN, P.F.; ROBERTS, F.; 1983-a. **Metal Resources and Energy**. London: Butterworth and Co.
- CHAPMAN, P.F.; ROBERTS, F.; 1983-b. **Metals and Energy**, Butterwrth & Co. Ltd, London.
- CHEHEBE, J.R.B. 1998. **O Ciclo de Vida dos Produtos**. Revista CNI. 305, 22-28.
- CHERUBINI, F., BARGIGLI, S., & ULGIATI, S. 2009. **Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration**. Energy, 34(12), 2116-2123.

- CLEMENTE, A.; HIGACHI, H.Y. 2000. **Economia e Desenvolvimento Regional**. Ed. Atlas, São Paulo.
- CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear. 1988. **CNEN-NE-5.01: Transporte de Material Radioativo**, Rio de Janeiro.
- CURRAN, M.A. 1996. **Environmental Life Cycle Assessment**. Nova York: Macgraw-Hill, 363 p.
- DCC, 2010. **National Greenhouse Accounts (Nga) Factors**. Department of Climate Change, Australian Government, Canberra.
- de Oliveira, V. P. V., & de Araújo, R. C. P. 2013. **Management of a graduate program in development and environment in the northeast of Brazil: Challenges and sustainability**. *Tourism & Management Studies*, 227-236.
- DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral). 2013. **Sumário Mineral**, Brasília-DF.
- ECKELMAN, M.J. 2010. **Facility-Level Energy and Greenhouse Gas Life-Cycle Assessment of the Global Nickel Industry**. *Resources, Conservation and Recycling*, 54. 256–266.
- ELKINGTON, J. 1998. **Cannibals with forks: The triple bottom line of the 21st century**, Capstone.
- ELKINGTON, J. 2014. **Enter the triple bottom line**. disponível em: <http://kmhassociates.ca/resources/1/triple%20bottom%20line%20a%20history%201961-2001.pdf>, acesso em 13 de maio de 2014.
- FEAM, 2010. **Inventário de Resíduos Sólidos Industriais e Minerários-Minas Gerais, Ano Base 2008**. Fundação Estadual do Meio Ambiente. Belo Horizonte, Minas Gerais.
- FEAM, 2010a. **Levantamento da situação ambiental e energética do setor de ferroligas e silício metálico no Estado de Minas Gerais, prospecção de ações para o desenvolvimento sustentável da atividade. Relatório Técnico**. Gerência de Desenvolvimento e Apoio técnico às Atividades Industriais. Fundação Estadual do Meio Ambiente, Belo Horizonte, p.100.
- FERNANDES, F.R.C., ENRÍQUEZ. M.A.R.S, ALAMINO, R.C.J. 2011. **Recursos Minerais & Sustentabilidade Territorial: Grandes Minas**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI.
- FINNVEDEN, G., HAUSCHILD, M.Z., EKVALL, T., GUINEE, J., HEIJUNGS, R., HELLWEG, S., SUH, S. 2009. **Recent developments in life cycle assessment**. *Journal of environmental management*, 9, 1, 1-21.
- FIORINI, P.D.C., JABBOUR, C.J.C. 2014. **Analysis of support of information systems for environmental management practices in enterprises with ISO 14001: a multiple case study**. *Perspectivas em Ciência da Informação*, 19, 1, 51-74.

- FLICK, U. 2004. **Uma introdução a pesquisa qualitativa**. 2ª Ed., Porto Alegre, Bookman.
- GADOTTI, M. 2008. **Educar para a sustentabilidade: uma contribuição à década da educação para o desenvolvimento sustentável**. Produção de Terceiros Sobre Paulo Freire; Série Livros.
- GALLO, E., SETTI, A.F.F., MAGALHÃES, D.D.P., MACHADO, J.M.H., BUSS, D.F., NETTO, F.D.A.F., BUSS, P.M. 2012. **Saúde e economia verde: desafios para o desenvolvimento sustentável e erradicação da pobreza**. *Ciencia em Saude Coletiva*, 17, 6, 1457-1468.
- GARCÍA-VALVERDE, R., MIGUEL, C., MARTÍNEZ-BÉJAR, R., & URBINA, A. 2009. **Life cycle assessment study of a 4.2 kW p stand-alone photovoltaic system**. *Solar Energy*, 83(9), 1434-1445.
- GEOFÍSICA BRASIL. 2012. <http://geofisicabrasil.com/jupgrade/noticias/204-clipping/3676-cbmm-vai-produzir-terras-raras-a-partir-de-rejeitos-de-niobio.html>. acesso em 09 de setembro de 2014.
- GEORGESCU-ROEGEN, N. 1986. **The Entropy Law and the Economic Process in Retrospect**. *Eastern Economic Journal*, 3-25.
- GLOBE METALS & MINING. 2009. **Africa Down Under Conference– Perth, Australia**. <http://www.infomine.com/index/pr/Pa798464.PDF>, acesso em 8 maio de 2014.
- GODOY, A.S. 1995. **Introdução a pesquisa qualitativa e suas possibilidades**. *Revista de administração de empresas, SP*, 35, 2, 57-63.
- GRAHAM, R.A., SUTHERLIN, R.C., CHANG, W. 2001. **Niobium and Niobium Alloys in Corrosive Applications**. *Proceedings of the International Symposium Niobium, Orlando, Florida, USA*, p. 337-355.
- GREENWOOD, N.N. 2003. **Vanadium to Dubnium: From Confusion Through Clarity to Complexity**. *Catalysis Today*, 78, 5-11.
- GRILL, R., GNADENBERGER, A. 2006. **Niobium as Mint Metal: Production – Properties – Processing**. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials V24*, 4, 275–282.
- GUINÉE J.B., HEIJUNGS R., HUPPES G., ZAMAGNI A., MASONI P., BUONAMICI R. 2011. **Life cycle assessment: past, present, and future**. *Environmental Science and Technology*; 45(1):90–96.
- GWMG – Great Western Minerals Group presentation. 2009. **Rare Earth Magnets and Their Raw Materials Supply**. In: 5th International Rare Earths Conference, Hong Kong.
- HALADA, K., YAMAMOTO, R. 2001. **The Current Status of Research and Development on Ecomaterials Around the World**. *MRS Bulletin*, 11, 871–879.

- HANCOCK, G.F. 1984. **Energy Requirements for Manufacture of some non-ferrous metals.**Metals Technology, 11, 290-299.
- HUGON, P. 1980. **História das doutrinas econômicas.** 13ª ed. São Paulo, Editora Atlas.
- HUPPES, G. 1991. **Allocating impacts of multiple economic processes in LCA.** In: SETAC-Europe workshop. Lifecycle Assessment. SETAC. Brussels.
- IABr - INSTITUTO AÇO BRASIL - Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010. **Emissões de Gases de Efeito Estufa nos Processos Industriais – Produção de Metais (Ferro e Aço).** http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/mudancasclimaticas/geesp/file/docs/publicacao/nacional/2_comunicacao_nacional/rr/processos_industriais/brasil_mcti_ferro_aco.pdf, acesso em 11 de junho de 2013.
- IABr - INSTITUTO AÇO BRASIL - Ministério da Ciência e Tecnologia. 2009. **Relatório de Sustentabilidade.** http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/sustentabilidade/downloads/Relatorio_2009.pdf, acesso em 10 de junho de 2013.
- IABR - INSTITUTO AÇO BRASIL. <<http://www.acobrasil.org.br>>., acesso em 7 de maio de 2013
- IAMGOLD,<http://www.iamgold.com/files/pdf/Niobium%20101%20Final%20March%202012.pdf>, acesso em 18 de agosto de 2012.
- IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. 2012, **A Gestão Ambiental e Desenvolvimento Sustentável.**http://www.ibram.org.br/150/15001002.asp?ttCD_CHAVE=80171, acesso em 31 de junho de 2014.
- IEA, 2009. **Energy Technology Transitions for Industry: Strategies for the Next Industrial Revolution.** Paris, France.
- IEA, 2010a. **CO₂Emissions From Fuel Combustion.** International Energy Agency, Paris, France.
- IEA, 2010b. **Energy Balances of Non-Oecd Countries.** International Energy Agency, Paris, France.
- ILCD – International reference lyfe cycle handbook. 2010. **General guide for life cycle assessment – detailed guidance.** JRC European Comission.
- ILCD – International reference lyfe cycle handbook. 2012. **General guide for life cycle assessment – detailed guidance.** JRC European Comission.
- ILCD – International Reference Lyfe Cycle Handbook. 2012.**The International Reference Life Cycle Data System.** JRC European Comission, JRC Reference Reports.

- ISO 14.040 – International organisation for standardisation. 1997. **Environmental management – life cycle assessment – principles and framework.** Geneva.
- ISO 14.041 – International organisation for standardisation. 1998. **Environmental management – life cycle assessment – goal and scope definition and inventory analysis.** Geneva.
- ISSA FILHO, A., LIMA, P.R.A.S., SOUZA, O.D. 1984. **Aspectos da geologia do complexo carbonatítico do Barreiro, Araxá, MG, Brasil.** *CBMM, Complexos Carbonatíticos do Brasil: Geologia. São Paulo, CBMM, 20-44.*
- ISSA FILHO, A., RIFFEL, B.F., SOUSA, C.A. 2001. **Some aspects of the mineralogy of cbmm niobium deposit and mining and pyrochlore ore processing–araxá, mg–brazil.** In *Niobium Science & Technology: Proceedings of the International Symposium Niobium.*
- IT (Inovação Tecnológica). 2013. **Brasileiros Avançam Rumo às Superligas de Nióbio.** <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=superligas-de-niobio&id=020160130218>, acesso em 18 de junho de 2013.
- JERONYMO, A.C.J. 2007. **Deslocamentos de populações ribeirinhas e passivos sociais e econômicos decorrentes de projeto de aproveitamento hidrelétrico: A UHE Tijuco Alto/SP-PR** (Tese de doutorado, Universidade de São Paulo).
- JHA, A.R., 2014. **Rare Earth Materials: Properties and Applications.** CRC Press.
- JOLLIET, O., DUBREUIL, A., GLORIA, T., HAUSCHILD, M. 2005. **Progresses in life cycle impact assessment withing the UNEP/SETAC life cycle initiative.** *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 10 (6), pp. 447–448
- JORNAL ANGLO AMERICAN COMUNIDADES. <http://www.angloamerican.com.br/~media/Files/A/Anglo-American-Brazil/Attachments/pdf/jornal-anglo-american-comunidades-3.pdf>, acesso em 8 de maio de 2014.
- KLEMME, S. 2010. **Experimental constraints on the evolution of iron and phosphorus-rich melts: experiments in the system CaO-MgO-Fe₂O₃-P₂O₅-SiO₂-H₂O-CO₂.** *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 105(1), 1-8.
- KORONEOS, C.; STYLOS, N.; MOUSSIOPOULOS, N. 2006. **LCA of multicrystalline silicone photovoltaic systems.** *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11, 129-136.
- KUCK, P.; 2006. **Nickel, 2005 Minerals Yearbook.** Reston, VA: United States Geological Survey.

- KUSIK, C.L.; KENAHAN, C.B. 1978. **Energy use Patterns for Metal Recycling**. Washington, D.C.: U.S. Dept. of Interior.
- LAGOS, G., PETERS. D., 2010. **O Setor Mineiro na America do Sul**, Working Paper, nº 10.
- LAKATOS, E.M.; MARCONI, M.A. 2002. **Técnicas de pesquisa: planejamento e execução de pesquisas, elaboração, análise e interpretação dos dados**. 5ª Ed., São Paulo, Editora Atlas.
- LAVANDAIO, E. 2008. **Conozcamos más sobre minería**. Buenos Aires: SEGEMAR.
- LEMOS JÚNIOR, M.A. 2012. **Estudos para Avaliação da Capacidade de Reservatório de Rejeitos de Nióbio**. Dissertação de Mestrado, UFOP, Escola de Minas, NUGEO, 118p.
- LI, Y., CORDER, G.D., MCLELLAN, B.C. 2011. **Transport in the Minerals Industry e Contributions to Greenhouse Gas Emissions and Potential for Mitigation**. Minerals Engineering 24 (13), 1430-1439.
- LIFSET, R.J., GORDON, R.B., GRAEDEL, T.E., SPATARI, S., BERTRAM, M. 2002. **Where has all the copper gone: The stocks and flows project, part 1**. JOM, 54(10), 21-26.
- LIU, G., BANGS, C.E., MÜLLER, D.B. 2011. **Unearthing Potentials for Decarbonizing the U.S. Aluminum Cycle**. Environmental Science & Technology 45 (22), 9515-9522.
- LIU, G.; MÜLLER, D.B. 2012. **Addressing Sustainability in the Aluminum Industry: A Critical Review of Life Cycle Assessments**. Journal of Cleaner Production 35, 108-117.
- MANSANO, J., OLIVEIRA, A.C. 2012. **Inclusão social e a política nacional de resíduos sólidos**. Revista do Direito Público, 7(2), 17-40.
- MANZINI, E.; VEZZOLI, C. 2005. **O Desenvolvimento de Produtos Sustentáveis: Os Requisitos Ambientais dos Produtos Industriais**. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo.
- MARTIN, T.E.; DAVIES, M.P.; RICE, S.; HIGGS, T.; LIGHTHALL.P.C. 2002, **Stewardship of Tailings Facilities**. Mining Miner Sustain Dev, 20.
- MATTHIAS, B., JOHAN, B., AMARYLLIS, A. 2013. **Life cycle assessment in the construction sector: A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 26, 379-388.
- McLELLAN, B.C., CORDER, G.D., GIURCO, D.P., ISHIHARA, K.N. 2012. **Renewable Energy in the Minerals Industry: A Review of Global Potential**. Journal of Cleaner Production, 32, 32-44.
- MEADOWS, D.L. 1973. **Limites do Crescimento**. Ed. Perspectiva, São Paulo.

- MEMARY, R., GIURCO, D., MUDD, G., MASON, L. 2012. **Life cycle assessment: a time-series analysis of copper.** Journal of Cleaner Production, 33, 97-108.
- MENEZES, R. R., NEVES, G. D. A., & FERREIRA, H. C. 2002. **O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativ como matérias-primas cerâmicas alternativas.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 6(2), 303-313.
- MIGUEL, P.A.C.; FLEURY, A.; MELLO, C.H.P.; NAKANO, D.N.; LIMA, E.P.; TURRIONI, J.B.; HO, L.L.; MORABITO, R.; MARTINS, R.A.; SOUSA, R.; COSTA, S.E.G.; PUREZA, V. 2012. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações.** Elsevier, 2, São Paulo.
- MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. 2010. **SGM, Perfil da Mineração do Nióbio,** Relatório Técnico, 20.
- MONTEIRO, J.M., PECORA GOMES, C.C., SÁ, L., FURTADO, T.F. 2014. **Política nacional de resíduos sólidos–lei 12.305/2010 uma visão geral e sua interface com o Porto de Santos.** Interfac EHS-Revista de Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade, 9(1).
- NBR ISO 14040. 2001. **Avaliação do Ciclo de Vida: princípios e estrutura** ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 10 p.
- NORGATE, T. E., & RANKIN, W. J. 2001. **Greenhouse gas emissions from aluminium production—a life cycle approach.** Greenhouse gases in the Metallurgical Industries: Policies, Abatement and Treatment,(Met Soc CIM), Toronto, 89.
- NORGATE, T., HAQUE, N. 2010. **Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations.** Journal of Cleaner Production, 18(3), 266-274.
- NORGATE, T.E., JAHANSHAHI, S., RANKIN, W.J. 2007. **Assessing the Environmental Impact of Metal Production Processes.** Journal of Cleaner Production, 15, 838-848.
- NUNES C. A., D. G. PINATTI AND A. ROBIN.; 1999. **International Journal of Refractory Metals & Hard Materials** 17, p. 305-314.
- OLIVEIRA, M.S., QUEIROZ, G.M., GUIMARÃES, R.C., ATAÍDE, C.H., BARROZO, M.A.S. 2007. **Selectivity in phosphate column flotation.** Minerals engineering, 20(2), 197-199.
- OLIVEIRA, R. 2006. **Proposta de Um Novo Modelo Biocinético para o Nióbio.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- PAN, J.N., PAN, J., LEE, C.Y. 2009. **Finding and optimising the key factors for the multiple-response manufacturing process.** International Journal of Production Research, 47(9), 2327-2344.

- PARENT, J.; CUCUZZELLA, C.; REVERET, J.P. 2013. **Revisiting the role of LCA and SLCA in the transition towards sustainable production and consumption**. *International Journal Life Cycle Assessment*, 18, 1642–1652.
- PENG, J; LU, L.; YANG, H. 2013. **Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems**. *Renewable and sustainable energy reviews*, 19, 255-274.
- PEREIRA, K.C.D. 2006. **Estudo da exposição ocupacional a tântalo e radionuclídeos naturais**. Tese de doutorado, UFRJ, IBCCF, Rio de Janeiro.
- PETRIE, J. 2007. **New Models of Sustainability for the Resources Sector A Focus on Minerals and Metals**. *Trans IChemE*, 85, 88–98.
- PIRES DO RIO, M., AMARAL, E. C. S., FERNANDES, H. M., & ROCHEDO, E. R. R. 2002. **Environmental radiological impact associated with non-uranium mining industries: a proposal for screening criteria**. *Journal of environmental radioactivity*, 59(1), 1-17.
- PONTING, C. 1995. **Uma História Verde do Mundo**. Rio de Janeiro, Ed. Civilização Brasileira.
- PULLEN, J. 2000. **The use of LCA by the International Aluminum Industry**. *Light Metal Age*, 80.
- QUELHAS, K.A.S. 2007, **Estudo da Corrosão do Nióbio em Meio Metanólico**, Tese de doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro.
- RAMACHANDRA RAO, S. 2006. **Chapter 7 - Metal Recycling**. *Waste Management Series*, 7, 167-268.
- REBITZER, G., BUXMANN, K. 2005. **The role and implementation of LCA within life cycle management at Alcan**. *Journal of cleaner production*, 13(13), 1327-1335.
- RECK, B.K., MÜLLER, D.B., ROSTKOWSKI, K., GRAEDEL, T.E. 2008. **Anthropogenic Nickel Cycle: Insights Into use, Trade, and Recycling**. *Environmental Science & Technology*, 42, 3, 394–400.
- REID, C., BECAERT, V., AUBERTIN, M., ROSENBAUM, R.K., DESCHÊNES, L. 2009. **Life cycle assessment of mine tailings management in Canada**. *Journal of Cleaner Production*, 17(4), 471-479.
- REUTER, M.A., KROGER, J.D., YANG, T. 1994. **Direct Reduction During the Production of Ferroniobium in an Electric Furnace**. *Minerals Engineering*, 7, 279-292.
- REVISTA EXAME. 2012. **Os 15 Países que mais Emitem GEE e Esquentam o Planeta**. <http://exame.abril.com.br/meio-ambiente-e-energia/noticias/os-15-paises-que-mais-poluem-e-esquentam-o-planeta#4>, acesso em 5 de maio de 2014.

- RIOS, A.P. 2011. **Desenvolvimento de tecnologia de sinterização industrial de concentrado de pirocloro via forno rotativo**. Dissertação de Mestrado, REDEMAT, UFOP, Ouro Preto, MG.
- RITCEY, G.N.; 2006. **Niobium (Columbium) and Tantalum, 2nd Edition. Solvent Extraction-Principles and Applications to Process Metallurgy**. G.M. Ritcey and Associates Incorporated, Ottawa, Canada.
- ROCIO, M.A.R.; SILVA, M.M.; CARVALHO, P.S.L.; CARDOSO, J.G.R. 2012, **Terras-Raras: Situação Atual e Perspectivas**. Mineração, BNDES Setorial 35, 369-420.
- ROSKILL INFORMATION SERVICES LTD., 2009, **The economics of niobium 2009** (11th ed.): London, United Kingdom, 222 p.
- SANTANA, R.C., FARNESE, A.C., FORTES, M.C., ATAÍDE, C.H., BARROZO, M.A. 2008. **Influence of particle size and reagent dosage on the performance of apatite flotation**. Separation and Purification Technology, 64(1), 8-15.
- SANTOS, M.F.N., BATTISTELLE, R.A.G., HORI, C.Y., JULIOTI, P.S. 2011. **Importância da Avaliação do Ciclo de Vida na Análise de Produtos: Possíveis Aplicações na Construção Civil**; GEPROS (Gestão da Produção, Operações e Sistemas), 2, 57-73.
- SEMAD - Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. 2012, **PROTOCOLO Nº 041507/2012**. http://200.198.22.171/down.asp?x_caminho=reunioes/sistema/arquivos/material/&x_nome=ITEM_12.5_Cia_Brasi.Metalurgia_Mineira%E7%E3o_CBMM_-_PU.pdf, acesso em 10 de dezembro de 2014.
- SEPPALA, J., KOSKELA, S., MELANEN, M., PALPERI, M. 2002. **The Finnish Metals Industry and the Environment**. Resources, Conservation and Recycling, 35. 61–76.
- SILVA, A.L.V.C., MEI, P.R. 2006. **Aços e Ligas Especiais**. São Paulo: Editora Blucher.
- SILVA, L.G.O., 1994. **Nióbio: mercado nacional e internacional, modelo de previsão do consumo de ferro-nióbio**. Dissertação de Mestrado. Campinas: UNICAMP; 117 p.
- SMITH, J., PARTICIPANTS, S., CASTINGS, A., MFG, B.B., MAGOTTEAUX, I. 2012. **Final Technical Report Project Title: Melting Efficiency Improvement**. Award Number: DE-FC36-04GO14230 Project Period: (January 2004–June 2012).
- SOUSA, R.M.F., FERNANDES, L.E., GUERRA, W. 2013. **Nióbio**. Química Nova na Escola, 35, 1, 68-69.
- SOUZA, C.A.F. 2001. **The Evolution of FeNb Manufacturing**, Niobium Science & Technology, TMS.

- STEWART, M., PETRIE, J. 2006. **A Process Systems Approach to Life Cycle Inventories for Minerals: South African and Australian Case Studies.** Journal of Cleaner Production, 14, 1042-1056.
- STEWART. M.; BASSON. L.; PETRIE. J.G. 2003. **Evolutionary Design for Environment in Minerals Processing.** Department of Chemical Engineering, University of Sydney, Sydney, Australia, 81, Part B.
- SWART, P., DEWULF, J. 2013. **Quantifying the impacts of primary metal resource use in life cycle assessment based on recent mining data.** Resources, Conservation and Recycling, 73, 180-187.
- TAN, R.B.H., KHOO, H.H. 2005. **An LCA Study of a Primary Aluminum Supply Chain.** Journal of Cleaner Production, 13, 607-618.
- TANIMOTO, A.H., DURANY, X.G., VILLALBA, G., PIRES, A.C. 2010. **Material Flow Accounting of the Copper Cycle in Brazil.** Resources, Conservation and Recycling, 55, 20–28
- TMS. 2001. **Niobium Science & Technology.** Proceedings of the International Symposium Niobium 2001, Orlando, Florida, USA.
- TREVIZAN, E.V. 2013. http://engenhariademinasufg.com.br/2013-1/TCC_site/elielton.pdf. acesso em 09 de setembro de 2014.
- UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 1993. **Sources and Effects of Ionizing Radiation.** United Nations, New York.
- USGS - United States Geological Survey.2010. **Mineral Commodity Summaries 2010.** Washington, DC.
- USGS - United States Geological Survey.2011. **Minerals Yearbook 2010: Aluminium (Advanced Release).** Washington, DC.
- VALERO, A., BOTERO, E. 2002. **Exergetic evaluation of natural mineral capital (2) Application of the methodology to current world reserves.** ECOS, 2, 63-78.
- VAN BEERS, D., BERTRAM, M., FUSE, K., SPATARI, S., GRAEDEL, T.E. 2003. **The contemporary African copper cycle: one year stocks and flows.** Journal South African Institute of Mining and Metallurgy,103, 3, 147-162.
- VICK, S.G. 1983. **Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams,** Wiley Interscience, New York.
- VILLAS BÔAS, R.C. 2011, **Indicadores de Sustentabilidade para a Indústria Extrativa Mineral: Estudos de Casos,** Rio de Janeiro, CETEM/MCT/CNPq.
- WCED – World Commission on Environment and Development. 1987. **Our Common Future.** Oxford University Press, Oxford.

- WEIEP. 2000. **Workshop on dissemination of eco-development experiences from the India eco-development project at national level.** Consultancy Report. Indian Institute of Forest Management, 2000.
- YELLISHETTY, M., MUDD, G. M., RANJITH, P. G., THARUMARAJAH, A. 2011. **Environmental life-cycle comparisons of steel production and recycling: sustainability issues, problems and prospects.** Environmental Science & Policy, 14(6), 650-663.
- YIN, R. K. 2001. **Estudo de caso – planejamento e metodo.** 2ª Ed., São Paulo, Bookman.
- ZHU, Z.; CHENG, C,Y. 2011. **Solvent Extraction Technology for the Separation and Purification of Niobium and Tantalum: A Review.** Hydrometallurgy, 107, 1-12.