



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
MESTRADO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ADMINISTRAÇÃO E
POLÍTICA DE RECURSOS MINERAIS

ANÁLISE DOS PRINCIPAIS ELEMENTOS LIGADOS À OFERTA PRIMÁRIA DE ALUMÍNIO

MARCOS ANDRÉ GOMES VEIGA GONÇALVES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Este exemplar corresponde à
redação final da tese defendida
por *Marcos André Gomes Veiga Gonçalves*
e aprovada pela Comissão Julgadora
em *09/05/96*.

Paul Sudec
ORIENTADOR

CAMPINAS - SÃO PAULO

Maio - 1996

G586a

27981/BC



UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
MESTRADO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ADMINISTRAÇÃO E
POLÍTICA DE RECURSOS MINERAIS**

MARCOS ANDRÉ GOMES VEIGA GONÇALVES

**ANÁLISE DOS PRINCIPAIS ELEMENTOS LIGADOS À
OFERTA PRIMÁRIA DE ALUMÍNIO**

Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geociências - Área de concentração em Administração e Política de Recursos Minerais.

Orientador: Saul Barisnik Suslick - IG/UNICAMP

CAMPINAS - SÃO PAULO

Maio - 1996



DADE 80
CHAMADA UNICAMP
586a
27/981
667/96
C D
RECO R\$ 11,00
ATA 05/07/96
* CPD

M-00089585-5

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA I.G. - UNICAMP

Gonçalves, Marcos André Gomes Veiga
G586a Análise dos principais elementos ligados à oferta primária de alumínio
Marcos André Gomes Veiga Gonçalves. -
Campinas, SP: [s.n.], 1996.

Orientador: Saul Barisnik Suslick.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas,
Instituto de Geociências.

1. Alumínio - Indústria. 2. Programação Linear. I. Suslick, Saul
Barisnik. II. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de
Geociências. III. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
MESTRADO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ADMINISTRAÇÃO E
POLÍTICA DE RECURSOS MINERAIS

ANÁLISE DOS PRINCIPAIS ELEMENTOS LIGADOS À OFERTA
PRIMÁRIA DE ALUMÍNIO

AUTOR: Marcos André Gomes Veiga Gonçalves

ORIENTADOR: Saul Barisnik Suslick - IG/UNICAMP

Aprovada em: ____/____/____

PRESIDENTE: Prof. Dr. Saul Barisnik Suslick

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Saul Suslick", with a long horizontal line extending to the right.

EXAMINADORES:

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Dorival de Carvalho Pinto", written in a cursive style.

Prof. Dr. Dorival de Carvalho Pinto

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Celso Pinto Ferraz", written in a cursive style.

Prof. Dr. Celso Pinto Ferraz

Campinas, de maio de 1996

**Este trabalho é dedicado à Adelaide
Walter e Natércia (in memoriam)
sem os quais nada disso seria
possível**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer ao meu orientador, Prof. Dr. Saul B. Suslick, pelo apoio, interesse e colaboração em todas as etapas desta dissertação.

Ao apoio financeiro do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, através da concessão da bolsa de estudo.

Ao Projeto de Monitoração e Disponibilidade de Recursos Minerais através do convênio PADCT/FINEP/IG, na pessoa de seus coordenadores, pelo suporte e infra-estrutura, que muito contribuíram para a abrangência deste trabalho e pela oportunidade da realização do I Workshop da Monitoração da Disponibilidade Primária de Alumínio.

Ao Prof. Dr. Dorival de Carvalho Pinto (UFPE) pelo interesse demonstrado durante a confecção do modelo, indicando-me os procedimentos mais adequados.

Aos Profs. Dr. Celso P. Ferraz e Dr. Armando Remacre, do IG/UNICAMP, pelo auxílio dado em fase fundamental deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Carmine Nappi (HEC - Université de Montreal) pelo entusiasmo demonstrado e pelo auxílio dado com o fornecimento de dados importantes.

Ao Prof. Raimundo Campos Machado pelas sugestões dadas e pelo auxílio bibliográfico em etapa fundamental deste trabalho.

À ABAL, Associação Brasileira do Alumínio, na pessoa do Sr. William Okay, pelas várias visitas e consultas técnicas realizadas.

Agradeço também aos seguintes profissionais pelas críticas, informações e sugestões: Luis Fransisco Gomes D'Assumpção, da Superintendência de Tecnologia da Companhia Vale do Rio Doce S.A.; Alberto Mazoni A. Neto, superintendente de Engenharia de Processos da Alcoa; Djalma R. Teixeira Filho, presidente da Billiton Metais; Adjarma Azevedo, diretor executivo da Alcoa.

À secretária Cristina do DARM pela compreensão e presteza nos serviços de secretaria, assim como aos demais funcionários deste instituto.

À Márcia, Cássia e Dora da biblioteca do IG, pela disposição e boa vontade a mim dispensadas nas diversas visitas a biblioteca.

Aos amigos e colegas deste instituto que direta ou indiretamente contribuíram comigo durante estes dois últimos anos.



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
MESTRADO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ADMINISTRAÇÃO E
POLÍTICA DE RECURSOS MINERAIS**

**ANÁLISE DOS PRINCIPAIS ELEMENTOS LIGADOS A OFERTA
PRIMÁRIA DE ALUMÍNIO**

RESUMO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Marcos André Gomes Veiga Gonçalves

O setor produtor de bauxita-alumina-alumínio passou ao longo das últimas duas décadas por um importante processo de mudanças estruturais e, sem dúvida, se tornou muito mais competitivo em nível internacional. O Brasil está consolidado hoje numa posição de destaque entre os seis maiores produtores mundiais de bauxita, alumina e alumínio primário.

Cada vez mais as empresas buscam a correta gestão dos recursos minerais e de outros insumos necessários aos três estágios de produção de alumínio primário. Desse modo, as técnicas de pesquisa operacional vêm contribuir muito para a otimização de custos e do uso de insumos na produção de metal primário. Dentro dessa filosofia, esta dissertação visa mostrar o potencial de aplicação da programação linear na minimização dos custos de transporte de uma empresa produtora de alumínio primário. Para tal foi elaborado um modelo de diagrama de fluxos de redes que busca minimizar custos de transporte.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
MESTRADO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ADMINISTRAÇÃO E
POLÍTICA DE RECURSOS MINERAIS

THE MAIN ASPECTS OF THE PRIMARY ALUMINUM INDUSTRY

ABSTRACT

MASTER DISSERTATION

Marcos André Gomes Veiga Gonçalves

During the past two decades, the productive sector of bauxite-alumina-aluminum has undergone an important process of structural change, and has undoubtedly become more competitive in the international arena. Brazil has become a major player in this field.

Companies have increasingly searched for the optimal allocation of mineral resources and other inputs necessary for the three stages of primary aluminum production. As a result, the operations research techniques have become paramount in the cost optimization and in the use of other inputs in primary metal production. In this context, this dissertation intends to demonstrate the potential of linear programming in minimizing transportation costs of a primary aluminum producer. A Network flow model which minimizes transportation costs has been developed for this purpose.

SUMÁRIO

	Página
AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE ABREVIACÕES, UNIDADES E SÍMBOLOS	viii
<hr/>	
I - INTRODUÇÃO	1
I.1. Objetivos	3
I.2. Justificativas	3
I.3. Método utilizado	5
II - EVOLUÇÃO DA INDÚSTRIA DE ALUMÍNIO PRIMÁRIO	7
II.1 Histórico	7
II.2 Características do setor	8
II.2.1 Integração vertical na indústria	9
II.2.2 A oligopolização	11
II.2.3 A internacionalização da indústria	15
II.2.4 Uso intensivo de energia e capital	18
II.2.5 A reciclagem	22
II.3 A indústria do alumínio no Brasil	23
II.3.1 Reservas brasileiras de bauxita	24
II.3.2 O mercado brasileiro de alumínio	25
III. - PANORAMA SETORIAL	29
III.1 Produção mundial e reservas de bauxita	29
III.2 Evolução e controle da produção mundial de bauxita	32
III.2.1 O IBA	33
III.3 Evolução e controle da produção mundial de alumina	34
III.3.1 Os principais consórcios refinadores de alumina	38
III.4 Evolução e controle da produção mundial de alumínio	39
III.4.1 Contratos vinculados de fornecimento de energia	42
III.4.2 Os produtores independentes	47
III.4.3 As seis irmãs do alumínio	49

IV. - UM MODELO DE FLUXO DE REDES PARA A ANÁLISE DO COMÉRCIO DE METAL PRIMÁRIO	53
IV.1 A pesquisa operacional	53
IV.2 Os modelos minerais	54
IV.3 Programação Linear	54
IV.3.1 Introdução	54
IV.3.2 O problema de programação linear	55
IV.3.3 O método Simplex	57
IV.3.4 Análise de Sensibilidade	60
IV.3.5 Interpretação gráfica de um PPL	61
IV.3.6 Diagramas de fluxo de redes	66
IV.3.6.1 Definições básicas	67
IV.3.7 A teoria dos gráficos na programação linear	69
IV.3.7.1 Diagramas de fluxo de redes de custo mínimo	74
IV.4 O modelo desenvolvido	75
IV.4.1 Objetivo do modelo	77
IV.4.2 Variável utilizada	78
IV.4.3 Estrutura do modelo	79
IV.4.4 Componentes do modelo	80
IV.4.5 Método utilizado	83
IV.4.5.1 Limites superiores	89
IV.4.5.2 Limites inferiores	90
IV.4.5.3 Arcos de custos	90
IV.4.5.4 Coeficientes	91
IV.4.6 Análise crítica	91
V - CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
LISTA DE APÊNDICES	107
II.1 Principais minas de bauxita do mundo	108
II.2 Principais refinarias de alumina do mundo	109
II.3 Principais fundições de alumínio primário do mundo	110
II.4 Mudanças na localização dos centros produtores de bauxita/alumina/alumínio	112
II.5 Produção e custos unitários de bauxita	113
II.6 Produção e custos unitários de alumina	114
II.7 Produção e custos unitários de alumínio	115
II.8 Produção brasileira de alumínio primário por empresas	116
IV.1 Diagrama de fluxos de redes para as instalações da Alcan	117

LISTA DE FIGURAS

I.1 Banco de dados do monitoramento da disponibilidade primária de alumínio	5
II.1 Futuro da indústria do alumínio	13
II.2 Distribuição estratégica no alumínio	15
II.3 Investimentos em alumínio 1980 - 1995 (US\$ milhões)	18
III.1 Mineração mundial de bauxita 1900 - 1980	30
III.2 IBA e produção de bauxita	34
IV.1 Algoritmo Simplex (Adaptado)	59
IV.2 Resolução gráfica de um PPL	61
IV.3 Solução ótima única - região limitada	62
IV.4 Solução possível - região não-limitada	63
IV.5 Várias soluções ótimas - região limitada	63
IV.6 Várias soluções ótimas - região não-limitada	64
IV.7 Dígrafo	67
IV.8 Exemplo de fluxo de rede: 4 nós e 7 arcos	67
IV.9 Exemplos de estrela-avante e estrela-reversa	69
IV.10 Caminhos, cadeias, circuitos, ciclos e árvores	72
IV.11 Modelo de fluxo de redes simplificado	82

LISTA DE TABELAS

II.1 Grupos estratégicos e seus interesses	13
II.2 Estrutura dos custos operacionais no alumínio	20
II.3 Consumo de energia dos produtores de alumínio	20
II.4 Produção cativa de energia por região (%)	21
II.5 Fontes de energia utilizadas pelos produtores de alumínio (%)	21
III.1 Maiores produtores ocidentais de bauxita	32
III.2 Maiores produtores ocidentais de alumina	35
III.3 Principais consórcios produtores de alumina	38
III.4 Produção e contratos vinculados de fornecimento de energia	43
III.5 Tarifas praticadas pelas principais companhias (mills/Kwh)	43
III.6 Unidades abastecidas pela BPA. Vencimento dos contratos de fornecimento.	45
IV.1 Os dois formatos de um PPL	65
IV.2 Minas incluídas no modelo	86
IV.3 Refinarias incluídas no modelo	86
IV.4 Reduções incluídas no modelo	87

LISTA DE ABREVIações, UNIDADES E SÍMBOLOS

A-L Lonza:	Alusuisse-Lonza Holding Ltd.
a.a.:	ao ano
a.s.:	Aktieselskab
ABAL:	Associação Brasileira do Alumínio
AG:	Aktiengesellschaft
Alba:	Aluminium Bahrain
Alcan:	Alcan Aluminium Limited
Alcoa:	Aluminum Company of America
Alumax:	Alumax Inc.
Alpart:	Aluminum Partners of Jamaica
Bayer:	Processo Bayer de refino de alumina
Billiton:	Billiton International Metals BV
BPA:	Bonneville Power Administration
BV:	Besloten Vennootschap
CBA:	Companhia Brasileira de Alumínio
CEE:	Comunidade Económica Européia
CEI:	Comunidade dos Estados Independentes
Comalco:	Comalco Limited
Corp:	Corporation
CPM	Critical Path Method
CV:	Corporación Venezolana
CVG:	Corporacion Venezolana Guayana
CVRD:	Companhia Vale do Rio Doce S.A.
DCFROR:	Discounted Cash Flow Rate of Return
DNPM	Departamento Nacional da Produção Mineral
Dubal:	Dubai Aluminium Company Limited
EAU:	Emirados Árabes Unidos
Elkem:	Elkem a/s
EUA:	Estados Unidos da América
FMI:	Fundo Monetário Internacional
Frialco:	Friguia Aluminium Company
Gencor:	Gencor Limited
GmbH:	Gesellschaft mit beschrenkter Haftung
Gove:	Gove Aluminium Limited
Gwh:	Gigawatt-hora
Hydro:	Hydro Aluminium a.s
IBA:	International Bauxite Association
Inc.:	Incorporated
IPAI:	International Primary Aluminum Institute
IQC:	Indústrias Químicas Cataguazes
Kaiser:	Kaiser Aluminum and Chemical Corporation
KgAl:	Quilograma-alumínio
Kwh:	Quilowatt-hora
lb.:	Libra
Levy:	Sobretaxa cobrada por alguns países produtores de bauxita. Cada país adotou um critério para o seu cálculo.
LINDO:	Linear Interactive Discrete Optimizer

LME:	London Metals Exchange
MCNFP:	Minimum Cost Network Flow Problems
mill:	Unidade correspondente a um milésimo de um dólar
mill/Kwh:	mill por quilowatt-hora
MRN:	Mineração Rio do Norte S.A.
Mt:	Milhões de toneladas.
MW:	Megawatt
NAAC:	Nippon Amazon Aluminium Company
Nabalco:	Nabalco Pty. Limited
Noranda:	Noranda Inc.
Norsk Hydro:	Norsk Hydro a.s
OPEP:	Organização dos Países Exportadores de Petróleo
Ormet:	Ormet Corporation
PADCT:	Programa de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico
Pechiney:	Aluminium Pechiney
PERT:	Program Evaluation and Review Technique
PIB:	Produto Interno Bruto
PL:	Programação Linear
PNB:	Produto Nacional Bruto
PPL:	Problema de programação linear
Pty:	Proprietary
R^2	Espaço vetorial real canônico de dimensão 2
R^3	Espaço vetorial real canônico de dimensão 3
Reynolds:	Reynolds Metals Company
RFA:	República Federativa da Alemanha
RTZ:	Rio Tinto-Zinc Corporation
S.A:	Sociedade Anônima
SpA:	Società per Azione
Sperry Rand:	Sperry Rand Co.
Sté:	Société
t:	tonelada métrica, equivalente à 1000 Kg
t/ano:	toneladas métricas por ano
traders:	negociantes
UNCTAD:	United Nations Conference on Trade and Development
URSS:	União das Repúblicas Socialistas Soviéticas
US\$:	Dólar norte-americano
US\$/t:	Dólar norte-americano por tonelada
USBM:	United States Bureau of Mines
VAW:	VAW aluminium AG
WBMS:	World Bureau of Metal Statistics
WMC:	Western Mining Corporation Holdings Limited

Este trabalho é dedicado à Adelaide,
Walter e Natércia (in memoriam),
sem os quais nada disso seria
possível.

I. INTRODUÇÃO

A indústria de alumínio primário tem sido palco de grandes mudanças neste final de século. Este processo vem ocorrendo desde meados da década de 70 devido a crise energética, passando pelo crescimento dos consórcios produtores de alumina e metal primário durante os anos 80 e pela migração das instalações produtoras para os países com grande potencial energético de baixo custo. Dentro desta conjuntura de mudanças o Brasil surgiu como peça-chave do processo, uma vez que se destaca como quarto maior produtor mundial de bauxita, quinto maior de alumina e quinto de alumínio primário.

Com o aumento da competitividade, o mercado mundial de bauxita-alumina-alumínio tem-se caracterizado por um grande número de participantes e ainda pelo surgimento de alguns nichos de mercado onde as seis irmãs do alumínio buscam concentrar suas atividades. A modelização dos mercados minerais constitui na atualidade uma importante ferramenta de planejamento para analisar e simular o comportamento futuro das suas variáveis.

Nesta dissertação propõe-se o uso da programação linear (PL) aplicado ao fluxo de materiais que representa um elemento importante na análise de custos nas transações entre bens minerais. Como alvo da pesquisa, escolheu-se o alumínio devido a posição de destaque que ocupa tanto na oferta no Brasil, como na geração de diversos produtos em cada estágio de fabricação.

Esta dissertação foi dividida em duas partes. A parte A é composta pelo segundo e terceiro capítulos, e trata de caracterizar e contextualizar a oferta de alumínio primário. A parte B abrange alguma teoria de PL e ainda o modelo proposto neste trabalho, com uma análise dos resultados obtidos.

No segundo capítulo são ilustradas as principais características do setor, buscando-se mostrar que houve mudanças significativas ao longo dos últimos 20 anos. Buscou-se também mostrar que o setor de bauxita-alumina-alumínio no Brasil tem as mesmas características e formas de atuação do resto do mundo.

No capítulo três são discutidos aspectos atuais do setor, contando-se com análise da oferta de bauxita-alumina-alumínio no mundo. Para tal foi feita uma análise dos principais atributos dessa indústria, organizados previamente através da criação de um banco de dados intitulado BANCAL.

O quarto capítulo procura passar uma fundamentação teórica sobre a PL, tendo um forte apelo gráfico para a melhor compreensão. Este apresenta uma proposta de utilização da PL como instrumento de otimização da disponibilidade primária de bauxita-alumina-alumínio. A técnica de fluxo de redes é também apresentada como um método que integra o consumo com a oferta e ainda possibilita estimar os impactos nos custos, capacidade, demanda, dentre outras variáveis do mercado mineral.

No capítulo final são discutidos os resultados obtidos com o modelo, e ainda a situação atual da indústria mundial do alumínio.

I.1 OBJETIVOS

A presente dissertação tem como objetivo principal demonstrar a aplicabilidade da PL na análise da oferta de "commodities" minerais, neste caso do alumínio primário. É aplicada a programação por fluxos de redes na minimização dos custos de transporte entre as minas, refinarias e fundições da Alcan no mundo. Para tanto foram utilizados valores hipotéticos para os custos de transporte.

I.2 JUSTIFICATIVAS

A modelagem mineral segundo Labys et. al. (1985) apesar de diversa e variada, proporciona uma análise sistemática e um enfoque objetivo dos mercados minerais e também das indústrias do setor. A PL surge como uma técnica de modelagem (otimização) simples, disponível e de grande aplicação. Esta por sua vez tem desdobramentos que são a programação inteira, linear por partes, geométrica e diagramas de fluxo de redes. Os métodos de qualidade total adotados atualmente pelas empresas apresentam um vínculo muito forte com as técnicas de PL.

Tendo em vista a complexidade das relações existentes entre variáveis e os seus determinantes no mercado mineral, os modelos são bastante utilizados pelos analistas no processo de decisão e na análise de oportunidades de investimentos no setor mineral.

Um dos modelos que vêm sendo empregados na análise dos mercados dos materiais e minerais com bastante ênfase nos últimos tempos é a programação matemática. Na literatura existem diversas variantes desta técnica (linear, não linear, geométrica, etc...) (Winston, 1993). Os primeiros trabalhos iniciaram nos anos 50 (Dantzig, 1949; Dorfman et. al. 1950). Em

síntese essas técnicas buscam escolher a melhor solução dentre um conjunto de alternativas que apresentem um certo tipo de viabilidade. A função objetivo busca maximizar ou minimizar certas relações, sujeita a um conjunto de restrições que descrevem o ambiente de decisões.

Com a globalização da economia e a queda de muitas alíquotas de importação entre mercados regionais, o papel dos custos de transporte de minério tanto em nível transnacional (entre países), como transcontinental (entre países ou blocos econômicos), passa a ser de grande importância para o país ou empresa. A análise do fluxo de materiais entre os produtores e seus mercados constitui peça-chave para a competitividade de uma empresa. No caso da indústria de alumínio, o fluxo de materiais desde a mineração de bauxita até a venda de metal primário aos mercados consumidores envolve diversos estágios de produção e adição de vários insumos.

No setor de alumínio, onde uma empresa normalmente controla os diversos estágios de produção, desde a exploração de bauxita até a venda de produtos secundários, são inúmeras as aplicações da PL. Em minas de bauxita pode-se otimizar a alocação de rampas de acesso, transporte de minério para a refinaria ou porto, escalonamento de horários de diversas atividades (carregamento e descarregamento de navios, turnos de funcionários, e etc...). Numa refinaria há possibilidades de uso desta técnica no fluxo de materiais durante o processo de refino e até no transporte da produção para fundições ou mercados consumidores. No caso das fundições a PL pode ser utilizada no planejamento da produção de metal primário, na otimização da composição de ligas metálicas e no transporte de material

dentro e fora das instalações, além de blendagem de uma série de insumos necessários a produção de alumínio primário.

I.3 MÉTODO UTILIZADO

Para o cumprimento do objetivo proposto nesta dissertação fez-se necessária a elaboração de um banco de dados denominado BANCAL¹, incluindo todas as características e atributos da oferta de alumínio primário. A estrutura básica do banco de dados BANCAL procurou abordar todos os aspectos relevantes de uma empresa produtora ou em fase pré-operacional de produção (bauxita, alumina ou alumínio primário) sendo o mesmo dividido em quatro módulos principais e outros submódulos, conforme ilustrado na figura I.1 (página 6).

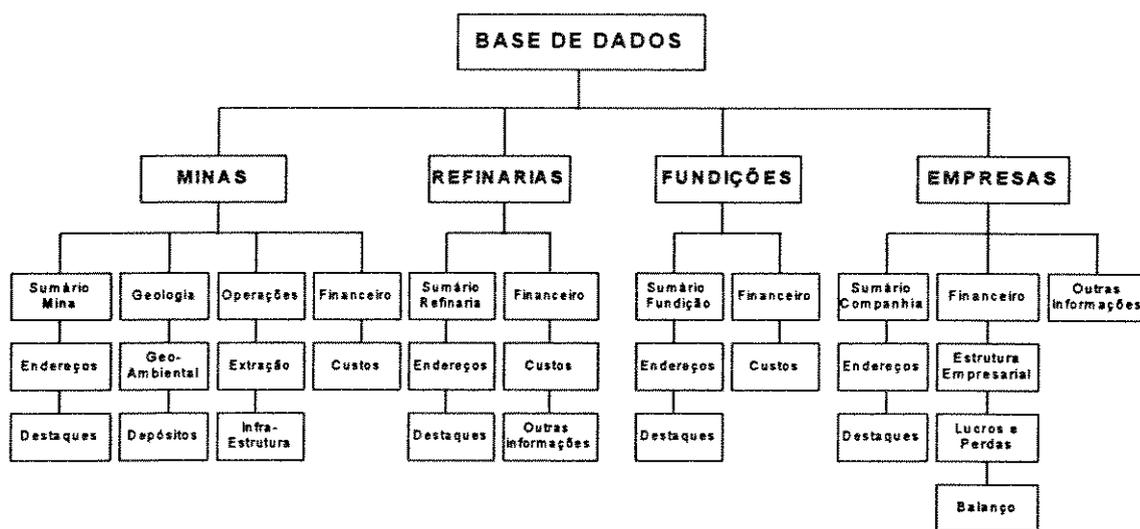


Figura I.1 Banco de dados do monitoramento da disponibilidade primária do alumínio.

Fonte: UNICAMP, 1995.

De posse desses dados foi escolhida uma empresa, a Alcan, para a aplicação do modelo de fluxo de redes. Esta escolha deu-se em virtude da

¹Este banco de dados foi elaborado graças ao convênio PADCT/FINEP/IG, e é parte integrante do projeto "Monitoração da Disponibilidade Primária de Recursos Minerais.

facilidade de aplicação dos resultados na cadeia produtiva bauxita-alumina-alumínio, e da grande quantidade de informação disponível.

O modelo foi construído e testado, e com os resultados obtidos pelo programa LINDO, foi feita uma análise dos seus principais aspectos.

II. EVOLUÇÃO DA INDÚSTRIA DE ALUMÍNIO PRIMÁRIO

II.1 HISTÓRICO

A bauxita, principal minério de alumínio, foi descoberta em 1821 por Pierre Berthier que lhe deu este nome em face do local do descobrimento, uma vila chamada Baux-de-Provence na França. Em 1886 Paul Heroult e Charles Martin Hall obtiveram praticamente ao mesmo tempo, embora em países diferentes, o alumínio metálico à partir de processos idênticos. O processo desenvolvido passou a ser chamado de processo Hall-Heroult em homenagem aos dois descobridores. Até hoje este processo se mantém o mesmo, não obstante as modificações no que diga respeito a sua eficiência. No ano de 1887 o químico austríaco Carl-Joseph Bayer desenvolveu um método para produção de alumina¹ a partir da bauxita, que ficou conhecido como o processo Bayer de refino (Pechiney, 1994). Em 1890 foram produzidos os primeiros lingotes de metal primário na pequena usina de Froges, França, já pelo processo Hall-Heroult.

No início o alumínio tinha um preço semelhante ao da prata, e era utilizado basicamente para confecção de objetos de luxo ou religiosos.

Com o advento das duas Grandes Guerras Mundiais, o interesse pelo metal cresceu bastante alavancando assim a sua produção e, conseqüentemente, as de bauxita e alumina. Já na década de 80, o Brasil surge como um dos maiores produtores mundiais de bauxita, alumina e alumínio, graças as suas grandes reservas de minério e fontes de energia

¹Alumina: corresponde ao conjunto de óxidos hidratados de alumínio.

competitivas, o que permitiu a vinda para o país dos principais produtores mundiais do metal (Machado, 1988).

Hoje o alumínio é o segundo metal mais consumido no mundo só perdendo para o ferro em importância. Seu maior competidor em termos de uso é o cobre. Além disso, ele vem assumindo papel cada vez mais importante uma vez que pode ser totalmente reciclado, e ainda tem tido participação crescente em diversos segmentos industriais. O alumínio só perde em aplicação para o aço.

II.2 CARACTERÍSTICAS DO SETOR

A indústria de bauxita-alumina-alumínio encontra-se bem diferente do que era há 30 anos atrás. Hoje existem mais de 90 produtores de metal primário, diversos produtores independentes de alumina, e muitas minas de bauxita controladas por empresas estatais. A força das ditas seis irmãs² do alumínio já não é a mesma, visto que estas empresas não tem mais um controle tão substancial sobre a produção mundial de bauxita-alumina-alumínio (Nappi, 1992).

Atualmente 10 empresas controlam cerca de 52% da produção mundial de alumínio primário, 65% da produção de alumina, e 95% da produção de bauxita. Na área de mineração cerca de 10 minas são responsáveis por mais de 50% da produção mundial de bauxita (UNICAMP, 1995).

² Este grupo era representado por Alcoa, Alcan, Reynolds, Kaiser, Pechiney e Alusuisse. Em 1955 estas empresas controlavam cerca de 80% da produção mundial, enquanto em 1994 este controle era de 35% (Sá, 1992; Raw Materials Group, 1995).

II.2.1 INTEGRAÇÃO VERTICAL NA INDÚSTRIA

Muito embora os vários estágios de produção sejam tecnologicamente e geograficamente distintos, eles estão ligados pela integração vertical. Os produtos são também transferidos de um estágio para outro entre diferentes empresas ou consórcios através de contratos de longo prazo, um método que é comumente denominado de integração quasi-vertical (Peck, 1988.).

A integração vertical nesta indústria ocorreu prematuramente, principalmente em direção aos manufaturados, dada a necessidade dos produtores no desenvolvimento de novos produtos. Por outro lado, isto trazia vantagens, pois os benefícios do desenvolvimento destes produtos ficariam nas mãos de poucos. Esse processo era visto pelos produtores como meio de se evitar também a volatilidade dos preços, já que permitia uma série de práticas de transferências e de discriminação. Isto por si só já é vantagem uma vez que o mercado de semi-manufaturados sempre foi bem mais segmentado (COMPETITIVE strategy in aluminium, 1989).

O domínio não se deu somente da redução de metal primário em diante, uma vez que as companhias do setor sempre apresentaram alto grau de integração vertical. Desde do início desta indústria, todas as companhias envolvidas buscaram ter o máximo controle sobre suas fontes de matérias-primas. No caso do refino de alumina, a bauxita vinha como o principal insumo necessário para sua produção, e por sua vez, era a principal matéria-prima na redução do metal primário (Peck op. cit.). O surgimento do IBA ("International Bauxite Association") é colocado por Thomas (1984) como uma resposta dos países produtores de bauxita a estas práticas.

Até há poucos anos atrás estas companhias eram claramente mais auto-suficientes em bauxita do que elas o são hoje. Esta mudança se deve em parte às nacionalizações, ao aumento da participação do Estado em algumas unidades produtoras à exemplo da Jamaica e do Suriname, como também ao fato de que as seis irmãs abriram novas minas em países onde o capital nacional, independentemente de ser privado ou público, ansiava por associar-se em novos empreendimentos, como foi o caso de Austrália e Brasil. Desse modo os grandes produtores de alumínio dividiram os riscos e os pesados investimentos com terceiros (Clark, 1991). Hoje o controle da atividade mineradora já não tem tanta importância, uma vez que as empresas buscam controlar aqueles segmentos de maior valor agregado. O domínio da produção de matérias-primas já não é tão relevante (COMPETITIVE strategy in aluminium, 1989).

O alto endividamento das seis grandes, o custo do capital e seu desejo para intensificar a sua integração cadeia abaixo, estimulou o aumento de terceiros nas fases de lavra de bauxita. Com isso empresas como RTZ tiveram a oportunidade de atuar na mineração da bauxita, através de sua controlada, a Comalco (Morrison, 1992; Comalco 1993).

A integração cadeia abaixo continua e as seis irmãs já processavam em 1984 66% de sua produção de alumínio. Esta proporção ia aumentando: a Alcan processou 51% de sua produção em 1970, 56% em 1975, 68% em 1979, e 74% em 1981. Em 1982 a Alcoa processou 72% de sua produção de alumínio primário, a Reynolds 92%, a Kaiser 71% e a Alusuisse 62%. Para a última companhia este nível não correspondia ao normal, uma vez que este já chegou a 75%.

A integração não parou no setor de produtos semi acabados; cada vez mais as companhias se envolveram na geração do produto final elas mesmas. Todas têm unidades de reciclagem e manufatura de ligas de alumínio (GRESEA, 1985).

II.2.2 A OLIGOPOLIZAÇÃO

Desde o final do século XIX o setor evoluiu de um monopólio da Alcoa, para um duopólio formado pelas empresas Alcoa e Alcan³e mais tarde se tornou um oligopólio formado por seis empresas: Alcoa; Alcan; Kaiser; Reynolds; Pechiney; Alusuisse-Lonza; as quais passaram a ser chamadas de as “seis irmãs” do alumínio. Mais recentemente o número de produtores primários vêm aumentando, principalmente com a entrada no setor de diversos produtores independentes.

Com a queda real no preço de diversas "commodities" minerais e, principalmente no preço do alumínio, estas companhias passaram por um processo de reestruturação. A década de 80 foi palco de importantes transformações no setor, quando se pode acompanhar o surgimento de diversas outras companhias que vieram a constituir o bloco dos segundos colocados, como denominado por Nappi (1992).

Segundo Radetzki (1983), o aumento da competição no setor seria o responsável pela instabilidade nos preços do metal primário durante a década de 90. Adams (1990) interpreta este aumento do número de produtores como parte de um processo de reestruturação da indústria de alumínio. Clark (1991) associa o surgimento dos produtores independentes

³A Alcan foi constituída a partir do desmembramento das propriedades de Alcoa fora dos EUA, por força da lei anti-truste norte americana na década de 40.

com o crescimento de mercados regionais, a exemplo do Oriente Médio, América Latina, e Sudeste Asiático.

Brown et. al. (1987) afirmam que a perda de parte do controle da produção de alumínio primário pelas seis irmãs se deve a três fatores básicos: difusão de tecnologia; aumento dos movimentos nacionalistas nos países produtores de bauxita e o desenvolvimento de reduções nos países ricos em fontes de energia competitivas.

O grau de concentração diminuiu, assim como também diminuiu a integração vertical. No entanto, esta mudança em nível de firma ocorreu de modo heterogêneo. Hoje existe um grupo principal de empresas verticalmente integradas, mais três outros grupos de empresas independentes: mineradoras/refinadoras; fundições; e fabricantes de semi-manufaturados. O aparente declínio do grau de integração da indústria, é resultado do crescimento mais rápido dos grupos independentes, particularmente das reduções. Neste ponto vale ressaltar que com a crise do petróleo do início da década de 70, além da migração da produção para locais mais competitivos, houve o surgimento de diversos consórcios e, subsequentemente de vários produtores independentes de alumínio (Roskill, 1993; Aluminium Verlag 1992). A figura II.1 ilustra toda a evolução do setor até a época atual (COMPETITIVE strategy in aluminium, 1989).

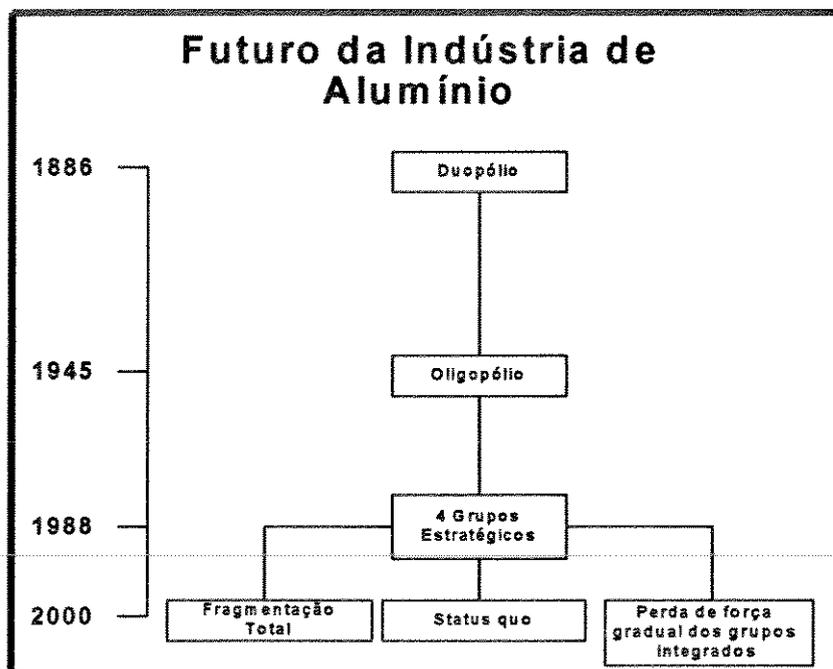


Figura II.1 Futuro da indústria do alumínio.
 Fonte: Competitive strategy in aluminium, 1989.

Tabela II.1 Grupos estratégicos e seus interesses.

Grupo	Membros (Exemplos)	Características	Interesses-chave
Integrados (Majoritários e Secundários).	Alcoa; Alcan; Pechiney; VAW; Alumax.	Integração entre a produção de semi-manufaturados e metal primário.	1. Manutenção do controle de preços de semi-manufaturados. 2. Controle da estrutura de mercado. 3. Manutenção de um mercado seguro de metal primário. 4. Restrição a entrada de novos participantes no mercado. 5. Mercado de alumina assegurado (só os principais).
Primários Independentes	Hydro Aluminium; CVG; Elkem; CVRD; Alba; Dubal.	Custos vantajosos na produção de alumínio primário. Não integrados cadeia abaixo.	1. Mercado de metal primário garantido. 2. Manutenção de um mercado de alumina viável, bem suprido, e com muitos vendedores.
Fabricantes Independentes	Siderúrgicas japonesas extrusores independentes.	Quase nenhuma produção primária.	1. Flexibilidade maior no preço dos semi-manufaturados. 2. Mercado de metal primário líquido e viável. 3. Mercado de metal primário bem suprido de alumínio. 4. Comércio livre para o alumínio primário.
Independentes (Minas/Refinarias)	Billiton; Alcoa of Australia; Governo da Jamaica.	Grandes vendedores de alumina, com custos competitivos de mineração de bauxita.	1. Mercado de alumina viável. 2. Mercado de alumina firme, mas não às custas de barreiras a entrada.

Fonte: Competitive strategy in aluminium, 1989.

A tabela II.1 relaciona os grupos estratégicos dentro da indústria de alumínio, colocando alguns de seus representantes. O grupo dos Integrados que inclui as ditas empresas majoritárias e as secundárias, é o maior grupo estratégico. Sua característica mais marcante é seu alto grau de integração entre a produção primária e de semi-manufaturados. Este grupo é dividido

em principais e secundários de acordo com tamanho, história, e posição quanto a produção de alumina. Este grupo converte a maior parte de sua produção primária e de sucata em semi-manufaturados. É ainda um significativo fornecedor de metal primário para os fabricantes independentes. Os majoritários são grandes produtores de alumina, sendo inclusive os principais fornecedores tanto para os produtores secundários, como para as reduções independentes.

O grupo das fundições independentes é o segundo mais importante.

Este tem grande excesso de produção de metal primário que é vendido em sua maioria para o grupo dos fabricantes independentes (Japão principalmente). Alguns de seus membros são integrados até a produção de alumina (CVG por exemplo), mas o grupo como um todo não produz alumina suficiente, complementando suas necessidades com a compra de óxido ou dos produtores principais, ou dos mineradores/refinadores independentes.

O grupo dos fabricantes independentes é tradicionalmente pequeno, fragmentado e fraco dentro desta indústria. Cresceu com o desaparecimento das reduções japonesas. A sua principal fonte de alumínio primário é o grupo das fundições independentes.

Como último grupo há o das minas/refinarias independentes, setor também pequeno e relativamente fraco. Os altos investimentos necessários e riscos presentes têm limitado o seu crescimento.

A figura II.2 a seguir mostra os grupos estratégicos definidos e suas principais relações.

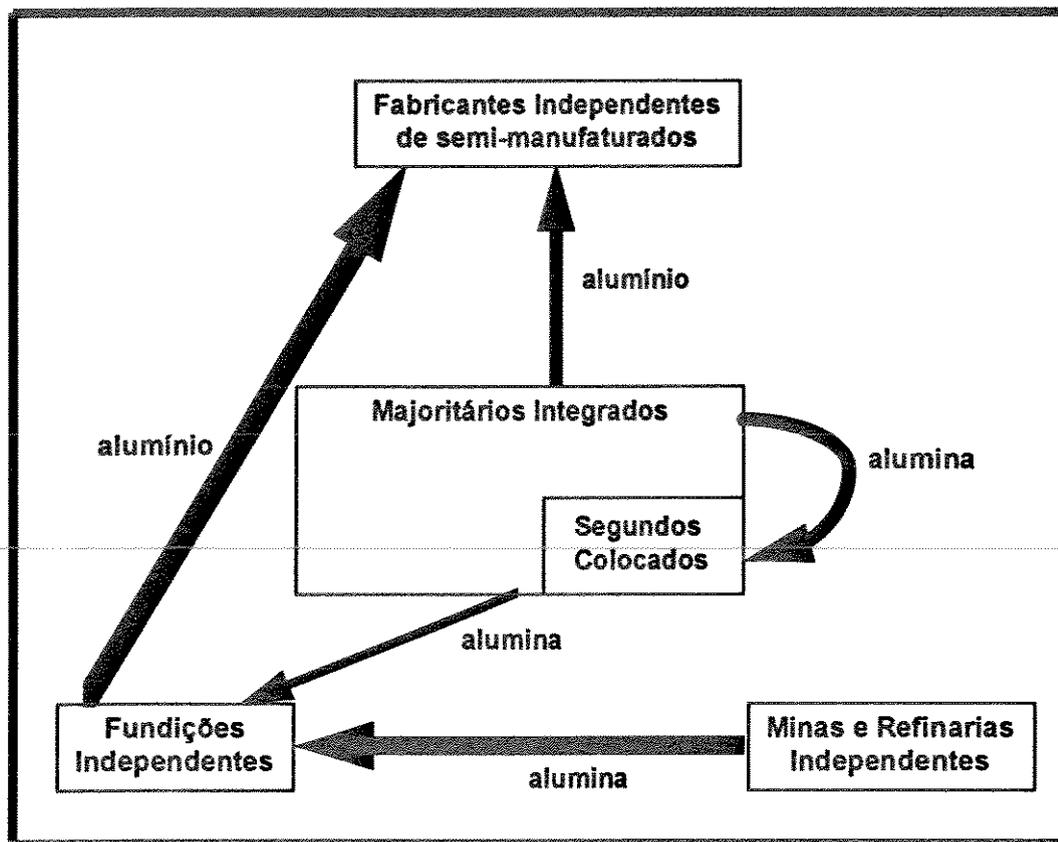


Figura II.2 Distribuição estratégica no alumínio.
 Fonte: Competitive strategy in aluminium, 1989.

II.2.3 A INTERNACIONALIZAÇÃO DA INDÚSTRIA

Os vários estágios de produção de alumínio são suficientemente separados e distintos, podendo ocorrer em diferentes países. Mais da metade da bauxita utilizada para se fazer alumina vem de países em desenvolvimento, principalmente das nações do Caribe, América Latina e África (World Bureau of Metal Statistics, 1995). Somente dois países, Austrália e Brasil, produzem bauxita suficiente para atender às suas necessidades. Os grandes produtores de metal primário necessitam importar minério de uma das nações citadas acima.

No estágio da alumina, a produção sempre se concentrou mais nos países industrializados, os quais detêm hoje cerca de 57% de toda a capacidade mundial de refino. Os 43% restantes estão localizados nos

países produtores de bauxita, Leste Europeu, Rússia, e China (UNCTAD, 1994). Não obstante este fato, esta proporção vem mudando, e tudo leva a crer que, dentro de alguns anos, a maior parte da produção mundial de alumina venha dos países ricos em bauxita.

No estágio de produção de alumínio cerca de 62% da capacidade mundial estava localizada nos EUA, Canadá, Europa (CEE) e Japão. Atualmente apenas 40% está situada na América do Norte, muito embora os EUA, Japão, e a CEE sejam responsáveis por cerca de 73% do consumo global de alumínio primário no ano de 1994 (World Bureau of Metal Statistics 1995; UNCTAD op. cit.).

Com o encarecimento do transporte marítimo de granéis sólidos, a instalação de refinarias próximas as minas de bauxita, constituiu o meio mais prático de se evitar o transporte de grandes quantidades de minério e, conseqüentemente, água. Após a crise energética do início da década de 70 houve a migração dos centros produtores de alumínio para aquelas regiões ricas em fontes baratas de energia.

Estas novas empresas surgiram principalmente no Oriente Médio (DUBAL e ALBA por exemplo), região farta em gás natural à um custo de oportunidade muito baixo ou próximo a zero, uma vez que este combustível não encontra outro uso na região.

Outro país onde surgiram novas e importantes companhias durante a década de 70 foi a Austrália, fenômeno este impulsionado pela abundância de bauxita e energia a preços relativamente competitivos. Este país possui grandes reservas de carvão de baixa qualidade o que não permite a sua exportação, no entanto este é utilizado na geração de energia para as

reduções de alumínio. Um exemplo é a usina de Anglesea, que utiliza o carvão para gerar energia para a redução de Point Henry, de propriedade da Alcoa of Austrália (Alcoa of Austrália 1994, 1995; Comalco 1993, 1994.).

Por último há a Noruega, país que viu suas indústrias produtoras de alumínio, Hydro Aluminium e Elkem Aluminium, crescerem dentro do contexto internacional, principalmente devido a abundância de fontes baratas de energia (hidroelétrica), e ao fato de estas empresas já serem geradoras de energia (Norsk Hydro 1993, 1994, 1995; Elkem a.s. 1993, 1994.;).

É muito comum uma empresa explorar bauxita num país, refiná-la e depois produzir o metal primário em outro. Os Apêndices II.1, II.2, e II.3, indicam o caráter francamente internacional das empresas do setor de alumínio.

Apesar dos EUA e da CEI responderem por 13% e 9% respectivamente da produção mundial de alumina, a Austrália é o maior país produtor desde o final de década de 70, com um total anual em 1994 de 7,53 milhões de t (Metallgesellschaft 1970-1990; World Bureau of Metal Statistics 1981-1995).

Segundo Nappi (1992) modificações importantes estão presentes também a jusante da cadeia produtiva, na localização geográfica dos centros produtores de alumínio. Austrália, Brasil e Venezuela detinham juntos em 1989 uma fatia de 15% da produção mundial (Apêndice II.4) e têm desse modo substituído a França, Alemanha Ocidental e especialmente o Japão na lista dos principais produtores mundiais. Por sua vez, ocorreu um declínio na capacidade de produção dos EUA, ao passo que o Canadá viu

sua fatia do mercado mundial de alumínio crescer de 7% para 15% entre 1975 e 1994.

II.2.4 USO INTENSIVO DE ENERGIA E CAPITAL

Particularmente no que tange à atividade de mineração, este setor demanda uma quantidade de investimentos menor do que os dispendidos com outras substâncias, principalmente na exploração de minerais metálicos. Quando se trata da construção de refinarias de alumina e reduções de alumínio, a realidade mostra-se diferente. No seu bojo este setor sempre demandou grandes inversões de capital. O total de investimentos no setor de alumínio (alumínio primário, alumina e bauxita) entre 1980 e 1995 representou cerca de 35% de tudo o que foi investido em mineração no período, conforme pode ser observado pela figura II.3.

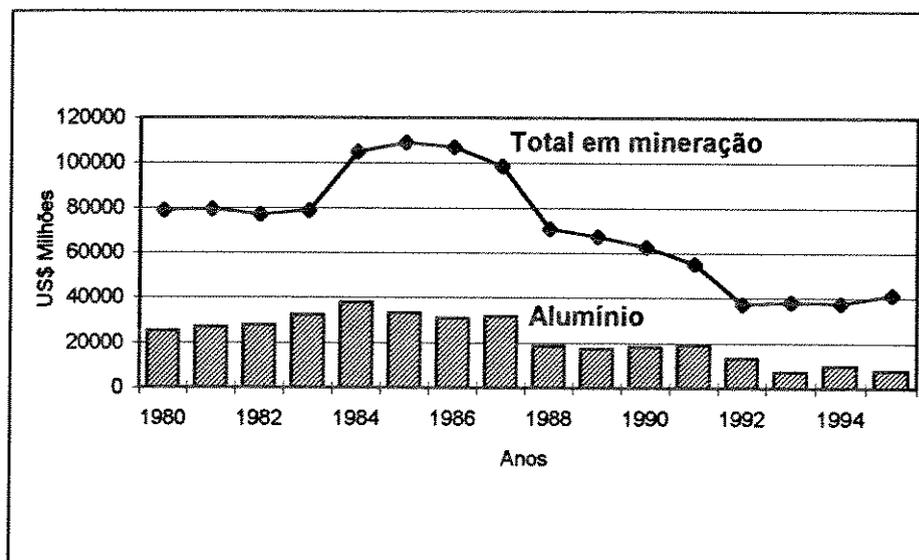


Figura II.3 Investimentos em alumínio 1980-1995 (US\$ milhões).
Fonte: Engineering & Mining Journal, 1980-1995.

Brown et. al. (1987) estimam que o investimento necessário para a abertura de uma mina de bauxita para lavra à céu aberto varia entre US\$ 11/t e US\$ 105/t (floresta amazônica). No caso da alumina os investimentos necessários oscilam em torno de US\$ 1.387/t, em valores de 1994. Os

autores ressaltam que as diferenças de custos entre regiões, ou devido ao processo utilizado, poderiam chegar a US\$ 485/t. As diferenças devido a economias de escala chegariam a US\$ 971/t. No caso do metal primário os autores estimaram algo em torno de US\$ 4.716/t, também para valores de 1994. Diferenças nos custos devido a localização e economias de escala poderiam chegar a US\$ 693/t.

Wilburn e Wagner (1993) mostram que os custos envolvidos em 1989 para a operação de uma nova mina de bauxita ficariam em US\$ 20 milhões para uma mina pequena, podendo chegar a US\$ 500 milhões para um projeto grande com toda a infra-estrutura necessária (porto e ferrovia). Para uma refinaria de alumina os custos de capital ficariam entre US\$ 625/t e US\$ 1.250/t dependendo da capacidade anual de produção. No caso de uma redução, estes custos oscilariam entre US\$ 3.000/t, no caso de expansão de capacidade, e US\$ 5.000/t, para novas instalações com toda a infra-estrutura necessária. Os Apêndices II.5, II.6 e II.7 mostram os custos unitários de produção em vários países tanto para minas de bauxita, como para refinarias de alumina e reduções de alumínio, em valores de 1994. Os valores nas tabelas foram estimados tanto para uma taxa de retorno de 0%, como para uma outra de 15%. Todas elas foram feitas para valores obtidos em 1989, convertidos com auxílio do deflator de preços do PIB americano, extraído do "Bureau of Economic Analysis" (diversos) e do FMI (vários) para o ano de 1994 (Wilburn e Wagner op. cit.). A tabela II.2 ilustra os principais componentes dos custos variáveis para a produção de alumínio primário e seus pesos relativos.

Tabela II.2 Estrutura dos custos operacionais no alumínio.

Estrutura dos custos operacionais	1992	
	US\$/t	% do total
Alumina	381	32,1
Eletricidade	307	25,9
Mão-de-obra	175	14,7
Outros custos	324	27,3
Total	1.186	100
(53,8 US cents/lb)		

Fonte: Bird, 1993.

A energia elétrica é, sem dúvida, um componente determinante dos custos de qualquer redução. Seu preço oscila de acordo com o tipo de geração. Desde a crise energética do início da década de 70, o setor buscou concentrar a produção nos países com vantagens competitivas em relação a este insumo. Daí em diante, ficou claro que novas capacidades seriam instaladas naqueles países com energia de baixo custo (hidroelétrica). A seguir, a tabela II.3 mostra o consumo mundial de energia da indústria do alumínio discriminando as médias anuais. Na tabela II.4 tem-se as porcentagens de energia cativa gerada em cada região, assim como a média mundial e, por último, a tabela II.5 fornece os diversos tipos de energia utilizados.

Tabela II.3 Consumo de energia dos produtores de alumínio

	1994	1993	1992	1991	1990	1989	1988	1987	1986	1985
Prod.Primária IPAI(Mt)	15,24	14,98	14,76	14,77	14,19	14,08	13,51	12,53	11,88	11,96
Consumo total de energia(Gwh)	229.949	325.068	233.636	236.182	228.079	228.833	220.098	204.465	195.151	199.413
Consumo médio Total(Kwh/t)	16,021	15,689	15,841	15,984	16,076	16,253	16,283	16,328	16,419	16,668

Fonte: IPAI Annual Report, 1985-1995.

Tabela II.4 Produção cativa de energia por região(%).

	1993	1992	1991	1990	1989	1988	1987	1986	1985
Média mundial	25,40	25,30	24,60	24,10	24,80	25,10	25,90	27,80	28,80
África	nd								
América do Norte	31,00	27,96	29,06	29,94	29,88	29,85	32,88	34,77	33,00
América Latina	9,94	10,12	8,75	8,62	10,82	10,76	8,56	7,95	33,00
Europa	13,36	20,82	18,91	17,13	19,57	19,39	20,06	23,9	27,00
Oceania	4,35	5,11	5,07	4,45	5,26	11,52	9,22	6,06	6,00
Asia	78,49	76,76	79,14	77,98	74,75	73,39	75,67	nd	nd

Fonte: IPAI Annual Report, 1985 - 1995.

Tabela II.5 Fontes de energia utilizadas pelos produtores de alumínio (%).

	1994	1993	1992	1991	1990	1989	1988	1987	1986	1985
(Média mundial)										
Hidro-elétrica	57,4	57	56,7	56,8	55,6	55	56	56,6	56,3	54,7
Carvão	28,5	30,3	31,8	32,5	34,1	34,9	32,9	32	30,8	31,5
Óleo	1,4	1,3	1,2	1,3	1,1	1,2	1,8	2	1,9	3,1
Gás Natural	7,1	6	4,9	4,3	4,2	3,7	3,9	3,8	4,8	4,4
Nuclear	5,6	5,4	5,4	5,1	5	5,2	5,4	5,6	6,2	6,3

Fonte: IPAI Annual Report, 1985 - 1995.

Durante a implantação de uma nova unidade, a energia elétrica e alumina são usualmente compradas segundo contratos com cláusulas específicas no que diz respeito a compras mínimas, e ainda incluem multas pela não utilização da energia fornecida. Os custos para se interromper a produção e mais tardiamente reiniciar a mesma numa redução são altos, com isso uma redução pode continuar operando, mesmo que o preço do alumínio esteja abaixo de seus custos operacionais, bastando para isso que a mesma acredite que a situação atual de preços seja passageira (Peck, 1988).

Este é o caso das instalações ditas ociosas por Adams (1990). Este autor chama a atenção para um artifício utilizado por muitas empresas e "traders" (Marc Rich/Clarendon) nos anos 80. Com os baixos preços de alumina realizados em meados da década de 80 (US\$ 100/t), as empresas se precaveram e assinaram contratos de fornecimento de alumina de longo

prazo. Com isto elas convertiam a alumina barata em metal primário que ficava estocado, pronto para venda quando o momento fosse favorável. Desse modo, os contratos foram fechados a preços vis e as empresas, passaram a ser intermediárias nas vendas, realizando grandes lucros com a operação. Adams (op. cit.) considera que o mesmo não deverá ocorrer novamente.

II.2.5 A RECICLAGEM

O alumínio primário e secundário são substitutos entre si, formando juntos uma oferta global de metal para a fabricação. A fatia do alumínio secundário na oferta total de metal vêm no entanto crescendo nos últimos anos, principalmente nos países desenvolvidos. Por exemplo, de 1970 até 1980 aumentou de 20% para 25% nos EUA a quantidade de metal secundário, enquanto que em 1984 atingiu 30% (Peck op. cit.). Atualmente encontra-se num patamar de 89% nos EUA e Alemanha. Há países como a Itália, Japão e Reino Unido onde a oferta secundária de metal já é maior do que a primária (World Bureau of Metal Statistics, 1995). O grande volume reciclado pelos EUA, cerca de 3 milhões de t em 1994, deve-se em parte ao metal secundário do Canadá e México. O Japão também utiliza grande parte da produção secundária australiana para o consumo próprio.

Segundo Peck (op. cit.), a importância relativa da produção secundária é determinada parcialmente pela taxa de crescimento do consumo de alumínio. Esta é determinada em parte pela produção primária de uma ou duas décadas anteriores. Uma alta taxa de crescimento na demanda total por alumínio reduz a proporção de metal secundário porque há limites na reciclagem de sucata a partir de produtos descartados (A

sucata nova gerada durante o processo de fabricação, cresce proporcionalmente ao mesmo). O volume de alumínio secundário também é influenciado pelo preço do metal primário, pois preços mais altos deste último levam a uma maior recuperação de sucata velha. Por último, a recuperação secundária é sensível aos usos dados ao alumínio, variando desde as latas de bebidas com um ciclo de vida mais curto, até as esquadrias de alumínio com um uso mais longo. Os três fatores supracitados respondem pelo aumento na importância da reciclagem desde 1980.

Sem dúvida o maior desenvolvimento da reciclagem ocorreu com as latas de alumínio, tanto de bebidas como de alimentos. Hoje na Europa o índice de reciclagem de latas de alumínio é de 25%. No Japão é de 44%, e nos EUA já atingiu 65% (ABAL, 1994). No Canadá leva-se menos de 90 dias para que uma lata de alumínio seja adquirida num ponto de venda final, o seu conteúdo consumido, e a mesma reaproveitada e devolvida à prateleira de outra loja (Alcan Recycling Canada Fact Sheet, 1990). Enquanto em 1973 com 0,5 Kg se fabricavam 22 latas de alumínio, em 1983 esta proporção subiu para 26. Hoje em dia podem ser fabricadas 29 latas de alumínio à partir de 0,5 Kg do metal (Alcoa 1993).

II.3 A INDÚSTRIA DO ALUMÍNIO NO BRASIL

Segundo Machado (1985) a primeira referência que se conhece sobre mineração de bauxita na nossa literatura especializada é a do Prof. Theodoro Vaz, da Escola de Minas de Ouro Preto, nos Anais de 1928, em cujo trabalho intitulado "Bauxita", estudou ocorrências, caracteres físicos, químicos e mineralógicos, além da origem (laterização) das bauxitas de Ouro Preto.

No Brasil esta indústria segue o mesmo modelo internacional apresentado nos itens anteriores. Existe o predomínio do capital privado, nacional e internacional⁴, com três das seis irmãs do alumínio operando no país. Há também a associação do capital estatal, através da CVRD em todas as três etapas de produção. Existem também os grandes consórcios refinadores, como a Alunorte, e ainda os produtores de alumínio, como a Albrás e Alumar.

Este setor foi estruturado de tal forma que existem hoje dois tipos de produção distintas: Aquela da região norte e a da região sul. O alumínio primário produzido nas reduções da região sudeste visa atender unicamente ao mercado interno, abastecendo inclusive algumas transformadores até no nordeste. A produção de alumínio primário da região norte atende ao mercado externo, beneficiando-se com a sua escala de produção e ainda da proximidade das jazidas da MRN (Machado, op. cit.; Braz-Pereira, 1988 e 1995).

II.3.1 RESERVAS BRASILEIRAS DE BAUXITA

Existem reservas de bauxita espalhadas por diversas regiões do Brasil, sendo que as principais são aquelas localizadas na região Norte, nos Estados do Pará e Amazonas, que juntas somam cerca de 15,51 bilhões de t (DNPM, Relatório Anual SERMIN/AM 1993). As reservas da região do Quadrilátero Ferrífero são pequenas e bem espalhadas sendo aproveitadas hoje somente pela refinaria da Alcan em Saramenha. Ainda no Estado de Minas Gerais estão localizadas as reservas de Poços de Caldas e Cataguazes. As primeiras já se encontram bastante reduzidas e atualmente

⁴Este está representado pela Alcoa, Alcan, Billiton e CBA.

só a Alcoa e a CBA fazem uso de bauxita desta região. A bauxita de Cataguazes é explorada por 4 empresas: Alcan, Alcoa, CBA, e IQC. Este minério alimenta as refinarias das três primeiras empresas respectivamente em Saramenha, Poços de Caldas, e Sorocaba. A bauxita da IQC é vendida para a Alcan e processada na sua refinaria de Saramenha. A Alcoa também processa bauxita de suas minas na região de Poços de Caldas (ABAL 1994; Alcoa 1994; Alcan 1994). As reservas demonstradas brasileiras hoje atingem 2,8 bilhões de t, o que coloca o país como o detentor da terceira maior reserva de bauxita do mundo, atrás da Jamaica e Guiné (DNPM, Sumário Mineral, 1995).

II.3.2 O MERCADO BRASILEIRO DE ALUMÍNIO

A primeira redução de alumínio primário no Brasil remonta a década de 40. Passados mais de 50 anos, o país tem hoje um mercado aberto, do qual participam cinco empresas a saber: Alcan Alumínio do Brasil; Alcoa Alumínio S.A.; CBA; CVRD; Billiton Metais; O setor conta com um mercado interno que em 1994 consumiu cerca de 470 mil t de metal primário. As exportações ficaram na casa de 870 mil t também em 1994 (ABAL, Relatório Anual 1994).

O Brasil é um grande produtor de bauxita e atualmente o país exporta cerca de 51% da sua produção (Anuário Mineral DNPM, 1995). A bauxita exportada é a produzida pela MRN, que tem como principais mercados a CEI e Rússia. Recentemente a empresa assinou um contrato de fornecimento de longo prazo com a Alunorte para entrega de 2,5 milhões de t/ano, o que acarretará em expansão da mina para os próximos anos. (Brasil Mineral No. 131 Jun/95).

O refino de alumina, apesar de expressivo, não se constitui num setor exportador. O Brasil importa cerca de três vezes mais alumina do que exporta, e somente a partir de 1996, com a operação da refinaria da Alunorte a plena capacidade é que o país poderá ser um exportador de óxido (Brasil Mineral No. 131 Jun/95; Anuário Mineral DNPM 1995).

No setor de alumínio o país conta com exportações na casa de 880 mil t/ano, e importações de pequeno vulto. Historicamente os maiores importadores de metal do Brasil são: Japão, EUA, Bélgica e Holanda (ABAL, 1975-94). A indústria de alumínio no Brasil é responsável por cerca de 57.506 empregos diretos (setor primário, secundário, e transformadores independentes), participando com US\$ 1,5 bilhão na balança comercial brasileira, ou 11,5% do saldo da balança comercial do país em 1994. O faturamento do setor neste mesmo ano chegou aos US\$ 4,1 bilhões, correspondendo a uma participação de 0,8% no PIB nacional (ABAL, 1994).

No apêndice II.8 estão descritas de forma sucinta as principais empresas atuantes no Brasil. As participações estrangeiras e nacionais, estatal e privada, estão analisadas em quantidades físicas.

- **ALCAN ALUMÍNIO DO BRASIL S.A.** A Alcan é uma empresa multinacional, de capital aberto canadense, que iniciou suas atividades no país à partir da compra da Elquisa, de propriedade do Dr. Giannetti, em 1951. Hoje a empresa conta com cotas de produção de bauxita da MRN, de suas jazidas em Cataguazes, e da região de Ouro Preto, onde tem uma operação integrada de mineração, refino de alumina e produção de alumínio primário. É proprietária ainda de uma segunda redução em Aratu, BA. Possui fábricas de produtos de alumínio em diversos estados

brasileiros. A partir de 1996 passará a trabalhar também com reciclagem de latas de alumínio (Alcan 93; 94.).

- **COMPANHIA BRASILEIRA DE ALUMÍNIO - CBA** Única empresa brasileira, de capital fechado nacional, foi inaugurada em 1955, sendo a segunda empresa produtora de alumínio primário no país, de propriedade da família Ermírio de Moraes. Esta possui minas de bauxita nas regiões de Poços de Caldas, Cataguazes e ainda conta com uma cota da produção da MRN empresa na qual detém participação acionária de 10%. A CBA centraliza todas as suas operações de refino e redução em Sorocaba. É geradora de 50% da energia que consome, ou 322 MW, com oito hidroelétricas na bacia do Rio Juquiá-Guaçú, SP (Brasil Mineral, 1990). Esta empresa produz todos os insumos de que necessita nas três fases da cadeia bauxita-alumina-alumínio, sendo o maior produtor brasileiro de alumínio (ABAL, Relatório Anual, 1994; Machado, R.C., 1985; 1988).
- **ALCOA ALUMÍNIO S.A.** A Alcoa, empresa multinacional de capital aberto americano, iniciou atividades no país somente na década de 60. Nesta ocasião a empresa já era proprietária de jazidas de bauxita na região de Poços de Caldas. Em 1967 foi organizada a Alcominas tendo a Alcoa como controladora. Hoje a companhia é a mais integrada cadeia abaixo atuando no Brasil, detendo ainda uma participação expressiva no projeto Alumar e na MRN, assim como produzindo alumínio primário e alumina em suas instalações de Poços de Caldas (Alcoa, 94;93; Machado, R.C., 1985; 1988).

- **COMPANHIA VALE DO RIO DOCE - CVRD A CVRD**, única estatal do setor, iniciou sua participação na área de alumínio através da implantação da MRN em 1972. Hoje conta com reduções em Rio de Janeiro e Belém, onde também refina alumina. À partir de 1996 contará com excedente de produção de óxido da recém inaugurada Alunorte, parceria da empresa com sócios japoneses (NAAC), MRN, e CBA, o que lhe dará condições de tornar-se um exportador de alumina (Brasil Mineral, No. 132, 1995). Esta empresa é a controladora dos projetos MRN e Albrás, detendo ainda participação majoritária na Valesul. Não fabrica produtos de alumínio, ou trabalha com reciclagem de latas (CVRD, 1994; Machado, 1985; 1988).
- **BILLITON METAIS S.A.** A Billiton Metais S.A. iniciou atividades no Brasil em 1984 na Valesul e, mais tarde na Alumar. Esta empresa detém ainda participação minoritária na MRN É a menos atuante do setor no Brasil e vende toda a sua produção para terceiros (ABAL, Relatório Anual, 1994).

III. PANORAMA SETORIAL

III.1 PRODUÇÃO MUNDIAL E RESERVAS DE BAUXITA

Ao longo dos últimos 30 anos a mineração de bauxita passou por mudanças estruturais as quais transformaram-na sensivelmente. Houve uma troca de posições dos maiores produtores mundiais, sendo que alguns países deixaram definitivamente de produzir o minério. Os centros produtores agora se concentram nos países em desenvolvimento, detentores das maiores reservas de bauxita do mundo. Se pode assistir neste período à formação e ao fechamento da IBA, Associação Internacional da Bauxita, principalmente pela saída da Austrália em 1991, um de seus principais membros e também pelo surgimento dos contratos de fornecimento de bauxita de longo prazo (Chevalier, 1995). Nesse período o comércio do minério aumentou significativamente em volume, e se dá de maneira diferente.

Como pode ser visto na figura III.1, a produção saiu de um patamar de cerca de 31 milhões de t em 1965, para um patamar de 100 milhões de t em 1990 e 115 milhões de t em 1994 (Metallgesellschaft, World Bureau of Metal Statistics 1980/95). No Apêndice I.4 (Nappi, 92) fica patente a migração dos centros produtores para os países em desenvolvimento. Segundo diversos autores (Morrison (1992), Peck (1988) e Machado (1985)), esta migração se deu devido as descobertas das grandes reservas localizadas nos mesmos. A mudança geográfica da produção deu origem a novos grandes produtores havendo então troca de posições entre os seis primeiros colocados, conforme pode ser observado pela tabela III.1 (Morrison, 1992).

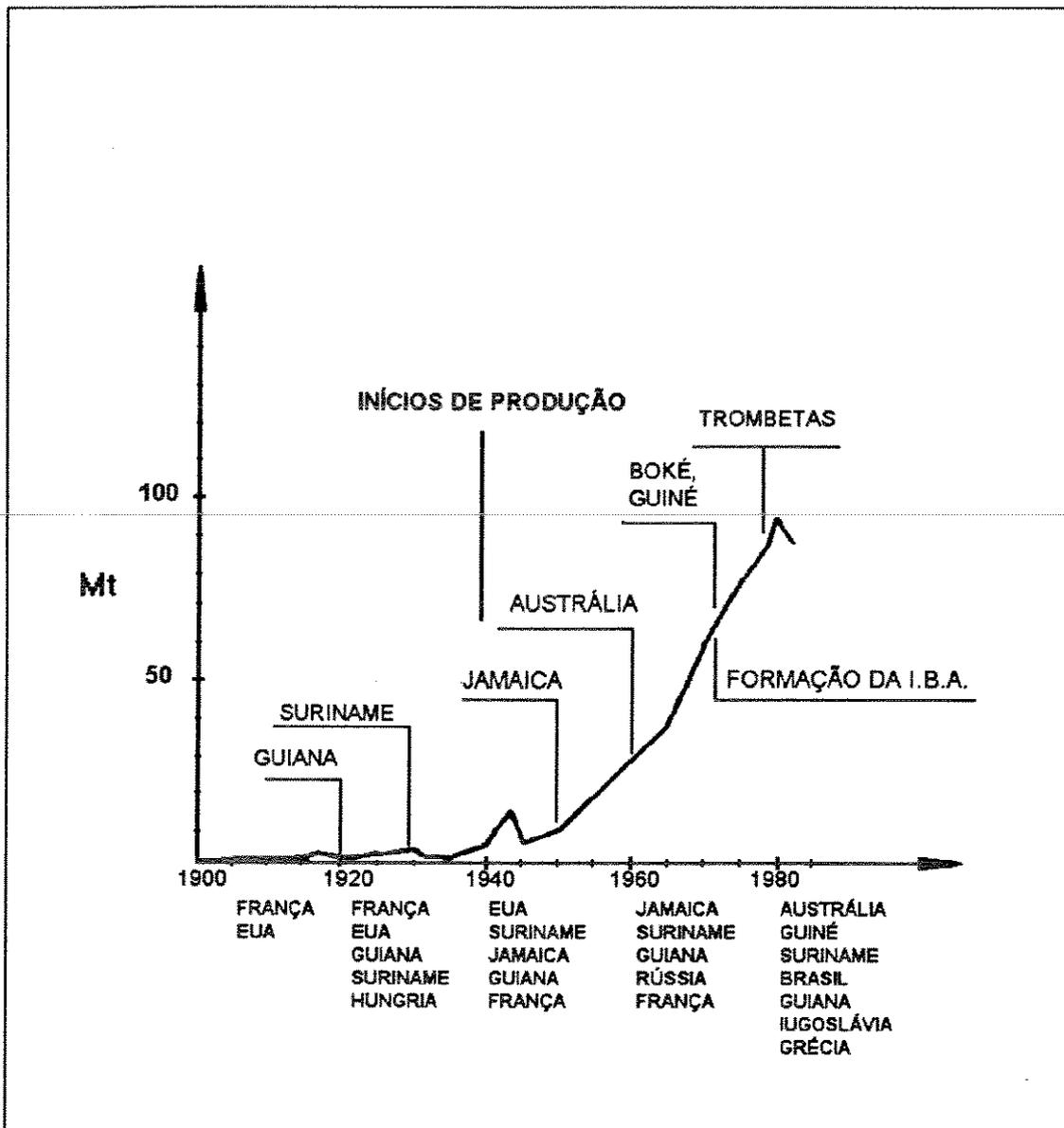


Figura III.1 Mineração Mundial de Bauxita 1900-1980.
 Fonte: Machado, 1985.

Dentre os principais produtores da atualidade, a Austrália surgiu, segundo Clark (1991), no final da década de 60 como país produtor de bauxita e, já no início dos anos 80 se destacava como o maior produtor mundial de bauxita e alumina. Segundo o autor os fatores responsáveis podem ser atribuídos a designação de país “políticamente seguro” dada pelos principais produtores de alumínio e também ao minério, de qualidade relativamente baixa, que não suportaria os custos de transporte marítimo para

outros continentes. A proximidade com o Japão contribuiu muito uma vez que este país promoveu a desativação total de sua capacidade instalada, toda baseada na utilização de petróleo. Hoje muitos produtores japoneses de alumina e alumínio primário como Nisso Iwai, Mitsubishi e Showa Denko contam com participações em projetos na Austrália. Por isso é que o país experimentou um enorme crescimento do setor, sendo responsável hoje por 37% da produção mundial (World Bureau of Metal Statistics, 1995).

Em seguida vem a Guiné, como segundo maior produtor de bauxita do mundo, responsável por 15% de toda a produção atual, e com reservas da ordem de 8 bilhões de t de bauxita, distribuídas principalmente em sete depósitos: Boké, Dabola, Fria, Kindia, Los Islands, Pita-Labé e Tougué (World Bureau of Metal Statistics, 1995; Roskill, 1993).

A Jamaica, que já foi durante duas décadas o maior produtor mundial, é hoje o terceiro maior, detendo cerca de 10% da produção. Este país conta com reservas de 1 bilhão de t (World Bureau of Metal Statistics, 1995; Roskill, 1993).

O Brasil, com aproximadamente 8% da produção mundial é o quarto maior produtor, tendo reservas estimadas em torno de 2,8 bilhões de t, a terceira maior do mundo (World Bureau of Metal Statistics, 1995; Roskill, 1993).

Quinto maior produtor, a Índia consome quase tudo o que produz. Este país detém a quarta maior reserva estimada de bauxita do mundo, de 2,6 bilhões de t, participando com 5% da produção mundial de minério (Minerals & Metals Review 1994; World Bureau of Metal Statistics, 1995).

O Suriname, com cerca de 3% da produção mundial de bauxita, já experimentou um prestígio maior como produtor, no entanto devido a instabilidade política (guerrilha), a sua produção caiu bastante, passando de mais de 6 milhões de t/ano em 1970 para os atuais 3,2 milhões de t/ano. (Roskill 1993; World Bureau of Metal Statistics, 1995).

III.2 EVOLUÇÃO E CONTROLE DA PRODUÇÃO MUNDIAL DE BAUXITA

Durante a década de 50 a produção mundial de bauxita se distribuiu entre: Suriname, Guiana, EUA, França, Indonésia e Iugoslávia (Morrison, 1992).

Como se pode perceber pela tabela III.1, em 1960 a produção de bauxita no mundo ocidental era dominada pela Jamaica, Suriname, Guiana e França, os quais juntos detinham 51% do mercado mundial. Trinta anos mais tarde, a fatia dos quatro maiores produtores é de 68% e o grupo mudou para: Austrália, Guiné, Jamaica e Brasil respectivamente.

Tabela III.1 Maiores produtores ocidentais de bauxita

1950	1960	1970	1980	1990					
	%	%	%	%					
1.Suriname	32,3	1.Jamaica	33,8	1.Jamaica	32,2	1.Austrália	41,6	1.Austrália	47,8
2.Guiana	24,9	2.Suriname	20,0	2.Austrália	24,9	2.Guiné	21,3	2.Guiné	19,8
3.U.S.A.	21,0	3.Guiana	14,5	3.Suriname	16,2	3.Jamaica	18,4	3.Jamaica	12,5
4.França	12,5	4.França	12,0	4.Guiana	11,9	4.Suriname	7,5	4.Brasil	9,7
5.Indonésia	6,1	5.U.S.A.	11,7	5.França	8,2	5.Brasil	6,4	5.Índia	6,0
6.Iugoslávia	3,1	6.Guiné	8,0	6.Guiné	6,7	6.Iugoslávia	4,8	6.Suriname	3,7
Total de prod.									
6 maiores(Mt)	6448	17278	37246	65261	87335				
Prod. Mundial (Mt)	6847	22492	50812	82244	101209				
% de prod.									
6 maiores	94,2	76,8	73,3	79,4	86,3				

Fonte: Morrison, 1992.

Nota: A tabela retrata a posição dos seis maiores produtores mundiais.

III.2.1 O IBA

Até o início dos anos 70 os maiores produtores mundiais de bauxita eram justamente os países do Caribe, principalmente a Jamaica, que era o maior produtor mundial. A única exceção era a Austrália. Em 1974 foi criada a "International Bauxite Association", conhecida como IBA, que veio representar os interesses dos grandes produtores de bauxita.

Segundo Thomas (1984), o investidor tinha domínio sobre a maior parte das variáveis de decisão do projeto. No caso de necessidade de melhor conhecimento pelo governo cedente do depósito de bauxita, este encontrava dificuldades. Dadas as próprias características da indústria, os preços poderiam ser manipulados. Com base neste argumento é que se constituiu a IBA entidade que serviria como fonte de informação, principalmente para os governos dos países membros.

Na verdade o IBA constituiu uma tentativa por parte dos países membros de aumentar seu poder de barganha junto as grandes empresas produtoras, uma vez que estes países em sua maioria tinham na bauxita a sua principal fonte de divisas. Por não possuírem uma pauta de exportações variada, buscavam com a imposição das taxas maximizar a receita com a mineração e exportação de minério.

A imposição das taxas pela Jamaica tinha como objetivo original dar a este país o tipo de benefícios dados aos países exportadores de petróleo, membros da OPEP. No entanto a sua introdução teve o efeito contrário, reduzindo a competitividade da bauxita jamaicana (Roskill, 1993). A questão da taxação imposta pela maioria dos países membros da IBA foi responsável

pelo próprio desenvolvimento da mineração de bauxita no Brasil e pela forte expansão da mineração na Austrália, hoje a maior do mundo, e ainda pelo declínio dessa atividade na Jamaica, Suriname e Guiana (Machado, 1988), conforme pode ser visto no gráfico da figura III.2.

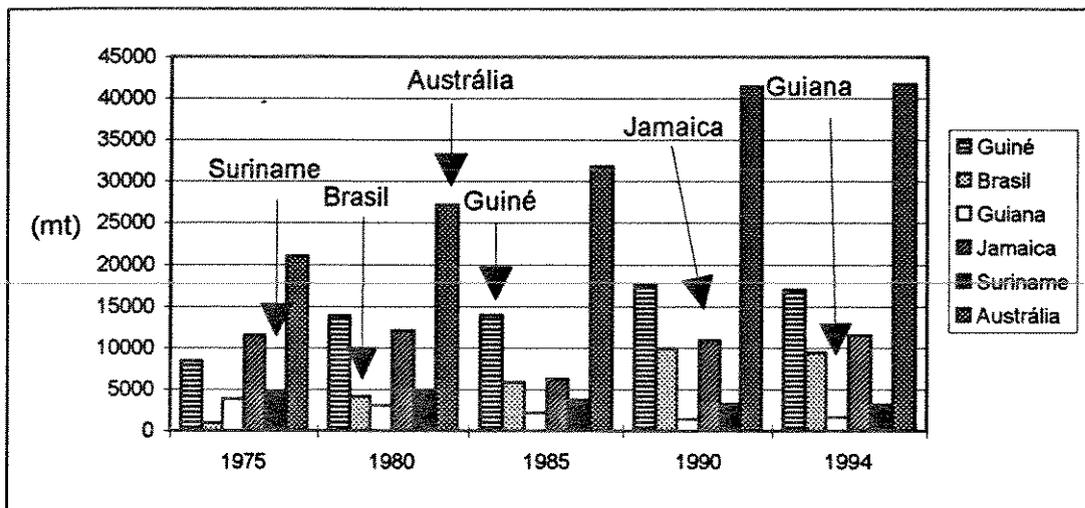


Figura III.2 IBA e a produção de bauxita
 Fonte: World Bureau of Metal Statistics, 1975-1995.

Um grande golpe para a associação foi a saída da Austrália no ano de 1991. Três anos mais tarde a IBA foi dissolvida (Chevalier, 1995).

III.3 EVOLUÇÃO E CONTROLE DA PRODUÇÃO MUNDIAL DE ALUMINA

Em meados da década de 60 mais de 60% da produção mundial de alumina estava concentrada nos sete países mais industrializados, os quais hoje são responsáveis por não mais do que 25% dessa produção. Atualmente os principais produtores são: Austrália, EUA, Jamaica, Brasil, Suriname, e Venezuela. A tabela III.2 mostra a produção de alumina por região nos últimos 30 anos.

Tabela III.2 Maiores produtores ocidentais de alumina.

1966		1970		1980		1990	
	%		%		%		%
1.U.S.A.	58,20	1.U.S.A.	45,30	1.Austrália	34,50	1.Austrália	46,60
2.Canadá	9,90	2.Austrália	16,10	2.U.S.A.	33,60	2.U.S.A.	22,50
3.França	9,30	3.Jamaica	12,90	3.Jamaica	11,40	3.Jamaica	11,90
4.Jamaica	8,80	4.Japão	9,60	4.Alemanha	7,10	4.Brasil	6,90
5.Japão	7,30	5.Canadá	8,30	5.Suriname	6,90	5.Suriname	6,30
6.Alemanha	5,50	6.Suriname	7,80	6.Canadá	5,70	6.Venezuela	5,30
Total de prod.							
6 maiores(Mt)	9124		13348		20922		24199
Prod.Mundial(Mt)	11510		17382		29304		34503
% de prod.							
6 maiores	79,3		76,8		71,4		69,9

Fonte: Morrison, 1992.

Nota: A tabela retrata a posição dos seis maiores produtores mundiais

Existem no mundo mais de 50 companhias produzindo alumina, sendo que 30 dessas empresas respondem por mais de 38 milhões de t, ou 85% da produção mundial. Fora os grandes consórcios produtores, a maior empresa produtora da atualidade é a Alcoa of Australia, seguida pela WMC e Billiton. No Apêndice I.2 pode-se observar os principais produtores de alumina do mundo.

Durante a primeira metade dos anos 80 novas capacidades avaliadas em cerca de 5,75 milhões de t/ano foram postas em operação. Destas novas instalações, 40% foram construídas na Austrália e 30% na América do Sul. Durante esse mesmo período, cerca de 5,3 milhões de t/ano de capacidade foram fechadas; 53% destas instalações localizavam-se nos EUA, 26% no Leste (Japão e Taiwan) e 15% na Europa (Nappi, 1992).

A América do Sul e Caribe detém hoje cerca de 58% de toda a produção mundial de alumina (World Bureau of Metal Statistics, 1990-1995). De todos os países situados nessas regiões, o mais envolvido com a produção de óxido é a Venezuela que controla inteiramente a sua produção.

Jamaica, Guiana, Suriname e Brasil detêm participações em grandes empreendimentos juntamente com empresas do setor. A quase totalidade da alumina produzida nos países do Caribe vai abastecer as refinarias canadenses e norte-americanas. No caso brasileiro, cerca de 94% da produção de óxido é processada nas reduções brasileiras (ABAL, 1994) e na Venezuela este percentual fica em torno de 84% (UNCTAD, 1994).

A Venezuela sempre manteve seu setor de bauxita-alumina-alumínio sob controle governamental. Hoje o país conta com uma estrutura produtiva significativa, e produção de alumina em torno de 2 milhões de t/ano. A empresa estatal Interalumina, controladora de toda a produção venezuelana de óxido, deverá juntamente com as outras empresas do setor em mãos do governo, ser privatizada nos próximos anos.

Na Oceania, segunda maior região produtora de alumina, toda a produção concentra-se na Austrália. A Alcoa of Australia é hoje a maior produtora mundial de alumina, e também o maior exportador de óxido. Outras grandes produtoras de alumina são os grandes consórcios instalados no país: Queensland, Nabalco e Worsley. A Alcoa tem três grandes refinarias (Kwinana, Pinjarra e Wagerup) e é responsável por uma produção de 6,15 milhões de t/ano de alumina, só na Austrália (Alcoa of Australia, 1994).

Na Europa há diversas refinarias de porte médio, sendo as únicas grandes instalações a de Aughinish na Irlanda, San Ciprian na Espanha e a de Porto Vesme na Itália. No caso de Aughinish a intenção era tornar a refinaria uma fornecedora dos grandes produtores europeus de alumínio, graças a possíveis vantagens locacionais (estaria próximo à CEE). Ocorre que grandes produtores como Hydro Aluminium, Elkem, VAW, A-L Lonza e

Billiton, já tem fornecimento de grande parte de sua produção garantido graças à participações em projetos mineradores e de refino. A Hydro Aluminium conta com fornecimento da Alpart (Jamaica) e da Frialco (Guiné). Com estas cotas a empresa tem acesso direto a 50% de suas necessidades de alumina. A Elkem compra alumina da Billiton no Suriname e Aughinish, assim como da Alcoa of Australia. A VAW conta com a maior parte de seu fornecimento advindo de suas cotas na Guiné, Stade e CBG (Chevalier, 1995; Norsk Hydro, 1994; Hydro Aluminium 1995; UNCTAD, 1995).

A Rússia e China hoje são dois grandes importadores de alumina do ocidente. No caso russo basta notar-se que este país conta com 2,94 milhões de t/ano de capacidade de produção de alumínio primário, enquanto tem somente 1,9 milhões de t/ano de capacidade de produção de alumina, insuficientes portanto para as suas necessidades. Apesar da Rússia ter assinado o Memorando de entendimento¹ em maio de 1995, comprometendo-se a cortar aproximadamente 500 mil t de produção de alumínio, o país ainda continua a ser um franco importador de óxido, haja visto o descompasso entre a sua capacidade anual de produção de metal primário e de alumina. Com a China acontece o mesmo, o país tem uma produção de alumina em torno de 1,97 milhões de t/ano, enquanto sua capacidade de produção de alumínio é de 2,44 milhões de t/ano (UNCTAD, 1995).

Muitos “traders” como Marc Rich ganharam muito dinheiro com a venda de alumina a estes dois países, uma vez que detinham em mãos

¹O Memorando de entendimento foi assinado em outubro de 1994, entre os governos dos EUA, Canadá, CEE, Noruega, Austrália, e a federação Russa, para promover o corte em duas etapas de

estoques consideráveis de óxido comprado a preços baixos, e no último ano, encontraram grande demanda por parte desses mercados (Nappi, 1995. Inf. verbal).

III.3.1 OS PRINCIPAIS CONSÓRCIOS REFINADORES DE ALUMINA

Existem diversos consórcios produtores de alumina em todo o mundo, sendo os principais aqueles situados na Austrália, Jamaica e Suriname, não só pelo volume de produção mas também por estarem situados nos países que juntos são reponsáveis por 50% da produção mundial de alumina. Estas instalações estão apresentadas na tabela III.3.

Tabela III.3 Principais consórcios produtores de alumina.

REFINARIA	PROPRIETÁRIO	CAPACIDADE(Mt)	START-UP
WORSLEY	Worsley Alumina	1,5	1984
NAIN	Alpart	1,45	1969
GLADSTONE	Queensland Alumina	3,3	1967
FRIA	Friguia e Frialco	0,7	1960
PARANAM	Suralco e Gencor	1,6	1965
GOVE	Nabalco	1,6	1972

Fonte: WMC Prospectus, 1994; Kaiser 1993; Kaiser 1994; Norsk Hydro 1994; Worsley 1994; Gove 1994; Comalco 1993; Comalco 1994; Comalco 1995; Billiton, nota int. 26/7/94; Austraswiss 1994; Nabalco 1994; Nabalco 1995; Friguia 1991;

A Suralco, no Suriname, tem como maior mercado consumidor a Europa (WMC Prospectus 1994). A Jamalco, na Jamaica, envia metade de sua produção para reduções da Alcoa no EUA e para outros compradores menores (Alcoa of Australia 1993, 1994; WMC Prospectus 1994). Ainda neste país situa-se a Alpart, que produz essencialmente para as duas companhias, Kaiser e Norsk Hydro. A parte referente a primeira é toda vendida para terceiros, e a cota restante assegura o suprimento de óxido da segunda (Kaiser, 1993; Kaiser 1994; Kaiser 1995; Norsk Hydro, 1994).

cerca de 500 mil toneladas de alumínio primário da produção Russa. Este acordo visava diminuir a superoferta de metal primário (Kaiser, 1993; Chevalier, 1994).

Na Austrália, a Queensland Alumina consórcio produtor controlado pela Kaiser (28,3%), Comalco (30,3%), Pechiney (20,2%) e Alcan (21,4%) é a maior refinaria de alumina do mundo. Tem toda a sua operação integrada, recebendo bauxita diretamente da mina de Weipa, de propriedade da Comalco, e fornecendo alumina para as reduções de Kurri Kurri, Tomago, Bell Bay e Bluff e ainda aquelas situadas na costa oeste canadense e norte-americana (Queensland, 1994; Kaiser, 1993; Comalco 1993, 1994). Outro grande consórcio existente neste país é o projeto Gove, administrado pela Nabalco. Trata-se de um projeto grande e integrado desde a mineração de bauxita. Tem toda a sua produção dividida entre a Austraswiss, controlada da AL- Lonza e a GAL, consórcio produtor formado por: Pechiney (35%), Gove (35%), Toa (15%), VAW (12%) e Hunter Douglas (3%). Por último há Worsley, uma companhia controlada pela Reynolds (56%), Gencor² (30%), Kobe (10%) e Nissho (4%) responsável pela administração da operação integrada.

III.4 EVOLUÇÃO E CONTROLE DA PRODUÇÃO MUNDIAL DE ALUMÍNIO

A indústria presenciou durante as décadas de 50 e 60 taxas de crescimento de até 8% a.a. e durante a década de 70 estas taxas caíram para cerca de 4% a.a., e nos anos 80 a média ficou em 2,3% (Metallgesellschaft 1980/1990; Brown et. al. 1987). Segundo Sá (1992) a média de crescimento da demanda por alumínio de 1950 até 1973 foi de 9,2%, sofrendo posteriormente no período entre 1974 e 1985 uma redução para

²Esta cota de participação pertencia originalmente à Billiton, mas esta empresa foi incorporada à Gencor em 1995.

1,7%. Durante os anos 80 a demanda teve um crescimento médio de apenas 1,6% (The World Bank, 1992).

Brown op. cit. (1987), apontavam quatro motivos como sendo os principais causadores da queda das taxas de crescimento da produção de alumínio: A substituição deste metal por outros materiais no setor de cabos, embalagens, construção e transportes, nos países desenvolvidos; A crise energética do início da década de 70, que fez diminuir o consumo de bens intensivos em energia por parte desses mesmos mercados; O crescimento da oferta secundária de metal (reciclagem); O ambiente macroeconômico vigente desfavorável.

Sá (op. cit.) também aponta os três primeiros motivos como responsáveis pela diminuição destas taxas de crescimento, e chama atenção para a situação de estagnação da produção primária na Europa, o encerramento de quase toda a produção japonesa e a diminuição da americana. Apesar do exposto acima endossar a idéia de freada do crescimento da indústria, havia também grandes investimentos sendo realizados na construção de novas capacidades, principalmente no Brasil e Austrália. No primeiro país haviam 6 projetos em andamento, no segundo país 11 (Engineering & Mining Journal, 1980-1995).

De toda a capacidade posta em operação desde 1990 até 1995 no mundo, a maior parte constituiu-se de expansões das instalações já existentes. As chamadas seis irmãs do alumínio não construíram nenhuma nova capacidade, mantendo apenas expansões já previstas em algumas de suas unidades. Já as unidades ditas produtores independentes conforme COMPETITIVE Strategy in aluminium (1989), foram as que realizaram os

maiores investimentos em novas capacidades, principalmente aquelas empresas localizadas no oriente médio (Engineering & Mining Journal, 1990-1995).

A participação no mercado de produtores independentes, não integrados, de fato aumentou muito a competição no setor. A prática de exclusão dos concorrentes, através da escolha pelas seis irmãs daquelas empresas para as quais eram negociados a bauxita e o alumínio, conforme colocado por Sá (1992), foi praticamente expurgada. Neste processo é importante observar que as empresas que entraram no mercado são em sua maioria grandes corporações, atuantes em diversas áreas, inclusive geração e transmissão de energia e produtores de diversas commodities minerais. Por seu tamanho são firmas capitalizadas e com custos de capital mais baixos. É o caso por exemplo da Norsk Hydro, WMC e Noranda. Este fato é confirmado pela análise dos balanços financeiros dessas empresas nos últimos anos, onde fica claro que foram justamente as que realizaram um maior nível de lucro.

Com a introdução da cotação do alumínio primário na LME ("London Metals Exchange"), a bolsa de metais de Londres, os preços do alumínio primário deixaram de ser ditados pelas duas maiores companhias, Alcoa e Alcan, e passaram a ser estabelecidos em bolsa. Diversos autores como Peck (1988) e Machado (1985 e 1988), apontam este fato como um dos responsáveis pelo aumento de competitividade na indústria, mas em verdade creio que este foi muito mais uma consequência do que uma causa desse aumento de competitividade. Atualmente a L.M.E. tem 10 armazéns na Inglaterra e mais de 400 no mundo todo (Ray Simpson, 1995 inf. verbal).

Sem dúvida a situação hoje é muito diferente daquela de 30 anos atrás. O controle exercido pelas seis irmãs do alumínio já não é o mesmo, pois estas firmas passaram a responder por uma capacidade produtiva significativamente inferior àquela de 20 anos atrás.

III.4.1 CONTRATOS VINCULADOS DE FORNECIMENTO DE ENERGIA

Após a crise energética do início da década de 70 e a subsequente migração dos centros produtores para os países ricos em fontes competitivas de energia, o setor voltou a passar por mudanças. Uma particularidade surgida nos anos 80 foi a iniciativa por parte das fornecedoras de energia de se engajarem no negócio do alumínio. Mais explicitamente, estas passaram a dividir riscos na forma de contratos de fornecimento de energia com cláusulas que atrelam os preços cobrados aos praticados na LME. Esta prática surgiu, segundo Adams (1990), a partir dos contratos de fornecimento das refinarias de alumina, que atrelavam o preço do óxido aos preços do metal primário. Hoje há diversas companhias no mundo todo que utilizam este mecanismo. Adams (op. cit.) chama atenção para a grande quantidade de produção comprometida com este mecanismo. Apenas 10 concessionárias de energia mantinham contratos num total de 4,5 milhões de toneladas. Na tabela III.4 à seguir estão relacionadas algumas concessionárias e a produção mantida com preços atrelados aos do metal primário. Na tabela III.4 tem-se as faixas de preço das tarifas cobradas pela energia em vários países no ano de 1989.

Tabela III.4 Produção e contratos vinculados de fornecimento de energia

Companhia	Produção (t)
Bonneville Power	1.500.000
Big Rivers Electric Corp.	335.000
Hydro Quebec	512.000
State Electricity Victoria	538.000
Edelca, Venezuela	640.000
Eletróbrás	404.000
Electricite de France	215.000
Landsvirkjun	88.000
National Coal Board	130.000
Volta River Authority	160.000
Total	4.523.000

Fonte: Adams, 1990.

Tabela III.5 Tarifas praticadas pelas principais companhias (mills/Kwh)

Baixas (11-20)	Médias (21-30)	Altas (31-40)	Muito altas (41 +)
Edelca ¹	BPA ³	Alabama ³ (EUA)	CEGG ⁵
Hydro-Quebec ²	British Columbia Hydro ²	Brasil ¹	Japão
Islândia	Nova Zelândia	Electricité de France	Espanha
Manitoba Hydro ²	África do Sul	New South Wales ⁴	Texas Utilities ³
Mideast	Southern Indiana Gas & Electric ³	Ohio Power Co. ³	West Australia ⁴
		Preussen Elektra ⁵	
		Queensland ⁴	
		TVA ³	
		Victoria ⁴	

Fonte: Nappi, 1992.

¹ Venezuela

² Canadá

³ EUA

⁴ Austrália

⁵ Alemanha

⁶ Japão

⁷ Sudeste do Brasil

Segundo Kusaka (1995), atualmente cerca de 1/3 das reduções do ocidente já trabalham com contratos vinculados de fornecimento de energia. Este autor tece longas considerações acerca dos principais aspectos destes contratos e suas influências dentro e fora da indústria do alumínio, recomendando-a para o caso daquelas reduções mais antigas e menos competitivas.

Nappi (1992) interpreta esta prática como forma de aumentar a competitividade de uma nação, analisando a questão dentro de um contexto

mais amplo, envolvendo o setor produtor de metal primário como um todo.

Os dois autores supra-citados mantêm restrições quanto as vantagens desses contratos, na medida em que no momento quase todos os produtores se utilizarem destes, a vantagem individual seria pequena.

Nos EUA a prática dos contratos vinculados de fornecimento de energia deverá acabar em 1996, data em que a maioria desses se encerra. Este é um fato importante uma vez que a BPA ("Bonneville Power Administration"), concessionária responsável por 50% da energia consumida na região afetada pela medida, abastece reduções da Alcoa, Reynolds, Kaiser e Alumax (Roskill, 1993; Kusaka, 1995).

A formação dos consórcios produtores veio tirar vantagens ainda maiores da economia de escala na produção de metal primário, surgindo assim as grandes reduções com capacidade superior a 200 mil t/ano. Hoje, o somatório de todas as reduções de capacidade superior a supra-citada, responde por mais de 40% da capacidade mundial instalada. Estão incluídos 5 consórcios produtores, e ainda 3 associações de empresas (até dois produtores). Dentre um total de 30 unidades, cerca de treze encontram-se na Austrália, Brasil e Canadá, outras nove nos EUA, uma nos EAU, duas na França, uma na Noruega, uma na Indonésia, uma na Alemanha e uma em Ghana.

As mais recentemente construídas são aquelas situadas na Austrália, Brasil e EAU, revelando as consequências das mudanças ocorridas nos centros produtores de alumínio desde o final da década de 70 e durante a de 80. As outras reduções foram em sua maioria reformadas, contando com equipamentos de última geração. Apesar disso, a maior parte das unidades

americanas é dependente de uma única concessionária de energia, a Bonneville Power Administration, conforme ilustra a tabela III.6 (Reynolds 94; Reynolds 95; Kaiser 94; Alumax 94; Alcoa 93; Noranda 94; Noranda 95;). Como muitos dos contratos de fornecimento têm vencimento para a virada do século, é bem provável que as negociações para novos acordos sejam bastante difíceis, impedindo inclusive o funcionamento de algumas delas.

Tabela III.6 Unidades abastecidas pela BPA. Vencimento dos contratos de fornecimento.

Instalação	Capacidade(000t)	Vencimento do contrato
Troutdale	121	2001
Longview	204	2001
Intalco	272	2001
Eastalco	174	2000
Mt. Holly	182	2000
Mead	200	2001
Tacoma	73	2001
Tennessee	205	2000
Total	1431	-----

Fonte: Reynolds, 1993; Reynolds 1994; Alumax 1993; Alumax 1994; Alcoa, 1993; Alcoa 1994; Kaiser 1993; Kaiser 1994;

Na primeira metade da década de 90 o setor enfrentou grande instabilidade de preços, e ainda cortes de produção em função da entrada no mercado mundial do excedente de produção da Rússia e CEI. Em 1990 foram pouco mais de 500 mil t e em 1992 o volume alcançou 2 milhões de t, o que levou a uma crise de superoferta de metal primário, níveis altos de estoques, e preços aviltados. No ano de 1994 houveram cortes de produção da ordem de 2,1 milhões de t. A América do Norte mantinha cerca de 16% de sua capacidade instalada parada. Na África os 16,67% de produção paralizada se devem em grande parte à seca no Egito e Ghana (UNCTAD, 1995).

Apesar disso, no sudeste asiático o consumo tem aumentado muito mais do que no resto do mundo, graças ao forte crescimento econômico de

países como Coréia do Sul e Tailândia. Foi previsto por diversos especialistas que o Memorando de Entendimento assinado com a Rússia não duraria muito, em boa parte devido ao forte consumo nesta região (Merch Clark, 1995 Inf. verbal). Leva-se em conta também o crescimento do consumo chinês de alumínio uma vez que o país apresenta uma capacidade limitada de energia disponível. A China é uma grande oportunidade para o excesso de oferta de metal primário russo, o que contribuiria para o fim de uma situação de superoferta global de alumínio primário. Enquanto isso, a África do Sul já está expandindo sua produção de alumínio, com a construção da redução de Richards Bay II pela Gencor, o que irá elevar a produção sul-africana de 160 mil t/ano para 686 mil t/ano (Gencor, 1994; UNCTAD, 1995) sendo que o consumo neste país é da ordem de 85 mil t/ano (UNCTAD, 1994).

Um grande problema que o setor produtor irá enfrentar na Venezuela é o da poluição. Muitas das reduções desse país não contam com equipamentos para contenção de emissões diversas (Carmine Nappi, inf. verbal.). Apesar de possuir energia a um custo menor do que o brasileiro, a Venezuela não tem uma demanda interna expressiva, nem um setor de semi-manufaturados expressivo, ficando muito dependente de exportações num mercado com perspectivas de preços aviltados no longo prazo.

Outro país que está aumentando significativamente sua capacidade de produção de metal primário é o Dubai. A expansão da Dubai irá aumentar a produção dos atuais 245 mil t/ano para 372,6 mil t/ano. Fica patente que ambos os países irão disputar, juntamente com os EAU e Austrália, o mercado do sudeste asiático (DUBAL, 1994; DUBAL 1995).

III.4.2 OS PRODUTORES INDEPENDENTES

Alguns dos principais produtores mundiais de metal primário são as empresas ditas produtores independentes, que não dominam outros estágios de produção desta indústria. Dentre eles estão: Hydro Aluminium; Elkem Aluminium; WMC e Noranda. Estas são controladas por grandes conglomerados empresariais.

A Hydro Aluminium é uma empresa estatal norueguesa, controlada pela Norsk Hydro. Esta por sua vez atua em diversos segmentos industriais, indo desde a exploração, produção e refino de petróleo, até agricultura. O alumínio representou para a empresa em 1994 cerca de 23% da sua receita bruta. A Hydro Aluminium tem 4 reduções localizadas na Noruega, e ainda conta com participação em uma outra na Suécia. Uma grande vantagem desta companhia é a autogeração e distribuição de energia hidroelétrica. Apesar de repassar 70% de sua produção para a rede de distribuição do governo, ainda tem posição segura devido às concessões que possui. Os preços pagos pela energia na Noruega oscilam em torno de 26,9 mills/Kwh, o que vem a ser um preço bastante satisfatório ao se considerar que a empresa paga o preço de custo apenas por aproximadamente 60% da energia que consome (Norsk Hydro, 1993; 1994; Hydro Aluminium 1993; 1994).

Outro produtor com o mesmo perfil do anterior é a Noranda Aluminum Inc., empresa controlada pela Noranda Inc. Possui empreendimentos nas áreas de: pesquisa, exploração e distribuição de petróleo e gás natural; mineração de ouro, prata, cobre, zinco, e níquel; papel e celulose. Esta empresa detém uma participação modesta no setor de alumínio, fabricando

ainda chapas e extrudados em pequena escala. Possui uma única redução em New Madrid (EUA), onde produz 200 mil t/ano de metal primário.

Outra companhia que detinha até há pouco tempo uma pequena participação no setor através do controle de 40% da Alcoa of Australia, a WMC agora aumentou seu comprometimento em recente acordo feito com esta mesma empresa. Hoje esta está entre os dez maiores produtores mundiais de bauxita-alumina-alumínio, atuando ainda na mineração de cobre e urânio, petróleo e gás natural, e exploração mineral de um modo geral. A empresa objetivou claramente aumentar sua participação na área de alumina e química industrial. Nos dois últimos anos esta estratégia mostrou-se eficiente, visto que grande parte de suas receitas provém de sua participação na Alcoa of Australia. Prova do interesse da companhia pela alumina é a compra da refinaria até então ociosa de St. Croix nas Ilhas Virgens e a expansão de Wagerup na Austrália (WMC 1992; WMC 1993; WMC 1994).

Muito embora de menor porte, outro importante produtor de metal primário é a Elkem Aluminium, que produz algo em torno de 200 mil t/ano de alumínio em duas reduções na Noruega. Esta empresa além de produtora de alumínio, também conta com autogeração e distribuição de energia elétrica (1,9 bilhões de kwh na Noruega e mais 1,1 bilhões de kwh na América do Norte), produção de ferrocromo, ligas de ferro, manganês, cromo, silicone metálico, produtos de carbono, e outros materiais para a indústria de refratários.

A Alumax, é uma companhia relativamente nova, e que por isso possui cerca de 57% de sua capacidade de produção em reduções inauguradas à partir de 1980. Destas reduções, três situam-se nos EUA e as outras duas no

Canadá. É a quinta maior produtora norte-americana de alumínio e responde por 4,5% da produção ocidental. A sua receita provém em sua maioria dos EUA, apesar de ainda vender produtos no mercado europeu (Alumax, 1993, 1994; Reynolds, 1993, 1994; Roskill, 1993).

Nos EAU, a Dubal é uma empresa relativamente nova, que construiu sua primeira redução no final da década de 70, produzindo alumínio a um custo bastante competitivo, já que utiliza o gás natural fornecido através de gasodutos diretamente das plataformas. Esta companhia tem o claro objetivo de atender ao mercado do sudeste asiático, Japão, Coréia do Sul e Taiwan. A Dubal fornece desde 1990 30% de sua produção ao governo chinês. Atualmente está em implantação nova expansão de capacidade o que possibilitará uma produção anual de 373 mil toneladas.

É um desejo comum entre a maioria dos produtores independentes, o avanço em direção aos manufaturados, dado o maior valor agregado destes. Um exemplo é a intenção da CVRD de produzir latas de alumínio no Estado do Rio de Janeiro (Thompson, 1995). No Oriente Médio existe também este interesse em se avançar cadeia abaixo, na produção de artefatos de alumínio. Nesta região, o crescimento se dá incentivado pelos governos locais, interessados em promover a utilização das suas grandes reservas de gás natural. As empresas dessa região são muito capitalizadas e capazes de financiar projetos de interesse. As duas últimas expansões de capacidade na Dubal tiveram 50% do seu custo auto-financiado (Dubal, 1993).

III.4.3 AS SEIS IRMÃS DO ALUMÍNIO

- **ALCOA** A Alcoa é a maior produtora mundial de alumínio primário, integrada desde a mineração de bauxita até a fabricação de produtos de

alumínio em diversos países. A Alcoa opera seis reduções nos EUA e tem ainda participações no Brasil, Suriname, Noruega e Austrália. Esta empresa têm mudado o perfil de sua produção ao longo dos últimos 15 anos uma vez que cortou grande parte de sua capacidade de redução nos EUA. Enquanto isso, investiu em sociedades e participações minoritárias em algumas reduções e, no período de 1985 até 1995, sua capacidade instalada está estabilizada em torno de 2,5 milhões de t/ano de metal primário. A Alcoa é hoje controladora da maior produtora mundial de alumina e bauxita, a Alcoa of Austrália.

- **ALCAN** A Alcan, segunda maior produtora mundial de alumínio primário, é uma empresa totalmente integrada desde a mineração de bauxita até a venda de produtos de alumínio. Atualmente 2/3 das vendas da empresa são de produtos de alumínio. Esta tem coligadas e controladas em diversos países: Brasil, Canadá, EUA, Inglaterra e Japão. Recentemente vendeu sua parte acionária na Alcan Australia Limited. Esta empresa mantém uma fatia significativa de produção de metal primário no Canadá em virtude de contar com tarifas bastante competitivas de energia em Quebec. Para se ter idéia, enquanto a Alcoa têm 30% de sua produção nos EUA, a Alcan têm 37%. Isto é consequência das tarifas bastante competitivas de energia neste país (Alcan Australia, 1993 e 1990; Alcan 1993).
- **REYNOLDS** A Reynolds, terceira maior produtora norte-americana, e responsável por 6,2% da produção ocidental de alumínio primário, atua exclusivamente no setor bauxita-alumina-alumínio. É uma empresa

bastante integrada, principalmente cadeia abaixo. Como não produz bauxita e alumina suficientes para o seu consumo, esta adquire via compra de terceiros o complemento às suas necessidades. Concentra suas atividades na fabricação de produtos de alumínio, responsável por cerca de 70% de suas receitas em 1994. É o terceiro maior fabricante de latas de alumínio para bebidas do mundo. Tem participação em projetos de mineração no Brasil, Guiné, Guiana e Jamaica. É sócia de refinarias de alumina na Alemanha, Austrália, EUA e ainda produz alumínio primário no Canadá, EUA, Alemanha e Ghana (Reynolds, 1994, 1993).

- **PECHINEY** A Pechiney, empresa estatal francesa, tem operações na França, Austrália, Camarões, Grécia, Guiné, Holanda e EUA. Esta empresa tem investido muito nos setores de embalagens, o que representou em 1993 cerca de 46% das suas receitas. Tem investido principalmente em nichos de mercado como cosméticos, alimentação e componentes para turbinas. Foi a empresa que mais reduziu seu número de reduções durante uma reestruturação nos anos 80, passando de 10 para 4 reduções. Detém uma das mais eficientes tecnologias de produção de metal primário, vendendo a mesma para diversos produtores independentes.
- **ALUSUISSE** A Alusuisse é totalmente integrada, desde a mineração de bauxita até a fabricação de produtos de alumínio. A empresa tem investido muito em reestruturação, concentrando suas atividades nas áreas de química industrial, e embalagens. Assim como a Pechiney, esta companhia busca nichos de mercado como extrudados para o setor

automobilístico, embalagens para alimentos, material hospitalar e cosméticos (Alusuisse, 1994, 1995).

- **KAISER** Por último há a Kaiser, companhia que opera em todas as etapas da indústria; mineração, refino, e produção de alumínio primário e manufaturados. Tem participação em minas de bauxita na Jamaica, refinarias de alumina neste país e ainda na Austrália e EUA. Produz metal primário nos EUA, Ghana e Inglaterra. Esta empresa produz energia somente em Ghana, apesar das constantes interrupções devido a secas no país (Kaiser, 1993).
-

IV. UM MODELO DE FLUXO DE REDES PARA A ANÁLISE DO COMÉRCIO DE METAL PRIMÁRIO

IV.1 A PESQUISA OPERACIONAL

A pesquisa operacional teve o seu início durante a Segunda Guerra Mundial. Desde então acompanha a indústria e seu uso foi cada vez mais ampliado e difundido neste setor. O surgimento da tecnologia da informação deve-se em grande parte a este método. Mala-direta, disque 800, checagem de crédito em grandes bancos de dados, dentre outros são exemplos de aplicações da pesquisa operacional na área de marketing (Little, 1991).

Kirkwood (1990) aborda a questão da pesquisa operacional estar ou não ligada a estratégia. É claro que dentro de grandes corporações determinadas decisões de um setor podem não ser consideradas estratégicas para escalões superiores, porém quando tais decisões estão embasadas em ferramental matemático de pesquisa operacional, estas podem ganhar mais clareza e qualidade. Com relação ao tema Kirkwood (op. cit.) está correto em afirmar que a pesquisa operacional está ligada a estratégia.

Não existe nada sobre o método da pesquisa operacional que limite suas aplicações nas indústrias mineral-metalúrgicas, ou que torne sua aplicação mais difícil ou complicada do que em quaisquer outras situações. Entretanto, é evidente que o uso do método depende da abstração do problema à partir da situação real, e posteriormente do tratamento do problema abstrato por processos matemáticos (Margueron, 1970).

IV.2 OS MODELOS MINERAIS

Os modelos minerais fornecem um enfoque sistemático para a análise e previsão do comportamento dos diversos mercados minerais, e das indústrias destes mercados. Estes também permitem a análise de um amplo espectro de decisões normativas que influenciam os mercados. Obviamente os modelos não podem capturar todas as variáveis intrínsecas aos mercados minerais. Por outro lado, estes podem se tornar extremamente úteis em muitos casos na medida em que venham a servir de suporte ao processo de tomada de decisões. Desse modo se pode diminuir os riscos e incertezas dos investimentos, comércio, e até especulação com “commodities” minerais.

Segundo Labys et. al. (1985), um modelo mineral é uma representação formal de um mercado mineral, indústria ou sistema, onde as relações comportamentais incluídas refletem fatores econômicos e técnicos (de engenharia), assim como as instituições políticas e sociais.

IV.3 PROGRAMAÇÃO LINEAR

IV.3.1 INTRODUÇÃO

A programação linear visa fundamentalmente encontrar a melhor solução para problemas que tenham seus modelos representados por expressões lineares. A grande aplicabilidade e simplicidade que a caracteriza devem-se à linearidade do modelo.

A tarefa de programação linear consiste na maximização ou minimização de uma função linear, denominada função-objetivo, respeitando-se um sistema linear de igualdades ou desigualdades que recebem o nome de restrições do modelo. As restrições representam normalmente limitações de recursos disponíveis (capital, mão-de-obra, recursos minerais ou fatores

de produção) ou, então, exigências e condições que devem ser cumpridas no problema. Estas restrições do modelo determinam uma região que recebe o nome de *conjunto das soluções viáveis*. A melhor das soluções viáveis, isto é, aquela que minimiza ou maximiza a função-objetivo denomina-se *solução ótima*. O objetivo da programação linear consiste na determinação da solução ótima (Bazaraa, 1990).

Dois passos são fundamentais para a resolução de um problema de programação linear (PPL); O primeiro é a modelagem do problema, o que será visto em seguida, e o segundo é a solução do modelo. No caso de um PPL, o método mais utilizado é o algoritmo Simplex que será examinado mais adiante (Bregalda, 1988).

Esta técnica surgiu com a formulação do primeiro problema de programação linear por George B. Dantzig em 1949. Antes disso o matemático e economista russo L.V. Kantorovich formulou e resolveu um problema do tipo em 1939, porém seu trabalho só foi descoberto em 1959 (Bazaraa op. cit.).

IV.3.2 O PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO LINEAR

Qualquer PPL pode ser escrito da seguinte maneira:

$$\begin{array}{ll}
 \text{Minimize} & c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \\
 & a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \geq b_1 \\
 \text{Sujeito à} & a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \geq b_2 \\
 & \dots \\
 & a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \geq b_m
 \end{array}$$

Onde $c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$ é a função objetivo que se deseja minimizar, podendo se denotada por Z. Os coeficientes c_1, c_2, \dots, c_n são coeficientes de custos, e x_1, x_2, \dots, x_n são as variáveis de decisão (chamadas também de

variáveis, variáveis estruturais ou níveis de atividade) a serem determinadas.

A desigualdade $\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \geq b_i$ denota a i -ésima restrição. Os coeficientes a_{ij} para $i = 1, 2, \dots, m$, e $j = 1, 2, \dots, n$ são chamados de *coeficientes tecnológicos*.

Estes coeficientes formam a *matriz das restrições A*.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

O vetor-coluna cujo i -ésimo componente é b_i , é referenciado como sendo o *vetor do lado direito* e representa as necessidades mínimas a serem satisfeitas. As restrições $x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0$ são chamadas de restrições de não negatividade. Um conjunto de variáveis x_1, x_2, \dots, x_n que satisfaça todas as restrições é chamado de *ponto possível* ou *vetor possível*. O conjunto de todos estes pontos constitui a chamada *região possível* ou o *espaço possível*.

De maneira análoga ao exposto acima, pode-se dizer que o problema de programação linear consiste em se achar dentre todos os vetores possíveis, aquele que minimize (ou maximize) a função-objetivo.

Para a representação de um problema de otimização como um problema de programação linear devem ser estabelecidas quatro premissas básicas as quais são implícitas aos problemas desse tipo.

1) PROPORCIONALIDADE - Dada uma variável x_j , a sua contribuição aos custos é cx_j , e sua contribuição para a i -ésima restrição é $a_{ij}x_j$. Isto significa que se x_j for duplicado, então a sua contribuição para o custo total e para a i -ésima restrição também o será.

2) ADITIVIDADE - Esta propriedade garante que o custo total é igual ao somatório dos custos individuais e que a contribuição total para a i -ésima restrição é a soma das contribuições individuais das atividades separadamente. Em outras palavras não há efeitos de substituição ou interação entre as várias atividades.

3) DIVISIBILIDADE - Esta afirmação assegura que as variáveis de decisão podem ser divididas em quaisquer valores fracionários, que estas continuam a ser permitidas (Bazaraa, 1990). O PPL no qual alguns ou todos os valores das variáveis devem ser números inteiros não negativos é chamado de *problema de programação inteira* (Winston, 1993).

4) DETERMINÍSTICO - Os coeficientes c_j , a_{ij} , b_i , são todos conhecidos deterministicamente. Quaisquer elementos probabilísticos ou estocásticos inerentes na demanda, custos, preços, disponibilidade de recursos, utilizações e assim por diante, são todos ditos aproximados uns dos outros por estes coeficientes através de alguma equivalência determinística. Esta premissa também é conhecida como hipótese dos coeficientes constantes (Puccini, 1978).

É importante que se diga que, apesar de nem todos os problemas do cotidiano serem lineares, uma vez que o problema a que se propõe solucionar atende aos axiomas básicos de um PPL, então esta técnica pode ser utilizada para a sua resolução.

IV.3.3 O MÉTODO SIMPLEX

Quando um PPL é resolvido, normalmente é utilizado o algoritmo Simplex. Existem diversos outros algoritmos capazes de resolver um PPL, porém este

é sem dúvida o mais conhecido. O programa computacional LINDO utiliza-se desse algoritmo.

O método Simplex, desenvolvido por George Dantzig em 1949, ao invés de testar todos os vértices, inicia com um qualquer e passa a outro adjacente que aumente o valor da função-objeto. O processo finaliza quando, estando em um ponto extremo, todos os pontos extremos a este adjacentes, fornecem valores da função-objetivo não superiores ao atual.

Conforme já estabelecido por diversos autores, existem uma série de procedimentos básicos para a solução de um PPL com o algoritmo Simplex. Esta solução se dá com o problema reduzido à sua forma canônica ou padrão, dependendo de cada um. No algoritmo ilustrado na figura IV.1 utilizou-se o problema na forma canônica. Primeiramente deve-se introduzir no mesmo as chamadas *variáveis¹ de folga ou excesso*. Em seguida este é resolvido segundo um algoritmo como o ilustrado.

¹Além das variáveis que envolvem diretamente o problema (variáveis estruturais), existem as variáveis de folga, que servem para reduzir o problema à forma canônica. As variáveis de folga assumem valores positivos ou negativos, dependendo da equação. Quando a folga é positiva, ela é denominada de déficit. Quando esta é negativa, é denominada de excesso.

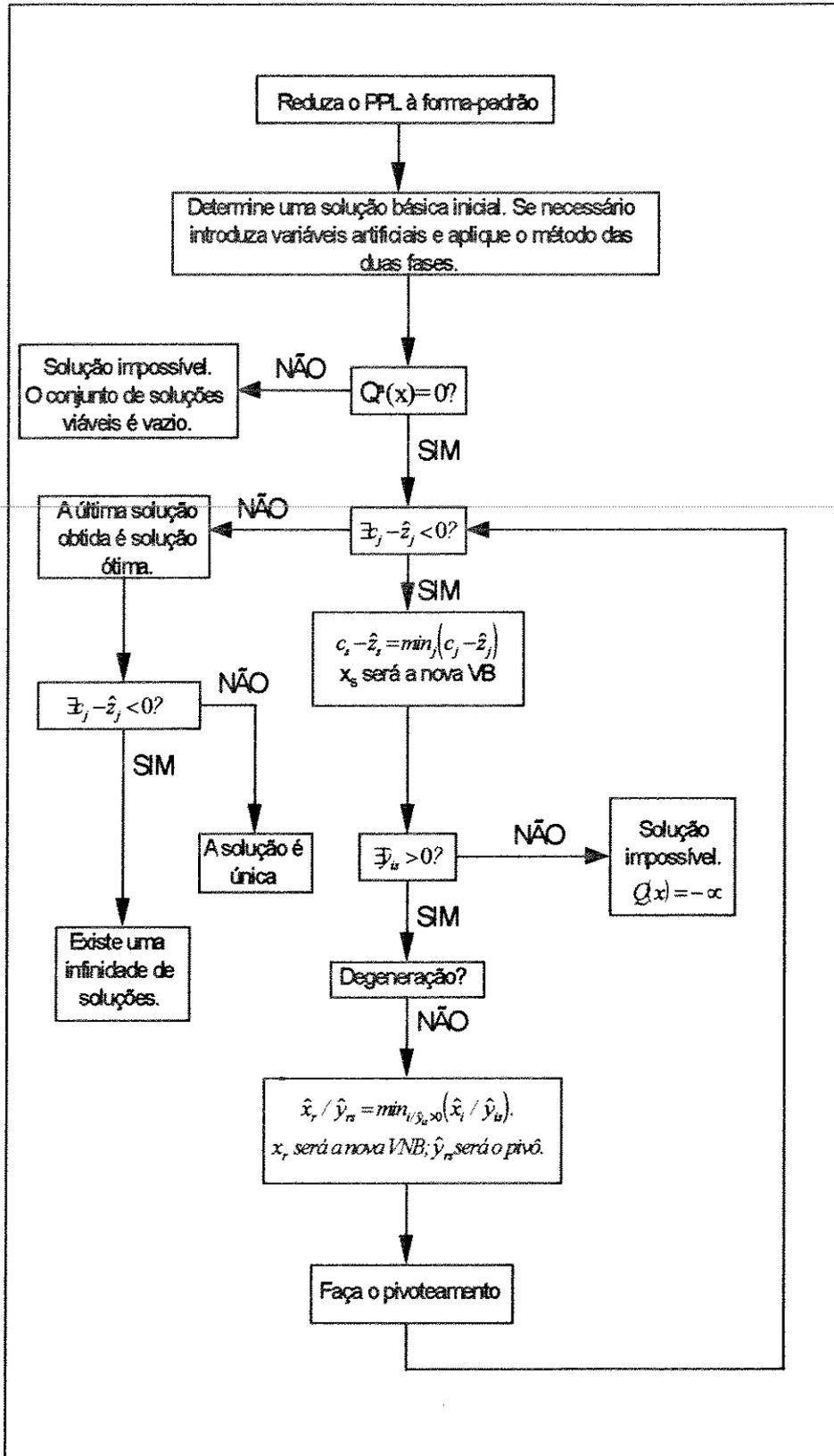


Figura IV.1 Algoritmo Simplex(Adaptado).
 Fonte: Bregalda et. al., 1988.

O pivoteamento, procedimento comum, é uma maneira de se executar as operações algébricas necessárias para se achar a solução ótima. Quando o pivoteamento é feito, constróem-se os chamados *Quadros Simplex*, ou *Tableaus Simplex*. Estes por sua vez, constituem-se em ferramentas que muito auxiliam na resolução algébrica de um PPL. Existem dois métodos que são de grande valia na resolução de PPL's, o *método do grande M* e o *método das duas fases*. Estes são utilizados quando, na etapa de obtenção de uma solução inicial, não há uma solução básica possível para um determinado problema.

IV.3.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Qualquer procedimento no sentido de se estudar as variações ocorridas quando os parâmetros de um PPL são mudados, diga-se variáveis, restrições, e coeficientes, é dita análise de sensibilidade. Conforme Winston (1993) a análise de sensibilidade está preocupada em analisar os efeitos destas mudanças na solução ótima de um PPL. Este processo está diretamente ligado ao teorema dual de um PPL, o que não será abordado aqui.

Outro conceito muito importante que advém da análise de sensibilidade é justamente o de preços-sombra ("shadow prices"). Este equivale ao preço dual ("dual price") que aparece quando se resolve um PPL com o LINDO. Por definição o preço-sombra da i -ésima restrição é a quantidade pela qual o valor ótimo da função-objetivo (Z) é melhorado (aumentado no caso de um problema de maximização, ou diminuído no caso de um problema de minimização) ao se acrescentar 1 unidade ao lado direito desta restrição (b_i).

A análise de sensibilidade equivale à análise de pós-otimização, conforme Puccini (1978).

IV.3.5 INTERPRETAÇÃO GRÁFICA DE UM PPL

No R^2 (plano) e no R^3 (espaço), assim como em muitas outras dimensões os PPL's podem ser resolvidos. Para efeito prático segue abaixo a resolução de um PPL no plano XY. Tanto a função-objetivo como as equações restritivas podem ser representadas. No caso das restrições, estas retas dividem o plano XY em dois semiplanos, além de representar um destes semiplanos. O conjunto dos semiplanos das restrições forma a região das soluções possíveis. A função-objetivo é representada apenas por uma reta. Abaixo está ilustrado na figura IV.2 a resolução gráfica de um PPL.

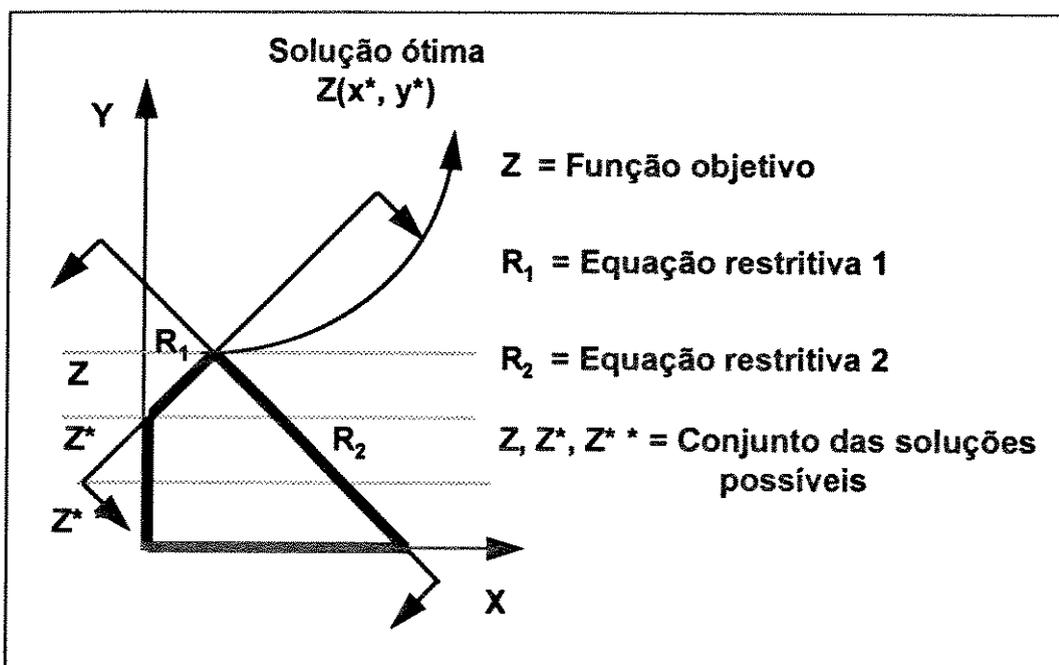


Figura IV.2 Resolução gráfica de um PPL.

O exemplo ilustrado na figura IV.2 tem apenas uma solução ótima, porém pode ocorrer outros casos dependendo da estrutura do problema. A seguir estão tipificados graficamente todas as situações possíveis que podem surgir em um PPL.

1) **Solução ótima, única e finita.** Se a solução ótima finita é única, então esta ocorre em um único ponto. As figuras IV.3 e IV.4 mostram ambas soluções ótimas únicas para um problema de maximização. Na primeira figura a região das soluções possíveis é limitada, ou seja, há um círculo em torno da origem que contém a região supra-citada. Na figura IV.4 esta mesma região não está limitada, e o problema é dito ilimitado e não existe solução ótima (o problema é irreal). Note-se que existem soluções possíveis melhores quando se caminha para o lado direito do gráfico. Conclui-se então que o modelo é defectivo, podendo haver a falta de uma restrição ou simplesmente o modelo não é linear.

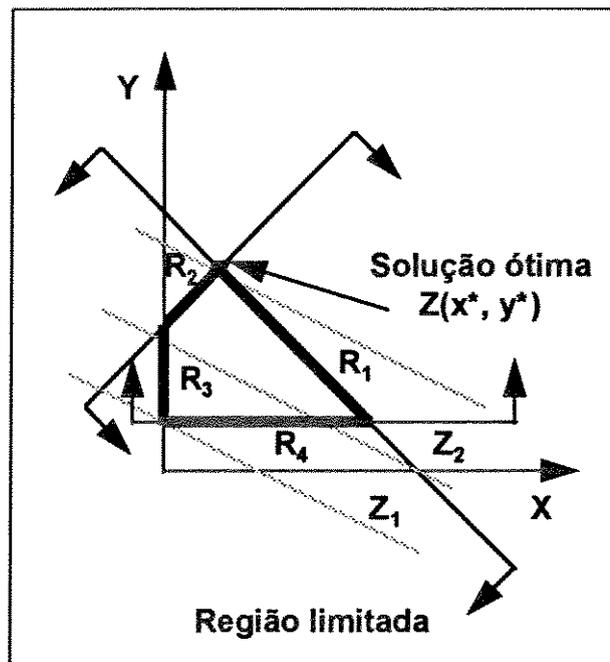


Figura IV.3 Solução ótima única - região limitada.

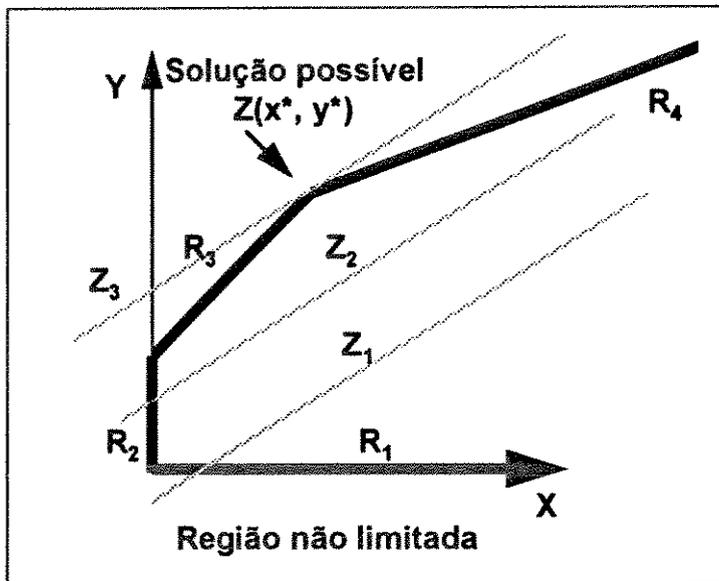


Figura IV.4 Solução possível - região não-limitada.

2) *Soluções ótimas alternativas*. Este caso está ilustrado na figura IV.5. Nesta pode-se perceber que a região das soluções possíveis é limitada. Os dois vértices Z^* e Z^{**} são pontos ótimos, assim como qualquer um dos pontos no segmento de reta que os une.

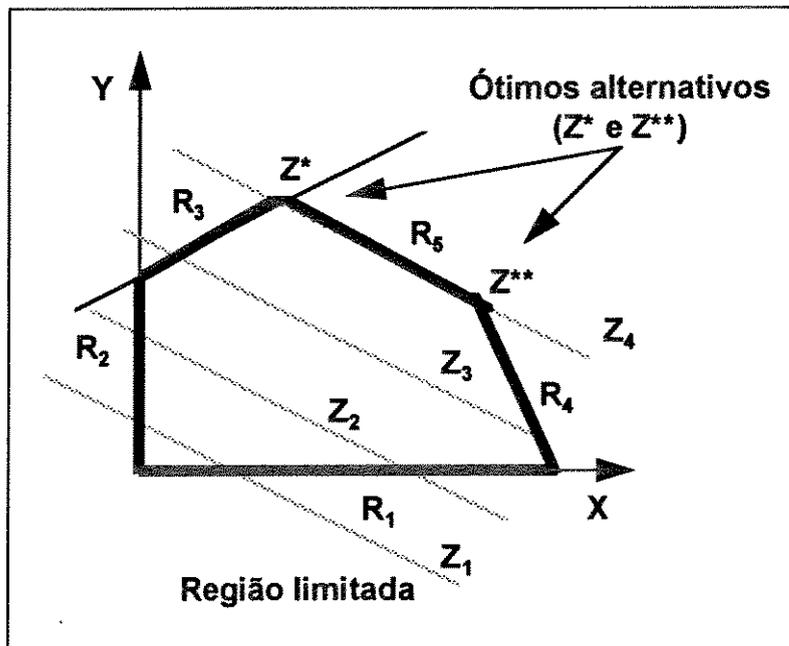


Figura IV.5 Várias soluções ótimas - região limitada.

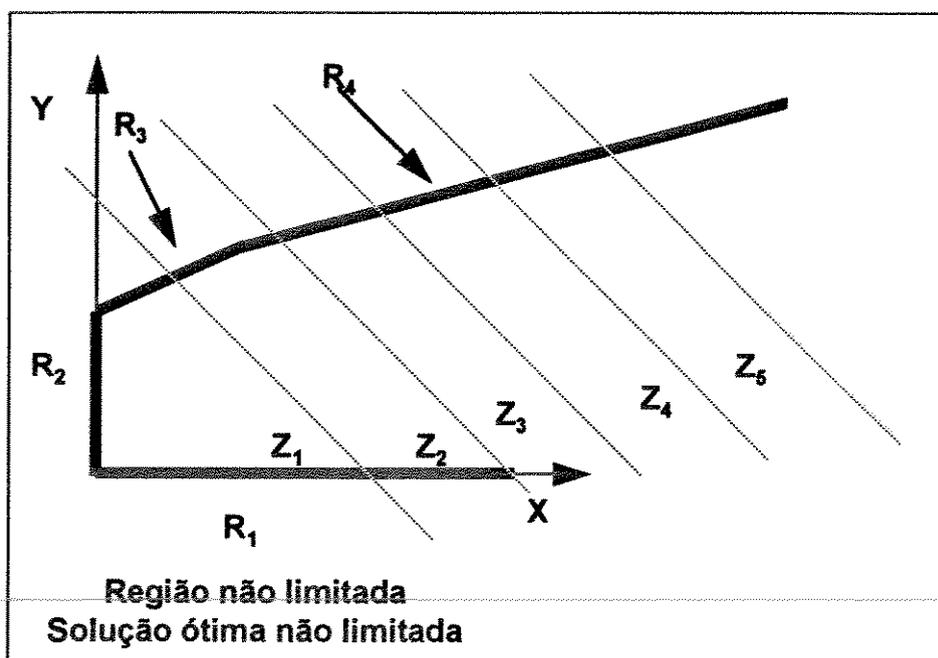


Figura IV.6 Várias soluções ótimas - região não limitada.

3) **Solução ótima limitada**. O caso ilustrado pela figura IV.6 ocorre quando o conjunto das soluções possíveis e a solução ótima não está limitada. Para um problema de maximização, o plano $cx=z$ pode ser deslocado na direção $+c$ indefinidamente já que irá sempre interceptar a região das soluções possíveis. Neste caso o valor objetivo ótimo não está limitado e é igual a $+\infty$ não existindo solução ótima.

Qualquer PPL pode ser colocado num de dois formatos básicos, graças a algebrismos razoavelmente simples. Estes formatos são o dito *padrão* e o *canônico*. Diz-se que um PPL está na forma padrão se todas as restrições são colocadas na forma de igualdades, e todas as variáveis são não negativas. O método Simplex é desenhado para ser aplicado somente àqueles problemas na forma padrão. Os problemas na forma canônica são particularmente úteis quando se busca analisar relações de dualidade. Um problema de minimização está na forma canônica se todas as variáveis são não negativas e todas as restrições são do tipo " \geq ". Um problema de

maximização está na forma canônica se todas as suas variáveis são não negativas e todas as restrições são do tipo “≤”. Na tabela IV.1 estão colocados de maneira sucinta estas duas formas de se escrever um PPL.

Tabela IV.1. Os dois formatos de um PPL

FORMA	PROBLEMA DE MINIMIZAÇÃO	PROBLEMA DE MAXIMIZAÇÃO
PADRÃO	$\text{Min } \sum_{j=1}^n c_j x_j$ $\text{ST } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i \quad i = 1, \dots, m$ $x_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n$	$\text{Max } \sum_{j=1}^n c_j x_j$ $\text{ST } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i \quad i = 1, \dots, m$ $x_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n$
CANÔNICA	$\text{Min } \sum_{j=1}^n c_j x_j$ $\text{ST } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i \quad i = 1, \dots, m$ $x_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n$	$\text{Max } \sum_{j=1}^n c_j x_j$ $\text{ST } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad i = 1, \dots, m$ $x_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n$

Fonte: Bazaraa et. al., 1990.

Um PPL também pode ser formulado em notação matricial. Se fosse o caso este ficaria como a seguir.

$$\text{Min } \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

$$\text{ST } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$x_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n$$

Chama-se o vetor-linha (c_1, c_2, \dots, c_n) de c , e considera-se os seguintes vetores-coluna x e b , e ainda a matriz A , $m \times n$.

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_m \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

Daí decorre que o problema pode ser escrito da seguinte maneira:

Minimize cx

ST $Ax = b$

$x \geq 0$

O problema poderia ser igualmente representado pelas colunas do vetor A . Representando A por $[a_1, a_2, \dots, a_n]$ onde a_j é a j -ésima coluna de A , o problema pode ser formulado como à seguir.

$Min \sum_{j=1}^n c_j x_j$

ST $\sum_{j=1}^n a_j x_j = b$

$x_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n$

IV.3.6 DIAGRAMAS DE FLUXO DE REDES

Muitos dos problemas de otimização podem ser melhor resolvidos por meio de representações gráficas ou diagramas de fluxos de redes² como são conhecidos. Existem diversos modelos específicos para cada propósito: problemas do menor caminho; problemas de maximização de fluxo; CPM-PERT; problemas de espaçamento mínimo ("minimum spanning-tree problems"); e diagramas de fluxos de rede de custos mínimos³.

A resolução de problemas de programação linear por meio de gráficos veio trazer velocidade ao método. Em alguns casos é possível que, dependendo do problema, se obtenha soluções mais rápidas do que através do algoritmo simplex tradicional.

Antes de se abordar todos os aspectos do modelo proposto para o caso da Alcan, é importante ressaltar alguns dos aspectos básicos dessa técnica de programação linear ora utilizada.

²O termo vem do inglês "Network Flow"

³O termo vem do inglês "Minimum Cost Network Flow Problems"

IV.3.6.1 DEFINIÇÕES BÁSICAS

Um gráfico, ou diagrama de fluxo de redes, é definido por dois conjuntos de símbolos: nós e arcos. Primeiramente define-se um conjunto V de pontos, ou vértices. Os vértices de um gráfico ou diagrama de fluxo de redes equivalem aos nós. Um dígrafo consiste em dois nós ligados por um arco (figura IV.7).



Figura IV.7. Dígrafo

Em se considerando um diagrama direto, ou um dígrafo G , consistindo de um conjunto finito de nós (vértices ou pontos) $N=\{1, 2, \dots, m\}$, e de um conjunto de arcos diretos (ligações, ramos, bordas ou linhas) $A=\{(i, j), (k, l), \dots, (s, t)\}$ unindo pares de nós em N . O arco (i, j) é dito incidente aos nós i e j e é direto do nó i ao nó j . Um diagrama de fluxo de redes tem n nós e m arcos. O diagrama da figura IV.8 tem quatro nós e sete arcos.

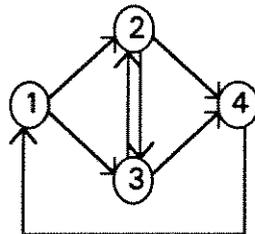


Figura IV.8 Exemplo de fluxo de rede: 4 nós e 7 arcos.

A cada nó i em G é associado um número b_i que representa a oferta disponível de um determinado item (se $b_i > 0$), ou a demanda por este item (se $b_i < 0$). Os nós com $b_i > 0$ são por vezes denominados de fontes, e aqueles com $b_i < 0$ são chamados de escoadouros.⁴ Se $b_i = 0$, não há nem itens disponíveis, nem itens demandados neste nó; neste caso o nó i é

⁴O termo vem do inglês "sinks".

chamado de nó intermediário ou de transporte⁵. Associados com cada arco (i, j) está um número x_{ij} que representa a quantidade de fluxo neste arco (assume-se que $x_{ij} \geq 0$), e deixa-se c_{ij} ser o custo unitário de transporte ao longo deste arco.

Deveria-se assumir que a oferta total é igual a demanda total dentro do diagrama de redes elaborado, ou seja, $\sum_{i=1}^m b_i = 0$. Se este não for o caso, quer dizer, $\sum_{i=1}^m b_i > 0$, (oferta maior que demanda) então é acrescentado um

nó de demanda postiço, $m+1$, com $b_{m+1} = \sum_{i=1}^m b_i$ e ainda arcos de custo zero ligando cada nó oferta a este novo nó postiço. Quando $\sum_{i=1}^m b_i < 0$, (oferta menor que demanda) ou seja, a oferta é menor do que a demanda, deve-se acrescentar um nó de oferta postiço com um custo M muito alto e ligá-lo a todos os outros nós de demanda.

Os problemas de diagramas de fluxo de redes de custo mínimo poderiam ser formulados da seguinte maneira: Embarque a quantidade ofertada disponível através da rede de distribuição existente de sorte que a demanda seja atendida ao menor custo possível. Matematicamente este problema é formulado do seguinte modo (os somatórios se dão sobre os arcos existentes):

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij}$$

$$\text{Sujeito à } \sum_{j=1}^m x_{ij} - \sum_{k=1}^m x_{ki} = b_i \quad i= 1, \dots, m$$

⁵O correspondente em inglês é “transshipment points”. Normalmente aplica-se o termo para pontos de um diagrama que servem apenas para passagem de material, tendo fluxo total igual a zero. Seu papel dentro dos diagramas de fluxo de redes é muito importante para a representação de estoques, depleção de jazidas, perdas por processamento e muitas outras aplicações.

$$x_{ij} \geq 0 \quad j = 1, \dots, m$$

As restrições acima são denominadas de equações de conservação de fluxo, balanço nodal ou de Kirchoff, e indicam que nenhum fluxo poderia ser criado ou destruído ao longo de um determinado diagrama de fluxo de redes.

Nestas equações de conservação de fluxo, $\sum_{j=1}^m x_{ij}$ representa o fluxo total que sai de um nó i enquanto $\sum_{k=1}^m x_{ki}$ indica o fluxo total que entra em um nó

i . Estas equações necessitam que o fluxo total fora do nó i , $\sum_{j=1}^m x_{ij} - \sum_{k=1}^m x_{ki}$

seja igual a b_i . Se $b_i < 0$, então haveria mais fluxo entrando em i do que saindo deste. Este tipo de problema é dito *incapacitado*. Os problemas que levam em conta limites superiores nos arcos são ditos *capacitados*.

Os problemas de fluxo de custos mínimos podem surgir em situações onde pessoas e materiais necessitam ser remanejados entre vários pontos de uma empresa, país, etc... Esta técnica poderia estar associada com o movimento de locomotivas entre pontos numa rede férrea de uma empresa de transportes, de sorte que satisfizesse as necessidades de energia das composições à um custo mínimo. É muito utilizada ainda em projetos de redes de distribuição de energia, oleodutos, alocação de tanques de combustível em refinarias, blendagem de minérios, além de uma variedade de outras aplicações.

De fato, os problemas de fluxos de custo mínimo são problemas de programação linear e podem ser resolvidos de várias formas. Pode-se aplicar o algoritmo Simplex a um problema, porém o que se busca é a simplificação deste algoritmo de modo à permitir a sua utilização diretamente em um diagrama de redes sem a necessidade dos "Tableaus".

IV.3.7 TEORIA DOS GRAFOS NA PROGRAMAÇÃO LINEAR

Considere-se um dígrafo $G(N, A)$ introduzido anteriormente com um conjunto de nós N e um conjunto de arcos A . Este gráfico é dito *próprio* se as cardinalidades de N e A satisfazem $|N| \geq 2$ e $|A| \geq 1$. Dois nós em um gráfico são ditos adjacentes caso eles estejam diretamente conectados por algum arco. Para o arco direcionado $(i, j) \in A$, o nó i é chamado de *nó-origem* e o nó j de *nó-destino*. Para qualquer nó i , o conjunto de nós j para os quais exista um arco (i, j) é chamado de *estrela-avante* de i . Igualmente, para qualquer nó j para o qual exista um arco (j, i) este é chamado de *estrela-reversa*⁶ de i . Na figura IV.9 estão ilustrados dois exemplos destas estruturas.

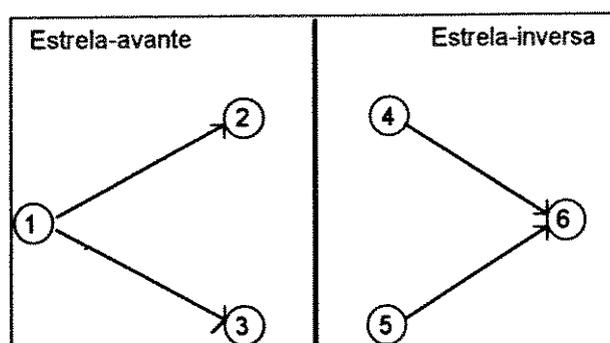


Figura IV.9 Exemplos de estrela-avante e estrela-reversa.

Ao longo do estudo serão levados em conta os gráficos que tenham somente arcos diretos, ou seja, os dígrafos. O arco que não possui qualquer orientação e que permite o fluxo em qualquer direção é chamado de *arco não direcionado*. Um gráfico composto unicamente deste tipo de arcos é dito *gráfico não direcionado*. Se um gráfico tem arcos dos dois tipos, ele é chamado de *gráfico mixto*. No caso de um problema de custo mínimo, se existir um arco não direcionado (i, j) com custo $c_{ij} \geq 0$, então este pode ser

⁶Ambos vem dos termos em inglês "forward-star" e "reverse-star".

trocado por dois arcos direcionados (i, j) e (j, i) , orientados em sentidos opostos, e com o mesmo custo unitário c_{ij} . No entanto esta construção não é válida caso $c_{ij} < 0$. Neste caso, se o problema tiver uma solução possível, então aplica-se qualquer solução possível ao problema original e impõe-se a esta um fluxo infinito de i para j ao longo de (i, j) e no sentido oposto (j, i) . Desse modo mantém-se a possibilidade de solução do problema e direciona-se a função-objetivo para $-\infty$, enquanto na realidade uma circulação deste tipo resultaria num fluxo e custo adicional de zero ao problema original.

Continuando, um *caminho* (de um nó i_0 para i_p) é uma sequência de arcos $P = \{(i_0, i_1), (i_1, i_2), \dots, (i_{p-1}, i_p)\}$ nos quais o nó inicial de cada arco corresponde ao nó terminal do arco anterior da sequência e i_0, i_1, \dots, i_p são nós distintos. Tem-se ainda que cada arco no caminho está direcionado para o nó i_p e à partir do nó i_0 . Uma *cadeia* é uma estrutura similar a um caminho a exceção de que nem todos os arcos são necessariamente direcionados para um nó i_p . A figura IV.10a ilustra um caminho e a figura IV.10b uma cadeia. Um *circuito* equivale a um caminho de um nó i_0 para i_p mais o arco (i_p, i_0) . Conclui-se então que um circuito equivale a um *caminho fechado*. De modo análogo, um *ciclo* equivale a uma *cadeia fechada*. As figuras IV.10c e IV.10d ilustram circuitos e ciclos. Todo caminho é uma cadeia, mas nem toda cadeia é um circuito. De modo semelhante, todo circuito é um ciclo mas nem todo ciclo é um circuito.

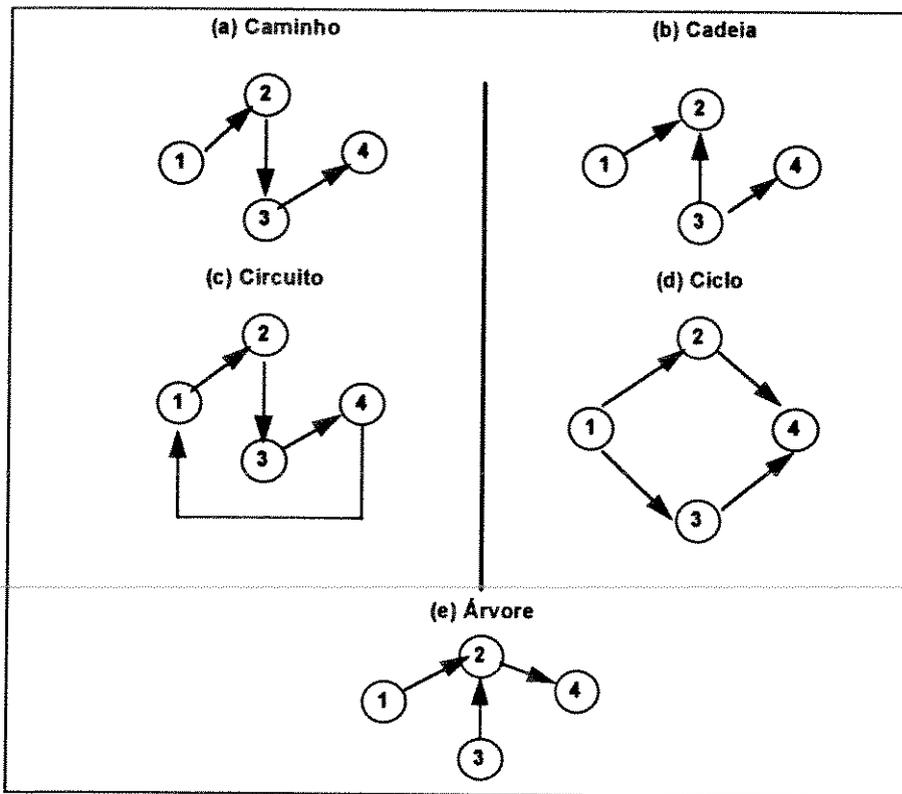


Figura IV.10. Caminhos, cadeias, circuitos, ciclos e árvores.
 Fonte: Bazarraa et. al., 1990.

As definições acima referem-se ao que se chama de caminhos, cadeias, circuitos ou ciclos simples. Assume-se que tais definições se aplicam aos exemplos dados salvo observação em contrário. Um *caminho não simples* $i_0, i_1, i_2, \dots, i_p$ permite que se repitam nós e ainda que haja circuitos. Por exemplo, o conjunto de arcos $\{ (1,2), (2,3), (3,4), (4,2), (2,3), (3,5), (5,6), (6,7), (7,5), (5,8) \}$ descreve um caminho não simples do nó 1 até o 8, com a sequência de nós i_0, i_1, \dots, i_p visitada, igual a: $i_0 = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ e $8 = i_p$.

Um gráfico *precaricamente conectado* é aquele no qual existe uma cadeia para cada par de nós. Ao contrário, um gráfico *fortemente conectado* é aquele no qual há um caminho (direcionado) de cada nó para todos os outros nós. Por último, um gráfico dito *completo*, é aquele que conta com um

arco ligando cada nó aos demais. Com isso um dígrafo completo com m nós tem $m(m-1)$ arcos. Um subgráfico $G' (N',A')$ de um gráfico $G (N,A)$ é aquele que satisfaz $N' \subseteq N$ e $A' \subseteq A$, tendo-se em mente que se $(i, j) \in A'$, então i e $j \in N'$. Se $G' \neq G$, então G' é chamado de *subgráfico-próprio* de G . Um subgráfico $G' (N',A')$ DE $G (N,A)$ é dito *induzido pelo conjunto de nós N'* , se A' inclui todos os arcos em A , e ambos os nós associados e presentes em N' . Por exemplo, na figura IV.9 (p. 68) o subgráfico induzido pelo conjunto de nós $N' = \{1, 2, 4\}$ é um gráfico com os nós 1, 2, e 4, e com o conjunto de arcos $A' = \{(1,2), (2,4), (4,1)\}$. Um *componente* de um gráfico G é um subgráfico que é conectado, e que não é um subgráfico-próprio de outro subgráfico conectado. Uma vez que os componentes de um gráfico são *subgráficos máximos conectados*, estes se tornam peças separáveis do gráfico. Por exemplo, se forem deletados os arcos (1,2), (1,3), e (4,1) na figura IV.9, o gráfico resultante tem dois componentes.

Uma *árvore* é um gráfico conectado sem ciclos. Uma *árvore irradiada*⁷ nada mais é do que uma árvore que inclua todos os nós de um gráfico, ou seja, é um subgráfico conectado e *irradiada* sem nenhum ciclo. A figura IV.10e ilustra uma *árvore irradiada* contida no gráfico da figura IV.8. As figuras IV.10a e IV.10b são também exemplos de árvores irradiadas. As figuras IV.10c e IV.10d não são árvores. É interessante notar que um gráfico sem ciclos tem uma árvore para cada um de seus componentes. Um gráfico desse tipo é chamado de *floresta*. Igualmente, uma *floresta irradiada*⁸ é definida com relação a um gráfico G é um *subgráfico irradiado* de G sem

⁷Vem do inglês "spanning-tree".

⁸Vem do termo em inglês "floresta irradiada".

ciclos. O grau de um nó equivale ao número de arcos incidentes neste. O grau de entrada de um nó i corresponde ao número de arcos que possuem i como o seu nó de destino, e o grau de saída equivale ao número de arcos que possuem i como seu nó de origem. Tem-se então que o grau de i é igual à soma do grau de entrada mais o grau de saída de i . Por exemplo, na figura IV.9 o grau de entrada do nó 1 é igual a 1, e o seu grau de saída é igual a 2; portanto o seu grau será igual a 3. Um nó com grau igual a 0 ou 1 é um nó final (Algumas vezes o nó final de uma árvore é chamado de folha). Os nós 1 e 4 são os nós finais (folhas) da árvore na figura IV.9a.

IV.3.7.1 DIAGRAMAS DE FLUXO DE REDES DE CUSTO MÍNIMO

Como já foi dito anteriormente, os problemas de transporte, alocação, distribuição, de menor caminho, maior fluxo e CPM-PERT são casos especiais dos diagramas de fluxo de redes de custo mínimo ("Minimum Cost Network Flow Problems" ou MCNFP). Qualquer MCNFP pode ser resolvido através da generalização do algoritmo Simplex de transporte ou o Simplex de rede.

Um MCNFP é definido da seguinte maneira:

x_{ij} = número de unidades enviadas de um nó i para um nó j , através do arco (i, j) .

b_i = fluxo total em um nó i .

c_{ij} = custo de transporte de 1 unidade do nó i para o nó j através do arco (i, j) .

L_{ij} = limite inferior do fluxo através do arco (i, j) . Caso não haja limite inferior, é assumido como sendo zero.

U_{ij} = limite superior do fluxo através do arco (i, j) . Caso não haja limite superior, é assumido como infinito.

Sendo assim, escreve-se como se segue:

$$\begin{aligned} & \text{Min } \sum_{i \in j=1}^m c_{ij} x_{ij} \\ & \text{ST } \sum_j x_{ij} - \sum_k x_{ki} = b_i \text{ para cada nó } i \text{ no diagrama} \\ & L_{ij} \leq x_{ij} \leq U_{ij} \text{ para cada arco no diagrama} \end{aligned}$$

IV.4 O MODELO DESENVOLVIDO

Os modelos de fluxo de redes são baseados no princípio de eficiência técnico-econômica; busca-se produzir uma “commodity” mineral a um dado nível, com o mínimo uso de recursos, isto é, pelo menor custo de oportunidade. Este método é derivado da programação linear, ou seja, uma função linear objetiva mais uma rede de equações lineares restritivas. Este tipo de modelo busca preencher uma função objetivo, neste caso a minimização dos custos de transporte, com os limites de capacidade, demanda e organização de mercado especificados nas restrições.

As situações passíveis de aplicação de modelos desse tipo são justamente aquelas onde o transporte de pessoas ou materiais se dá com muita intensidade e frequência. No caso de empresas do setor de bauxita-alumina-alumínio esta questão pode ser interpretada segundo duas óticas distintas.

Primeiramente existe a questão gerencial com relação ao fluxo de material por entre as diversas instalações de uma mesma empresa. Sob uma ótica mais geral, a controladora tenta fazer com que a sinergia entre as suas diversas controladas seja a maior possível, resultando numa otimização do funcionamento da companhia como um todo.

No entanto, tem importância também um problema mais pontual para empresas do porte das abordadas neste trabalho, que vem a ser justamente

a administração das suas diversas minas, refinarias e reduções. É o caso do desenvolvimento de uma mina de bauxita, que envolve o planejamento das frentes de lavra e utilização de equipamentos. Do mesmo modo, no caso das refinarias de alumina e reduções de alumínio primário, a correta administração dos diversos fatores de produção (mão-de-obra e capital por exemplo) objetiva unicamente o controle da produtividade e eficiência, para a obtenção dos melhores resultados possíveis.

Fundamentalmente todo o exposto acima pressupõe a melhor gestão possível dos recursos financeiros disponíveis. Justamente pela sua dinâmica o setor de alumínio apresenta possibilidades interessantes para a utilização do ferramental de PL.

Dentro da questão do transporte de material (bauxita), pode-se citar o caso das minas jamaicanas de Moengo e Accaribo, de propriedade da Alcoa e Gencor. No caso da primeira mina, a bauxita é transportada para a refinaria em balsas e no segundo caso em caminhões. Considerando-se o nível de produção dessas minas, 1,5 milhão de t e 1,9 milhão de t respectivamente (WMC Prospectus, 1994; Alcoa of Australia 1993, 1994), o uso da técnica de PL para a otimização desse transporte, e ainda para escalonamento e alocação de pilhas de minério, pode vir a contribuir para a minimização dos custos operacionais.

Situação semelhante pode ser utilizada em processos de blendagem de diversas bauxitas com composições diferentes, como é o caso da refinaria da Alcan em Saramenha, MG.

Sem dúvida o potencial maior da utilização de métodos de PL é quando estes tem suas aplicações conjugadas umas com as outras, de forma

a compor um processo de otimização global. Este é justamente o procedimento adotado por Lan e Fuller (1995) nos algoritmos de decomposição de problemas em dois ou mais estágios.

IV.4.1 OBJETIVO DO MODELO

O objetivo principal deste modelo é demonstrar a utilidade da PL no processo de monitoração da oferta primária da cadeia bauxita-alumina-alumínio. Para tal criou-se um modelo de otimização visando sempre a minimização dos custos de transporte e o fluxo de material por entre as diversas unidades produtoras controladas ou coligadas de uma empresa.

A título de aplicação selecionou-se as unidades da Alcan devido as facilidades de aplicação dos resultados na sua cadeia produtiva. Através de variações de um mesmo diagrama de fluxo de redes, buscou-se otimizar o fluxo de material transportado por entre os diversos nós do modelo. Também dentro dessa perspectiva, procurou-se simular diversas situações, para demonstrar a versatilidade desta técnica de otimização. A oferta de bauxita inclui dados de 12 minas, as de alumina de 12 refinarias e as de alumínio de 19 reduções, selecionados à partir da análise de informação primária da empresa. Foram utilizados os relatórios anuais da Alcan do ano de 1992 e 1993.

Conforme o exposto acima, não se procurou testar este modelo com dados reais, já que o desejado era apenas mostrar uma das potencialidades desta técnica de PL dentro do setor de bauxita-alumina-alumínio.

Os cálculos foram efetuados por intermédio do pacote computacional LINDO (Shrage, 1990). Trata-se de um algoritmo tradicional e acessível,

mesmo para os indivíduos não familiarizados com as complexidades e o formalismo matemático da técnica de PL.

IV.4.2 VARIÁVEL UTILIZADA

A unidade do fluxo de rede é tonelada métrica de alumínio contido (t). No modelo estabeleceu-se a seguinte relação de conversão: 1 t de alumínio = 2 t de alumina = 4 t de bauxita. Apesar das limitações, esta relação de conversão pode ser utilizada como referência. Dependendo do teor de alumínio do minério e a presença de impurezas, sílica, matéria orgânica e o equipamento utilizado na refinaria, a relação bauxita/alumina pode variar. Deve-se também considerar que o chamado fator de alumina poder oscilar, dependendo do equipamento utilizado na redução, da tecnologia de cozimento e do tipo de anodo utilizados dentre outros parâmetros operacionais desta. Quanto aos custos unitários de transporte, as suas unidades são US\$/t.

Nos apêndices I.1, I.2, e I.3, existem três tabelas com as principais minas, refinarias, e reduções de alumínio do mundo retiradas do BANCAL. O total de minas incluídas responde por 98% da produção mundial de bauxita, as refinarias por 86% da produção mundial de óxido e o total de reduções por 84% da produção mundial de metal primário. Essa listagem inclui companhias privadas e públicas, além de consórcios e os chamados “toll smelters”⁹. Grande parte das informações sobre o fluxo de material (bauxita, alumina e alumínio primário) do presente modelo foram obtidas a partir dos dados contidos neste banco de dados.

⁹São reduções que operam a produção de alumínio primário para venda com a marca de outra companhia.

Todos os valores assumidos para as variáveis do modelo são valores inteiros.

Para efeito de ilustração o modelo não leva em consideração o fator tempo. Caso fosse o objetivo este poderia incorporar outras variáveis de sorte que tornasse possível a sua aplicação para um determinado período.

IV.4.3 ESTRUTURA DO MODELO

As propriedades incluídas para a análise do fluxo de alumínio-alumina-bauxita por entre as instalações pertencentes à Alcan, atenderam aos seguintes critérios:

- 1) Todas as instalações incluídas deveriam contar com participação de qualquer monta da empresa em sua composição acionária. Desse modo o que se fez foi dividir a capacidade nominal total da respectiva instalação e, em seguida incluí-la com uma capacidade nominal equivalente somente à parte que cabe a Alcan. Mesmo nos casos em que a empresa administra e vende toda a produção, esta regra foi aplicada.
- 2) Não foram incluídas minas, refinarias ou reduções, planejadas ou em desenvolvimento, já que o modelo é aplicado apenas para um único ano. Caso este incluísse vários períodos (anos), caberia o estabelecimento de critérios para a inclusão daquelas instalações nesta situação.
- 3) Aquelas instalações com fechamento anunciado, para um prazo não inferior a dois anos foram incluídas. Também foram incluídas as instalações que porventura sofreram cortes de produção em virtude de razões mercadológicas.
- 4) Foi incorporado ao modelo a ociosidade de quaisquer instalações neste incluídas. Para tal bastou que se multiplicasse a capacidade nominal por

(1 - ociosidade). Se o modelo fosse plurianual, caberia a criação de coeficientes para os arcos e ainda a representação de cada instalação por dígrafos, o que iria aumentar em demasia o tamanho deste. Este foi o procedimento utilizado no modelo desenvolvido por Wilburn et. al. (1993).

5) Cortes temporários ou permanentes de fornecimento em quaisquer estágios de produção podem ser inseridos ou retirados do modelo através de rotinas específicas.

6) Perdas de material devido ao seu processamento podem ser levadas em conta quando da etapa de refino de alumina, produção de alumínio primário e reciclagem. Para isso utiliza-se dos mesmos instrumentos constantes do item 4.

Cada arco representa uma determinada atividade, neste caso específico, o transporte de uma "commodity". Os nós representam três tipos de instalações a saber: minas, refinarias e reduções.

IV.4.4 COMPONENTES DO MODELO

O modelo de fluxo de rede apresentado neste estudo é um modelo específico para o caso de uma empresa, a Alcan, incluindo tanto a mineração de bauxita, o refino de alumina e a redução de alumínio.

É um modelo determinístico de otimização, que leva em consideração os fluxos de comércio na medida em que o produto circula através dos múltiplos estágios, desde o minério em subsuperfície até os depósitos para o consumo de produtos finais que contém alumínio.

Neste modelo foram incluídas todas as instalações produtoras de bauxita, alumina e alumínio primário, onde a Alcan detém participação acionária discreta, majoritária ou total. Quando esta corresponde apenas a

uma fração do total, criaram-se nós representando instalações de tamanho equivalente.

A totalidade dos vetores de transporte são apresentados separadamente no modelo, ou seja, para cada ligação entre dois nós específicos há somente um arco.

Dado o fato do problema ser resolvido com um algoritmo de minimização de custos, a solução representa um custo mínimo geral para a empresa, e não para cada unidade individualmente. A solução representa os resultados ótimos considerando-se um mundo racional e eficiente, onde somente foram incorporados os objetivos que levassem a uma minimização dos custos.

Neste modelo novas minas, refinarias, reduções, recicladores ou até mercados consumidores podem ser adicionados ou subtraídos ao modelo. Da mesma forma os custos, capacidades, demanda, oferta, limites inferiores e superiores dos arcos em qualquer parte do modelo podem ser alterados. O modelo pode ainda ser refinado com a construção de modelos complementares menores, e aplicados a situações específicas de cada uma das instalações da empresa. A integração dos diversos problemas e consequentemente de seus resultados (o resultado do problema específico de um nó, pode servir como variável de ligação com um outro problema de outro nó), possibilita um resultado final para a modelagem que se torna cada vez mais próximo da realidade.

Cabe ressaltar que cláusulas contratuais específicas, barreiras de comércio regionais entre outras limitações, podem ser incorporadas ao modelo como restrições.

A figura IV.11 à seguir ilustra um pequeno modelo que inclui todos os aspectos daquele desenvolvido nesta dissertação, só que em menor escala de modo à permitir a melhor compreensão de sua operação.

Este modelo é representado por um diagrama de fluxo de redes em três níveis os quais correspondem às três colunas, minas, refinarias e reduções.

À esquerda dos nós representativos das minas estão colocados números que representam a oferta em toneladas equivalentes de alumínio. Os números à direita dos nós representativos das reduções equivalem à demanda por alumínio de cada uma destas unidades. Por último aqueles números por sobre cada arco são os custos unitários de transporte entre cada um dos nós (ou instalações).

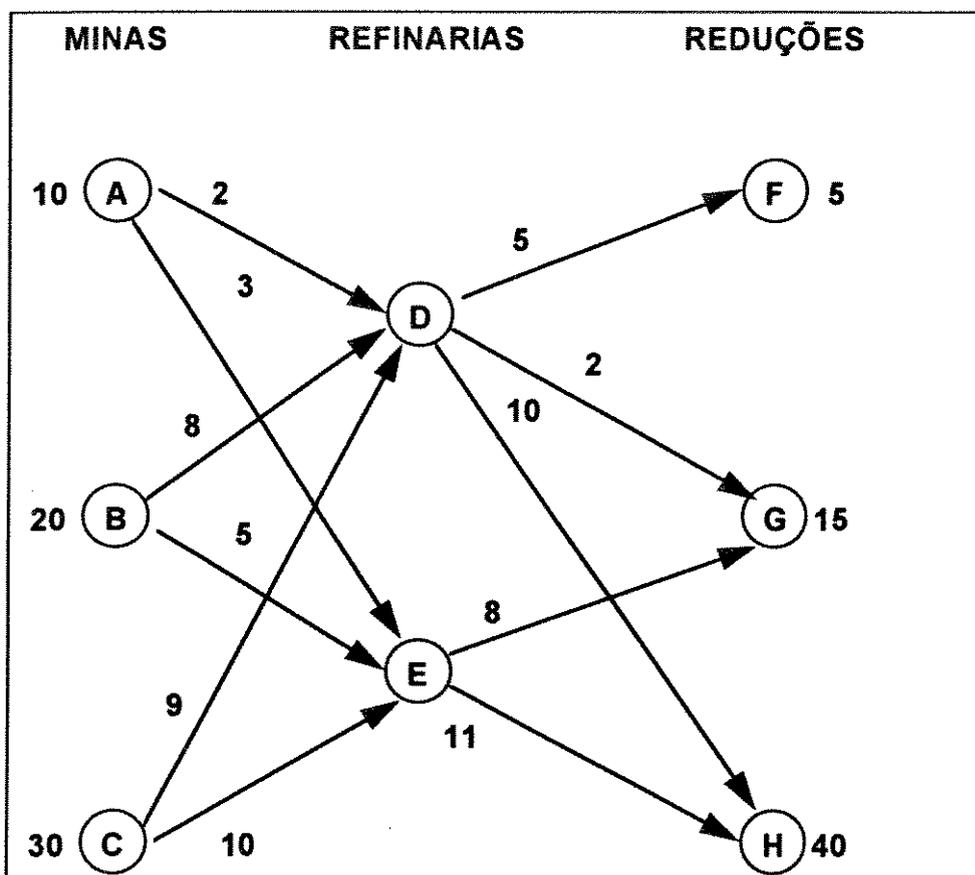


Figura IV.11 Modelo de fluxo de redes simplificado.

O fluxo neste exemplo ocorre do seguinte modo: este inicia nas minas, único local onde pode ser criado fluxo, segue por um dos arcos para as refinarias, as quais são pontos de transporte, e por último chegam as reduções. Neste caso não há limites de capacidade de transporte ao longo dos arcos e o modelo já se encontra balanceado, o que dispensa a criação dos nós e arcos postíços. As minas e as reduções têm limites equivalentes respectivamente as suas capacidades de produção e demandas por alumínio. Como feito no modelo desenvolvido para a Alcan, pode-se estabelecer limites às refinarias, através de inequações de entrada e saída, sempre estabelecendo o fluxo total como sendo nulo.

Num diagrama com poucos arcos e nós pode parecer simples a tarefa de combinar o melhor esquema de transporte de alumínio das minas até as refinarias, no entanto para diagramas maiores como os do tamanho do modelo elaborado não é. Com o auxílio do LINDO pode-se resolver o problema em alguns minutos, bastando para tal que se formule o PPL mais adequado a situação.

IV.4.5 MÉTODO UTILIZADO

A metodologia é a programação de fluxo de redes ("Network Flow Problems"), técnica derivada da programação linear. Basicamente ela é composta de uma função objetivo e uma rede de equações lineares restritivas.

As vantagens em relação aos modelos de programação linear pura são segundo Veiga e Suslick (1995) as seguintes:

- 1) Podem ser completamente descritos por diagramas simples.

- 2) Há como obter-se resultados específicos (números inteiros apenas).
- 3) São mais fáceis de se resolver do que problemas comuns de PL.
- 4) Fornecem uma grande flexibilidade ao modelo, possibilitando diversas alterações com um mínimo de ajuste.
- 5) Aplicam-se aos problemas de monitoração da oferta de bens minerais em cadeias produtivas.

Neste trabalho utilizou-se a mesma abordagem realizada pelo USBM (Wilburn & Wagner, 1993) que construíram um modelo de fluxo de rede (“network flow”) para o alumínio primário e reciclado em escala mundial.

Neste modelo de fluxo de redes, os nós representam as diversas instalações em todos os estágios da produção e comércio de alumínio. Estes nós estão conectados por arcos que representam a oportunidade para processamento ou fluxo de material (alumínio, alumina, bauxita, alumínio reciclado). No total existem 43 nós e 96 arcos.

O fluxo começa nas fontes de oferta de bauxita e termina na demanda das reduções de metal primário. Fluxos de alumínio primário, alumina e bauxita, nunca são representados pelo mesmo arco, eles são separados em arcos distintos e é por isso que, às vezes, há mais de um arco conectando o mesmo par de nós. O conceito de caminho abordado anteriormente no item IV.3.5, pode ser interpretado aqui como uma série contínua de arcos do tipo: mina—>refinaria—>redução.

Um aspecto importante a ressaltar é que a única entrada efetiva de material no sistema se dá através da mina, uma vez que todos os outros nós representam apenas pontos de transporte (“transshipment”).

Numa etapa preliminar foi coletada todo tipo de informação primária que viesse contribuir na confecção do modelo proposto. Estas informações foram obtidas junto ao projeto "Monitoração da Disponibilidade de Recursos Minerais¹⁰", junto ao qual o autor trabalhou tendo acesso aos relatórios anuais da Alcan, assim como a uma grande quantidade de informações disponíveis em outras fontes secundárias.

Em seguida preparou-se uma relação com todas as instalações pertencentes a Alcan e aquelas de empresas controladas ou coligadas (onde a "holding" detém participação acionária discreta, sem controle efetivo da empresa). Com isso, desenhou-se um diagrama com todas as minas, refinarias e reduções que fizessem parte dos negócios da empresa, representando estas instalações por nós. Os arcos representando todo o fluxo de material entre os diversos nós foi colocado posteriormente a conversão de todas as quantidades de bauxita e alumina em toneladas equivalentes de alumínio. Apurou-se então as quantidades que eram transportadas entre cada nó do diagrama, de sorte que se obtivesse um balanço das quantidades envolvidas. Nas tabelas IV.2, IV.3 e IV.4 à seguir estão relacionadas todas as minas, refinarias e reduções utilizadas no modelo.

¹⁰Este projeto é patrocinado pelo PADCT/FINEP.

Tabela IV.2 Minas incluídas no modelo

Mina	Designação	Participação Alcan(%)	Capacidade no modelo(t)
Trombetas	MTRO	12,50	363630
Guiné	MCBG	13,80	345000
Cataguazes	MCAT	100,00	112500
Ouro Preto	MOPR	100,00	12500
Friguia	MFRG	10,00	51000
Ghana	MGA	100,00	100000
Kirkvine	MKIR	100,00	411000
Ewarton	MEWA	100,00	225000
Changdad	MCHA	100,00	165000
Lokardaga	MLOH	100,00	55000
Kimbo	MKIM	10,00	51000
Terceiros	MTER	100,00	712000

Fonte: Alcan, 1993.

Tabela IV.3 Refinarias incluídas no modelo

Refinaria	Designação	Participação Alcan(%)	Capacidade no modelo(t)
Vaudreuil	RVAW	100,00	587500
Kirkvine	RKIR	86,70	255500
Ewarton	REWA	93,00	209250
Aughinish	RAUG	65,00	357500
Ouro Preto	ROPR	100,00	75000
Alumar	RALM	10,00	50000
Belgaum	RBEL	34,62	12983
Muri	RMUR	34,62	37563
Gladstone	RSTO	21,40	356000
Kimbo	RKIM	10,20	60000
Burntisland	RBRN	100,00	60000
Terceiros	RTER	100,00	542334

Fonte: Alcan, 1993.

Tabela IV.4 Reduções incluídas no modelo

Redução	Designação	Participação Alcan(%)	Capacidade no modelo(t)
Arvida	FARV	100,00	232000
Grande-Baie	FGBA	100,00	180000
Laterrère	FLAT	100,00	204000
Shawinigan	FSHA	100,00	84000
Isle Maligne	FIMA	100,00	73000
Beauharnois	FBEA	100,00	48000
Kitimat	FKIT	100,00	272000
Sebree	FSEB	100,00	180000
Lynemouth	FLYN	100,00	130000
Lochaber	FLOC	100,00	38000
Kinlochleven	FKIN	100,00	11000
Ouro Preto	FOPR	100,00	51000
Aratu	FART	100,00	58000
Kurri Kurri	FKKU	100,00	150000
Kambara	FKAM	100,00	34000
Belgaum	FBEL	100,00	73000
Hirakud	FHIK	100,00	24000
Alupuram	FALP	100,00	20000
Terceiros	FTER	100,00	741630

Fonte: Alcan, 1993.

Em todas as três tabelas os campos "designação" representam a identificação de cada nó no modelo de fluxo de redes. O papel desempenhado pelos nós que indicam minas ou reduções de terceiros (MTER ou FTER) é justamente compensar o excesso ou falta nos pontos de oferta ou demanda. Nos pontos de transporte, estes vêm apenas atender a exigência ditada pelas equações de conservação do fluxo (equações de Kirchoff) citadas anteriormente no item IV.3.6.1 deste capítulo. É graças a este procedimento que se pode inserir os coeficientes da eficiência de processos e perdas por transporte.

Feito isso, elaborou-se o problema no computador para posterior solução com o LINDO. Executou-se então o programa para uma porção do diagrama para que fossem identificados os defeitos em potencial que viessem a surgir no modelo completo.

Depois construiu-se um modelo que incluísse as minas, refinarias e reduções. Foi feito o balanceamento deste modelo e, em seguida o mesmo foi executado. O programa LINDO gera os resultados¹¹ e em seguida é realizada a análise de pós-otimização, tarefa esta que o programa executa logo após a resolução do modelo.

Com os resultados do modelo, incluindo a respectiva análise de pós-otimização, pode-se discutir e tecer considerações acerca de diversas situações hipotéticas, que podem ser criadas a partir dos resultados obtidos.

O formato que o LINDO oferece para as respostas de um PPL são muito práticos para a análise dos seus resultados e permitem diversas considerações sobre variáveis e restrições. Neste tipo de formulação é possível a resposta direta referente a retirada de arcos ou nós, assim como uma nova resolução do modelo a partir de mudanças na composição da cadeia produtiva.

Na construção do modelo transformou-se todas as quantidades em toneladas equivalentes de alumínio, segundo relação já expressa anteriormente. Em seguida foi feito um somatório do total de alumínio equivalente que entra no sistema através das minas de bauxita. A partir da teoria pode-se supor que o fluxo total que chega as reduções deveria igualar o fluxo que sai das minas. À excessão dos nós representativos das minas e consumidores finais, todos os outros nós são considerados pontos de transporte. As limitações de cada arco são representadas por rotinas

¹¹Os resultados anteriores à análise de sensibilidade, envolvem apenas o valor de cada arco de custo e seu custo reduzido, assim como a folga ou excesso de cada arco, e o seu preço dual.

específicas do programa utilizado. É graças a elas que se pode simular diversas situações com respeito ao fluxo de material através dos arcos.

Nenhum arco incidente em um nó pode ter a sua capacidade máxima maior do que a capacidade deste nó. Esta regra é estabelecida tendo-se em vista que uma refinaria com capacidade de 100 mil t/ano não pode receber 500 mil t/ano de bauxita já que não há capacidade para o seu beneficiamento. Muito embora haja a possibilidade de estoques, dificilmente alguma companhia iria estocar uma quantidade muito grande de minério junto a própria refinaria. O mesmo raciocínio é utilizado com relação as reduções. Os únicos arcos sem limite superior são aqueles que ligam nós aos chamados nós postiços.

Os arcos têm cinco características: limites inferiores, limites superiores, custos, coeficientes de cabeça e de rabo.

IV.4.5.1 LIMITES SUPERIORES

Representam o máximo fluxo possível ao longo de um arco e são menores ou iguais a capacidade em toneladas métricas de alumínio para o processo representado no arco. Muito embora existam diversas maneiras de se estabelecerem limites superiores para os arcos, estes são determinados na forma de inequações restritivas dentro do modelo. Por vezes, o somatório das quantidades transportadas através de todos os arcos que saem de um determinado nó não é igual a capacidade deste, ocorre que está sendo imposto um limite de produção em decorrência da ociosidade daquela determinada instalação da empresa que este nó venha a representar.

IV.4.5.2 LIMITES INFERIORES

É o mínimo fluxo possível no arco, variando de zero até o limite superior. Se o limite mínimo é zero, o fluxo ocorre unicamente no caso de se ter uma solução ótima. Se o limite mínimo for maior que zero, o fluxo no arco deve ser pelo menos igual ao menor valor, podendo ainda ser tão alto quanto o maior valor possível. O pacote LINDO interpreta automaticamente como sendo zero o limite inferior caso este não seja estabelecido.

Neste modelo o fluxo forçado pelo uso de valores de limite mínimo é usado em arcos de fluxo de mercado para explicar:

- 1) Acordos contratuais ou relações comerciais estáveis entre a empresa e os consumidores de seus produtos.
- 2) Pode ainda ser utilizado para forçar fluxos em rotas específicas. Isto pode ocorrer em virtude da impossibilidade de trânsito através de uma determinada rota.

IV.4.5.3 ARCOS DE CUSTOS

No modelo de fluxos de rede as estimativas de custos, incluem apenas os custos de transporte da empresa em US\$/ t. Tratando-se de arcos individuais de custos, fica patente que o modelo poderia absorver quaisquer outros custos que se desejasse otimizar. Aqueles arcos ligando quaisquer nós aos nós postigos (MTER, RDU, FTER) além de terem capacidade infinita, tem o valor do custo igual a zero. Isto deve ser feito porque senão o algoritmo não alocaria todos os excessos de capacidade das instalações incluídas, naqueles nós postigos.

IV.4.5.4 COEFICIENTES

Os coeficientes são usados para aumentar ou diminuir o fluxo através do arco. Quando associados com os arcos e nós estes representam taxas de perda e de recuperação no processo, além de se constituírem uma alternativa para a imposição de limites superiores ou inferiores.

IV.4.6 ANÁLISE CRÍTICA

Muito embora o modelo não conte com valores reais de custos de transporte entre as diversas instalações da Alcan, este deixa claro que cumpre o objetivo de se provar a praticidade de sua aplicação. Apesar de serem colocados valores fictícios para os diversos custos de transporte, pode-se comprovar que com esta ferramenta de programação linear é possível otimizar-se processos de maneira rápida e eficiente. É claro que outras variáveis mais subjetivas pesam no processo decisório, mas pode-se inferir que com o auxílio deste ferramental o mesmo ganha refinamento e eficiência.

O modelo prova sua versatilidade uma vez que pode ser alterado de maneira muito simples, bastando para tal que se corte ou inclua novas variáveis, ou senão, que sejam colocadas ou retiradas uma ou mais restrições. Esta praticidade constitui-se num grande incentivo a utilização de pacotes computacionais a exemplo do LINDO não somente por profissionais de nível superior, como também por pessoal técnico. Para a implementação prática desse argumento, bastaria que se contasse com a disponibilidade de um microcomputador e o acesso aos valores atualizados dos diversos fatores de produção.

O pacote computacional dispõe de grande praticidade no que diz respeito a análise dos dados, pois o próprio usuário poderia pedir ou não a análise de sensibilidade para os resultados do problema.

Esta técnica é muito prática uma vez que se pode subdividir um mesmo modelo para várias etapas de um mesmo problema e, com as soluções obtidas em uma etapa determinada, rodar o modelo subsequente, e assim por diante, até que se obtenha uma solução geral para um problema grande. Este procedimento é feito criando-se variáveis de ligação. Por exemplo, quando uma refinaria de alumina que é responsável pelo abastecimento de três reduções (clientes) apresenta problemas na blendagem das diversas matérias-primas necessárias ao refino. Assumindo-se que os custos de produção da alumina influem no preço de venda desta para os três clientes, e que estes por sua vez desejam receber o óxido ao menor preço possível, faz-se necessário à empresa minimizar os seus custos de refino e distribuição de alumina aos clientes. Neste caso o que se pode fazer é dividir o problema em duas etapas; Na primeira a refinaria irá recalcular qual a blendagem ótima das diversas matérias-primas utilizadas para que se obtenha a alumina da qualidade necessária, ao menor custo possível. Em seguida com os resultados obtidos a empresa irá utilizar-se das variáveis que lhe forem necessárias para resolver a segunda parte do problema, que é estabelecer uma política de fornecimento de alumina as reduções de sorte que o óxido chegue em todos os três clientes dentro do menor preço possível. Em situações extremamente complexas onde o que se vislumbra é uma solução ótima, há a possibilidade de aplicação do método. Uma vez que é possível se conjugar diversos problemas de PL, e através

das soluções obtidas com o problema anterior (que servirão como dados para o seguinte), se resolver o subsequente, e assim por diante.

Caso o modelo fosse elaborado de maneira mais completa, com a inclusão de outras variáveis e a representação das instalações através de nós de entrada e de saída, exatamente igual ao montado pelo USBM (Wilburn e Wagner, 1993), o LINDO certamente não seria o mais apropriado já que seria necessário um pacote computacional de maior capacidade. Apesar disso, ainda seria possível a utilização de um computador de mesa, que atualmente contam com capacidade de memória suficiente para fazer os cálculos. Problemas completos, e conseqüentemente muito mais complexos, necessitariam de computadores de maior porte, exigência essa que poderia ser facilmente atendida por qualquer empresa uma vez que atualmente é comum o uso de um aparelho desse tipo por parte das empresas do setor.

V CONSIDERAÇÕES FINAIS

• A OFERTA MUNDIAL DE BAUXITA-ALUMINA-ALUMÍNIO

A análise da oferta de bauxita-alumina-alumínio mostrou-se consistente dado o caráter internacional da produção de alumínio, a estrutura dessa indústria e a importante posição do Brasil como país produtor tanto de bauxita como de alumina e alumínio primário.

A oferta de bauxita não deverá aumentar no médio prazo, já que existe hoje algum excesso de produção. Podem haver expansões das minas já existentes, como ocorrerá com a MRN. Esta estabilidade se deve a um comércio cada vez menor de minério uma vez que as refinarias de alumina estão sendo construídas sempre ao lado das minas, em operações integradas.

Cada vez mais as grandes minas deverão ter como maiores compradores de sua bauxita empresas sócias no empreendimento, e que tenham refinarias de alumina instaladas no mesmo país. Um exemplo é o que ocorreu com a MRN que mantinha exportações de bauxita para a Interalumina e que agora produz seu próprio minério.

No setor de refino algumas empresas estão buscando maior rentabilidade, passando a atuar de maneira mais efetiva na produção de aluminas especiais para química industrial. De acordo com esta política há também a busca da substituição de materiais em determinadas atividades. A alumina já está sendo beneficiada por exemplo no que diz respeito a substituição dos componentes fosfatados nos detergentes.

Este novo mercado consolidou uma prática de algumas empresas européias que consiste na transformação de algumas de suas refinarias de alumina metalúrgica para aluminas especiais. Com isso pode-se eliminar os altos custos de capital além de não se perder tanto tempo. Um exemplo disso foi a transformação da refinaria Martinswerk, de propriedade da Alusuisse.

A produção de alumínio apresentou nos últimos dez anos um grande aumento do mercado livre de metal primário, onde diversos produtores independentes passaram a atuar. Os consórcios são uma realidade e vem se beneficiando de sua escala de produção. Futuros aumentos de capacidade surgirão provavelmente na Austrália, Canadá, Brasil, Venezuela ou Oriente Médio. A Austrália tem hoje os menores custos médios de produção de metal primário no mundo.

A grande maioria das linhas de cubas a serem construídas nos próximos anos no Brasil, Venezuela, Austrália e Oriente Médio consumirá gás natural, combustível barato e abundante nessas regiões.

Hoje o alumínio tem larga utilização nos setores de embalagens, farmacêutico, aeroespacial, contêineres para transportes e automobilístico. A gradual fragmentação do controle da produção é um fato, e às grandes empresas produtoras capitalizadas restará buscar nichos de mercado onde haja grande rentabilidade.

O Brasil hoje é um país consolidado entre os maiores produtores da cadeia bauxita-alumina-alumínio. A maior parte da bauxita produzida deverá ser consumida pelas refinarias brasileiras. Muito embora a Alunorte seja um grande consumidor da bauxita da MRN, no futuro pode-se contar com uma refinaria instalada nas proximidades da mina uma vez que já foi feito todo o

esforço para se aumentar a capacidade de escoamento da bauxita produzida pelo porto de Trombetas.

A produção de alumínio na região norte segue um modelo exportador e assim continuará. Futuras expansões de capacidade só ocorrerão quando os produtores contarem com geração própria de energia. No sudeste a produção de metal primário se beneficia da proximidade com o maior mercado consumidor, mas não conta com custos totais muito competitivos. Excessão seja feita a CBA que possui geração própria de 50% da energia consumida além de produzir todos os insumos necessários a produção de alumínio.

O grande aumento no número de produtores primários independentes irá fortalecer o mercado livre de alumina, o qual já se beneficiou das importações do leste europeu e CIS, regiões que apresentam déficit na produção de óxido. Por sua vez, a Austrália continuará a ser o maior exportador de óxido tanto em transações inter-empresas como para o mercado livre. O maior exportador mundial de alumina continua sendo a Alcoa of Austrália, que se beneficia de operações com ganho de escala e totalmente integradas de mineração de bauxita e refino de alumina. Hydro Aluminium, Alumax, VAW, Comalco, Pechiney e Clarendon Alumina continuarão a ser os maiores compradores desse mercado.

- **O USO DA PL NA ANÁLISE DA OFERTA DE ALUMÍNIO PRIMÁRIO**

A PL mostrou ser uma boa técnica para otimização de custos na indústria de alumínio, devido principalmente a sua versatilidade enquanto método de otimização e as várias possibilidades de aplicação nas diversas etapas da produção de alumínio.

Ficou claro que a aplicação dos diagramas de fluxos de redes, tanto à partir de uma ótica atomística, utilizando-os na otimização de um determinado processo, como sob um ponto de vista macro, desmembrando um problema grande e complexo em diversos outros menores interligados, depende unicamente de quem implanta o programa de otimização.

O modelo desenvolvido, embora simples, demonstra a sua potencialidade de utilização no próprio local de trabalho, bastando para tal que o operador disponha de algum conhecimento em informática. A exemplo do LINDO outros pacotes computacionais disponíveis poderiam ser utilizados para otimização de custos ou processos. Outra vantagem que foi ilustrada é o forte apelo gráfico dessa técnica e a simplicidade dos diagramas montados nos modelos.

No que diz respeito aos resultados, o modelo deixou claro a sua flexibilidade e facilidade de interpretação. Estes podem ainda ser alterados de maneira simples, bastando para tal a inserção ou retirada de alguma restrição e/ou variável. A possibilidade de análise do problema real a partir da comparação entre os resultados obtidos pelo modelo e os resultados práticos pode ser feita de maneira imediata sem a necessidade de muito dispêndio de tempo na interpretação das saídas fornecidas pelo computador.

Ficou patente que com modelos deste tipo há a possibilidade de maior liberdade na tomada de decisões em nível de chão-de-fábrica uma vez que qualquer que seja o processo otimizado esta técnica permite rápida modificação dos parâmetros utilizados.

Enfim, a utilização da PL para a otimização da cadeia produtiva bauxita-alumina-alumínio mostrou-se útil e conveniente tanto para melhoria de processos dentro de uma única mina, refinaria ou redução, assim como para a otimização de toda uma cadeia produtiva de uma empresa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL. Anuário Estatístico 1975 -1994.

ADAMS, Robin G. Restructuring of the aluminium industry. **Natural Resources Forum**, New York, v. 14, n. 2, p. 90-96, May. 1990.

ALCAN. **Alcan Aluminium Limitée Rapport Annuel 1989**. Montreal, Alcan. 1990. 37p.

ALCAN. **Alcan Aluminium Limited Annual Report 1991**, Montreal, Alcan. 1992. 37p.

ALCAN. **Alcan Aluminium Limited Annual Report 1992**, Montreal, Alcan. 1993. 44p.

ALCAN AUSTRALIA LIMITED. **Alcan Australia Limited Annual Report 1993**, [s.l.], 1994. 32p.

ALCAN RECYCLING CANADA. Fact sheet - aluminium can recycling. 1994. 4p.

ALCOA. **Aluminum Company of America**. On form 10-K, Washington. 1994. 31p.

ALCOA. **Alcoa 1992 Annual Report**. Pittsburgh, Alcoa. 1993. 52p.

ALCOA. **Alcoa 1993 Annual Report**. Pittsburgh, Alcoa. 1994. 36p.

ALCOA OF AUSTRALIA. **Alcoa of Australia 1993 Annual Report**, Melbourne, Alcoa of Australia. 1994. 32p.

ALCOA OF AUSTRALIA. **Alcoa of Australia 1994 Annual Report**, Melbourne, Alcoa of Australia. 1995. 32p.

ALUMAX. **Alumax 1993 Annual Report**, Norcross, Alumax. 1994. 50p.

ALUMAX. **Alumax 1994 Annual Report 1994**, Norcross, Alumax. 1995. 60p.

ALUMAX. **Alumax Inc.**, On form 10-K, Washington. 1995. 53p.

ALUSUISSE. **A-L Alusuisse-Lonza Holding Ltd Annual Report 1993**, Zurich, Alusuisse. 1994. 86p.

- ALUSUISSE. **A-L Alusuisse-Lonza Holding Ltd Annual Report 1994**, Zurich, Alusuisse. 1995. 80p.
- AUSTRASWISS. **Swiss Aluminium Australia Limited. Annual Report 1994**, [s.l.]. 1995. 22p.
- BAZARAA, Mokhtar S., JARVIS, John J., SHERALI, Hanif D. **Linear programming and network flows**. 2. ed. Singapura: John Wiley & Sons, 1990. 684p.
- BAUXITA... **Brasil Mineral**, São Paulo, n. 131, p. 32-33, jun. 1995.
- BILLITON. **Billiton in brief 1992**. Leidshendam, Billiton. 8p. 1993.
- BIRD, A. ~~Changing patterns in aluminium production costs: history and prospects. **Natural Resources Forum**, New York, v. 17, n. 2, p. 151-155, May. 1993.~~
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional da Produção Mineral. **Sumário Mineral**. Brasília: DNPM, 1970/1995.
- BRASIL. **Sumário Mineral Belém**. Governo do Estado do Pará. Secretaria de Estado de Indústria, Comércio e Mineração/ Diretoria da área de mineração, 1993. 37 p.
- BRAZ, E. Comparative advantage of Brazil as an aluminum exporter. In: **PROCEEDINGS OF THE FIRST INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MINING AND DEVELOPMENT**, v.1, p.115-121, 1995.
- _____. Brazil: The transition to an export industry. In: Peck, M. 1988. p. 148-174.
- BREGALDA, P.F., OLIVEIRA, A.A.F., BORNSTEIN, C.T. **Introdução a programação linear**. 3. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1988. 329p.
- BROWN, M; McKERN, B. Aluminium. In: **Aluminium, copper and steel in developing countries**. OCDE/OECP. Paris, 1987.
- CHEVALIER, P. Aluminium. Québec: NRCan, 1995. 23p. (Informação via INTERNET).
- CLARK, Gerald. Bauxite and alumina: trends and prospects. **Natural Resources Forum**, New York, v. 15, n. 4, p. 276-281, nov. 1991.
- CLARK, M, 1995. [Informação pessoal].
- COMALCO. **Comalco Limited 1992 Report to Shareholdes**. Melbourne, Comalco. 1993. 74p.

- COMALCO. **Comalco Limited 1993 Report to Shareholders**. Melbourne, Comalco. 1994. 85p.
- COMALCO. **Comalco 1994 Annual Report**. Melbourne, Comalco. 1995. 85p.
- COMPETITIVE strategy in aluminium. London: Commodities Research Unit, 1989. 23p.
- CVRD, **Companhia Vale do Rio Doce. Relatório Anual 1993**. Rio de Janeiro. 1994. 40p.
- CVRD, **Companhia Vale do Rio Doce. Relatório Anual 1994**. Rio de Janeiro. 1995. 65p.
-
- DANTZIG, G.B. Programming in linear structure, *Econometrica*, 17, p.73-77, 1949.
- DORFMAN, R., SAMUELSON, P., SOLOW, R. **Linear programming and economic analysis**. New York, NY: McGraw-Hill, 1950. p.
- DUBAL, **Dubai Aluminium Company Limited. Annual Review 1993**. Dubai. 1994. 68p.
- ELKEM, **Elkem a/s 1993. Annual Report**. Oslo, Elkem. 1994. 53p.
- ELKEM, **Elkem a/s 1994. Annual Report**. Oslo, Elkem. 1995. 52p.
- ELKEM ALUMINIUM ANS, **Elkem Aluminium ANS 1994**. Oslo. 1995. 26p.
- _____. **Annual Report**. 1992. Oslo, Elkem. 1994. 52p.
- FEDERGRUEN, A., PRASTACOS, G., ZIPKIN, P. An allocation and distribution model for perishable products. **Operations Research**, Baltimore, v. 34, n. 1, p. 75-82, Jan/Feb. 1986.
- FRIGUIA. Montreal, 1991. 18p. (Catálogo da empresa).
- GENCOR, **Gencor Limited. Annual Report 1994**. Johannesburg, Gencor. 1995. 91p.
- GRESEA. Geopolitics of aluminium - the strategy of the actors. **Raw Materials Report**, v. 3, n. 4, p. 23-29, Oct. 1985.
- GOERN, H. Presentation on Alcoa world alumina & chemicals. In: Western Mining Corporation. 1994-95 annual results presentation. Melbourne: WMC, 1995. p. 39-48.

GOVE, Gove Aluminium Limited. **Annual Report 1995**. Sydney. 1995. 26p.

GOVE, Gove Aluminium Finance Limited. **Annual Report 1995**. Sydney, 1995. 27p.

HYDRO Aluminium. Facts and figures. Oslo: Hydro Media, 31p. 1995.

INVESTIMENTO aumenta capacidade e energia. **Brasil Mineral**, São Paulo, n. 83, p. 28-38, nov. 1990.

IPAI Annual Report 19985-1995. London.

KAISER. Kaiser Aluminum Corporation. **Annual Report 1993**. Houston, Kaiser. 64p. 1994.

KAISER. Kaiser Aluminum Corporation. **Annual Report 1994**. Houston, Kaiser, 1994. 64p.

KAISER. Kaiser Aluminum Corporation. **Annual Report 1993**. On Form 10-K, Washington, 1994. 35p.

KAISER. Kaiser Aluminum Corporation. **Annual Report 1994**. On Form 10-K, Washington, 1995. 35p.

KIRKWOOD, C.W. Does operations research address strategy?. **Operations Research**, Baltimore, v. 38, n. 5, p. 747-751, Sept./Oct. 1990.

KUSAKA, S. S. The variable industrial power rate in the Pacific Northwest Aluminum Industry. In: **EXPLORING INNOVATIVE ELECTRICITY RATES: INDEXED(COMMODITY PRICE BASED) RATES**. Toronto: Association of Major Power Consumers of Ontario, 1995. p. 1-22.

LABYS, W. C., FIELD, F. R., CLARK, J. Mineral Models. In: **Economics of the mineral industries**. 4. ed. AIME, p. 337-379, 1985.

LAN, B., FULLER, J.D. A primal-dual decomposition method for two stage linear programs. Working Paper, Department of Management Sciences, University of Waterloo. 28p. Waterloo. 1995.

_____. A prima-dual nested decomposition algorithm for multi-stage linear programs. Working Paper, Department of Management Sciences, University of Waterloo. 44p. Waterloo. 1995.

LITTLE, J.D. Operations research in industry: new opportunities in a changing world. **Operations Research**, Baltimore, v. 39, n. 4, p. 531-542, Jul/Aug. 1991.

MACHADO, R.C. **Apontamentos da história do alumínio primário no Brasil**. Ouro Preto, Fundação Gorceix, 1985. 564p.

_____. **A indústria do alumínio neste final de século**. Ouro Preto, Fundação Gorceix, 1988. 464p.

MARGUERON, C. Aplicações da pesquisa operacional no campo da mineração e metalurgia. In: I CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE MINERALURGIA, 1970, São Paulo, Brasil, 25p.

METALLSTATISTIK. 1959-1990. Frankfurt, The Metallgesellschaft AG.

MRN, Mineração Rio do Norte s.a. **Relatório Anual 1993**, Rio de Janeiro, 1994. 17p.

MORRISON, D. E. Bauxite supply in a changing market. **Raw Materials Report**, London v.9, n. 1, p. 2-8, 1992.

NABALCO. Sydney: Nabalco, 1994. (Catálogo da empresa).

NABALCO. Sydney: Nabalco, 1995. (Catálogo da empresa).

NAPPI, C. Aluminium. In: **Competitiveness in metals - the impact of public policy**. Mining Journal Books, p. 212-241, 1992.

NAPPI, C, 1995. [Informação pessoal].

NORSK HYDRO. **Norsk Hydro Annual Report 1992**, Oslo, Hydro Media. 1993. 74p.

NORSK HYDRO. **Norsk Hydro Annual Report 1994**, Oslo, Hydro Media. 1994. 74p.

NORSK HYDRO. **Norsk Hydro Annual Report 1994**, Oslo, Hydro Media. 1995. 74p.

NORSK HYDRO. **Norsk Hydro Annual Report 1994**, On Form 20-F, Oslo, Hydro Media. 1995. 101p.

NORANDA. **Noranda Annual Report 1994**, Toronto, Noranda. 1995. 68p.

NORANDA. **Noranda Inc. Annual Information Form 1994**, Toronto, Noranda. 1995. 87p.

- ORMET Corporation. Ohio: ORMET, 1994. (Catálogo da empresa).
- PECHINEY. **Pechiney international 1993 Annual Report**. Boulogne, Pechiney. 1994. 43p.
- PECK, M. 1995. [Inf. pessoal].
- PECK, M. J. **The world aluminum industry in a changing energy era**. Washington. John Hopkins University Press: 1988. 268p.
- PROJECT SURVEY '80-'95. **Engineering & Mining Journal**, London, n. 1, p. 75-97, Jan. 1980/1995.
- PUCCINI, Abelardo de Lima. **Introdução à Programação Linear**. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1978. 252p.
- QUEENSLAND. Melbourne: Queensland Alumina, 1994. 6p. [Catálogo de empresa],
- RADETZKI, M. Long-run price prospects for aluminium and copper. **Natural Resources Forum**, New York, v. 7, n.1, p. 23-36, Jan. 1983.
- REYNOLDS. **Reynolds Metals Company. Annual Report 1993**. Richmond, Reynolds. 1994. 32p.
- REYNOLDS. **Reynolds Metals Company. Annual Report 1994**. Richmond, Reynolds. 1995. 32p.
- REYNOLDS. **Reynolds Metals Company. Annual Report 1994**. On Form 10-K, Richmond. 1995. 64.
- ROSKILL. **The Economics of Bauxite & Alumina 1993**. 2. ed. London: Roskill Information Services, 1993. 276p.
- SÁ, P de. **Industrie miniere mondiale: leçons d'une crise**. 238p. Septembre. 1992.
- _____. From oligopoly to competition: the changing aluminium industry. **Materials and Society**, v. 15, n. 2, p. 149-175, mês. 1991.
- SCHRAGE, L. **Users manual for LINDO**. California: Scientific Press, 1990. 370p.
- SIMPSON, R. 1995. [Inf. pessoal].
- SUSLICK, Saul B. Quantificação da demanda mineral - uma abordagem preliminar. **Geociências**, São Paulo, (n. esp.) p. 175-184, 1994.

- THE WORLD BANK - Price prospects for major primary commodities, 1990-2005. v.1. Washington, World Bank Ed. 1992. 123p.
- THOMAS, R.J. The role of the IBA in the bauxite/alumina/aluminium industry. In: BAUXITE SYMPOSIUM, 1984, Los Angeles. *Proceedings...* p. 870-881.
- THOMPSON, F. Vicunha e Vale estudam união para fazer latas. *Jornal do Brasil*, Rio de Janeiro, 26 jan. 1995. Economia & Finanças. p.13.
- UNCTAD - United Nations Conference on Trade and Development. *Recent and Planned Changes in Production Capacity for Bauxite, Alumina, and Aluminium*, 1995. Geneva, [s. ed.]. 1995. 41p.
- UNCTAD - United Nations Conference of Trade and Development - Standing Committee on Commodities - Third Ad Hoc Review on Bauxite - Geneva, Mai. 1994.
- UNICAMP. 1995. Monitoração da Disponibilidade Primária de Alumínio. Campinas, dez. 1995.
- VAW. VAW aluminium AG. *Annual Report 1993*, Bonn, VAW. 1994. 63p.
- VAW. VAW aluminium AG. *Annual Report 1994*, Bonn, VAW. 1995. 56p.
- VEIGA, M.A.P.G.V, SUSLICK, S. Proposta de um modelo de fluxo de rede como instrumento de otimização da disponibilidade de alumínio. In: VI SIMPÓSIO DE QUANTIFICAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS, 1995, Rio Claro. *Boletim de Resumos Expandidos*. UNESP - Rio Claro, SP, 1995. 240p. p. 213-216.
- VERLAG. Alumina refineries of the world. Düsseldorf: Aluminium Verlag GmbH, 1993. v. 3, ?p.
- _____. Primary aluminium smelters and producers of the world. Düsseldorf: Aluminium Verlag GmbH, 1993. v. 2, ??p.
- _____. Alumina refineries of the world. Düsseldorf: Aluminium Verlag GmbH, 1993. v. 1, ?p.
- _____. Alumina refineries of the world. Düsseldorf: Aluminium Verlag GmbH, 1993. ?p.
- WEISS, M. G. J. **A competitividade da indústria brasileira do alumínio: Avaliação e perspectivas**. Rio de Janeiro. CETEM/CNPq, 1993. 25p.
- WESTERN Mining Corp. Prospectus: 1994. Melbourne: WMC, 1994. 64p.

WILBURN, D.R., WAGNER, L.A. **Aluminum availability and supply: a minerals availability appraisal.** United States Bureau of Mines IC No. 9371. 1993.140p.

WINSTON, W. L. **Operations research: applications and algorithms.** 3. ed. International Thomson Publishing, Belmont, 1993. 1366 p.

WMC. Corporate Profile. Melbourne: WMC, 1991. (Catálogo da empresa).

WMC. **WMC 1991 Annual Report to Shareholders,** Melbourne, WMC. 1992. 72p.

WMC. **WMC 1993 Annual Report to Shareholders,** Melbourne, WMC. 1994. 80p.

WMC. **WMC 1994 Annual Report to Shareholders,** Melbourne, WMC. 1995. 84p.

World Bureau of Metal Statistics. 1980-1995. London.

WORSLEY Bauxite/alumina operation. Bunbury: Worsley, 1995. (Catálogo da empresa).

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice II.1
Principais Minas de bauxita do Mundo

Mina	Proprietário	Capacidade (000t/ano)	Start-up
Weipa	Comalco Aluminium Ltd.(100%)	17.144	1957
Trombetas	MRN(100%)	12.121	1974
Sangaredi	CBG(100%)	10.000	1973
Huntly del Park	Alcoa of Australia Ltd.(100%)	9.500	1963
Willowdale	Alcoa of Australia Ltd.(100%)	8.000	1965
Gove	Nabalco Pty.(100%)	6.500	1966
Jarradale	Alcoa of Australia Ltd.(100%)	6.000	1963
Worsley	Worsley Alumina Pty.(100%)	6.000	1960
Dscovery Bay	KJBC(49%); Gov. Jamaica(51%)	4.500	1980
Alpart	Alpart(100%)	3.500	1969
Lydford	JBM Ltd.(100%)	3.300	1970
Kindia	Office des Bauxite de Kindia(100%)	3.000	1974
Los Pijiguaos	CVG(100%)	3.000	1987
Linden	BIDCO	2.800	1917
Onverdacht	N.V. Billiton(76%); Suralco(24%)	2.500	1942
Breadnut Valley	AMJ(30%); Clarendon Alumina(50%);WMC(20%)	2.500	1959
Moengo	Suralco(100%)	2.300	1922
Fria	Friguia Joint Venture Co.(100%)	2.000	1960
Kirkvine	Alcan Jamaica Ltd.(93%); JBM Ltd.(7%)	1.650	1952
Moyamba	Sieromco(100%)	1.400	1965
Kwakwani	BIDCO(100%)	1.400	1988
Bintan Island	PT Aneka Tambang(100%)	1.350	1935
Ewarton	Alcan Jamaixa Ltd.(93%); JBM Ltd.(7%)	900	1959
Delphes e Distomon	Aluminium de Gréce(100%)	800	1970
Cataguazes CBA	CBA(100%)	500	1990
Ouro Preto	Alcan Alumínio do Brasil SA(100%)	500	1940
Poços de Caldas-Alcoa	Alcoa Alumínio SA(100%)	400	1936
Cataguazes Alcan	Alcan Alumínio do Brasil SA(100%)	400	1984
Mitchell Plateau	Mitchell Plateau Bauxte Co.(100%)	6.000	ND.
Fonte: Empresas produtoras; Roskill 1993;			

Apêndice II.2
Principais refinarias de alumina do mundo

Refinaria	Proprietário	Capacidade (000 t/ano)	Start-up
St. Croix	WMC(100%)	635	ND
Stade	Aluminium Oxide Stade GmbH(100%)	600	1973
Corpus Cristi	Reynolds(100%)	1.700	1953
Sherwin	Reynolds(100%)	1.700	1954
Worsley	Worsley Alumina Ltd.(100%)	1.500	1984
Gardanne	Pechiney(100%)	725	1893
Burnside	Ormet Primary Aluminum Co.(100%)	600	1958
Nain	Alpart(100%)	1.450	1969
Gladstone	Queensland Alumina(100%)	3.325	1967
Gramercy	Kaiser(100%)	1.000	1959
Sorocaba	CBA(100%)	440	1954
Interalumina	Interalumina(100%)	1.500	1983
Linden	Guyana Mining Enterprise Ltd.(100%)	350	1961
Fria	Friguia(49%); Frialco(51%)	700	1960
Belgaum	Indal(100%)	217	1968
Muri	Indal(100%)	75	1958
Gove	Nabalco Pty.(100%)	1.600	1972
Alunorte	CVRD(57,5%); MRN(24,6%); CBA(5,7%); NAAC(12,2%)	1.100	1995
Bergheim	Martinswerk(100%)	350	1914
Porto Vesme	Eurallumina S.A.(100%)	800	1973
Distomon	Aluminium de Grèce(100%)	600	1966
Kwinana	Alcoa of Australia Ltd.(100%)	1.700	1963
Paranam	Suralco(55%); Billiton(45%)	1.600	1965
Point Comfort	Alcoa of Australia Ltd.(60%); WMC(40%)	1.900	1959
Clarendon	Jamalco(50%); Gov. da Jamaica(50%)	825	1972
Poços de Caldas			
Alcoa	Alcoa Alumínio SA(75%); Camargo Correa(25%)	270	1972
Pinjarra	Alcoa of Australia Ltd.(100%)	3.000	1972
Wagerup	Alcoa of Australia Ltd.(100%)	1.700	1984
Alumar	Consórcio Alumar(100%)	1.000	1984
Shimizu	NLM Co.(100%)	430	1941
Vaudreuil	Alcan Aluminium Ltd.(100%)	1.175	1942
Ewarton	Alcan Jamaica Co.(100%)	450	1953
Saramenha	Alcan Alumínio SA(100%)	150	1945
Jonquièere	Alcan Aluminium Ltd.(100%)	1.250	1936
Kirkvine	Alcan Jamaica Co.(93%); Gov. Jamaica(7%)	550	1959
Aughinish	Aughinish Alumina Ltd.(65%); Billiton Metals(35%)	1.100	1983
Fonte: Empresas produtoras; Roskill 1993.			

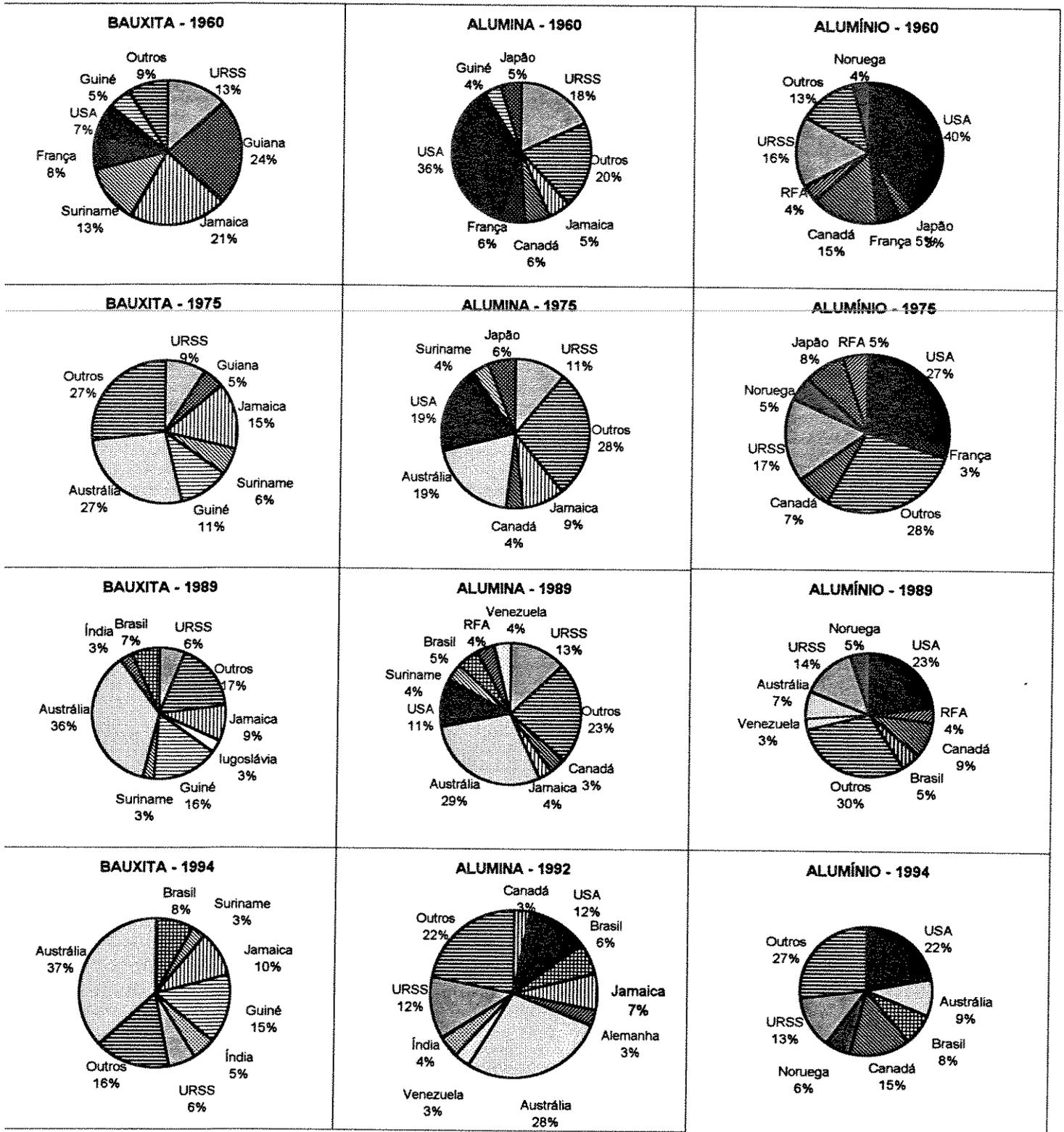
Apêndice II.3
Principais reduções de alumínio do mundo

Fundição	Proprietário	Capacidade (000 t/ano)	Start-up
Albrás	Consórcio Albrás(100%)	345	1986
Alcoa	Alcoa(100%)	205	1914
Aluar	Gov. Argentina(52,1%); Investidores privados(47,1%)	171	1974
Alumar	Consórcio Alumar(100%)	328	1984
Alupuram	Indal(100%)	20	1943
Anglesey	Anglesey Aluminium Ltd.(100%)	112	1971
Aratu	Alcan Alumínio SA(100%)	58	1972
Ardal	Hydro Aluminium(100%)	185	1910
Arvida	Alcan Aluminium Ltd.(100%)	232	1926
Auzat	Pechiney(100%)	44	1914
Badin	Alcoa(100%)	115	1916
Baie Comeau	Canadian Reynolds(100%)	400	1957
Beauharnois	Alcan Aluminium Ltd.(100%)	48	1943
Bécancour	Aluminière de Bécancour Incorporee(100%)	360	1986
Bell Bay	Comalco Ltd.(100%)	120	1955
Belgaum	Indal(100%)	73	1969
Boyne Island	Boyne Smelters Ltd.(100%)	230	1982
Chippis	Alusuisse(100%)	12	1908
Columbia Falls	Columbia Falls(100%)	168	1955
Deschambault	Aluminerie Luralco Inc.(100%)	215	1993
Distomon	Aluminium de Grèce(100%)	153	1969
Dubal	Dubai Aluminium Co. Ltd.(100%)	245	1979
Dunkerque	Pechiney(100%)	215	1992
Essen	Leichtmetall GmbH(100%)	132	1971
Ferndale	Intalco Aluminum Corp.(100%)	272	1966
Frederick	Eastalco Aluminum Co.(100%)	174	1970
Goldendale	Columbia Aluminum Corp.(100%)	168	1958
Grand Baie	Alcan Aluminium Ltd.(100%)	180	1980
Graveline	Aluminium Dunkerque SA(100%)	215	1991
Hamburg	Hamburguer Aluminium Werke GmbH(100%)	110	1973
Hannibal	Ormet Primary Aluminum Corp.(100%)	254	1957
Hawesville	National Southwire Aluminum Co.(100%)	185	1969
Hirakud	Indal(100%)	24	1959
Hoyanger	Hydro Aluminium(100%)	70	1981
Isal	Isal(100%)	88	1960
Isle Maligne	Alcan Aluminium Ltd.(100%)	73	1943
Karmoy	Hydro Aluminium(100%)	220	1967
Kinlochleven	British Alcan(100%)	11	1909
Kitimat	Alcan Aluminium Ltd.(100%)	272	1954
Kuala Tanjung	PT Aneka Tambang(100%)	225	1982
Kurri-Kurri	Alcan Australia Ltd.(100%)	150	1967
Lannemezan	Pechiney(100%)	44	1978
Laterrière	Alcan Aluminium Ltd.(100%)	204	1989
Lista	Elkem Aluminium a.s.(100%)	81	1971
Lochaber	British Alcan(100%)	38	1929
Longview	Reynolds Metals Co.(100%)	204	1941
Lynemouth	British Alcan(100%)	130	1972
Mairinque	CBA(100%)	215	1955
Massena(Alcoa)	Alcoa(100%)	125	1903
Massena(Reynolds)	Alcoa(100%)	123	1959
Mead	Kaiser(100%)	200	1942
Mosjoen	Elkem Aluminium a.s.(100%)	120	1958
Fonte: Empresas Produtoras; Roskill 1993.			

Apêndice II.3
Principais reduções de alumínio do mundo

Fundição	Proprietário	Capacidade (000 t/ano)	Start-up
Mount Holly	Alumax of South Carolina Inc.(100%)	182	1980
New Madrid	Noranda Aluminum(100%)	218	1971
Noguères	Pechiney(100%)	44	1960
Norf	VAW AG(100%)	210	1962
Ouro Preto	Alcan Alumínio SA(100%)	51	1945
Paranam	Suralco(100%)	60	1968
Poços de Caldas	Alcoa Alumínio SA(100%)	90	1970
Point Henry	Alcoa of Australia(100%)	180	1963
Portland	Aluovic(100%)	320	1986
Ravenswood	Ravenswood Aluminum Corp.(100%)	165	1957
Richards Bay I	Alusaf Pty. Ltd.(100%)	170	1971
Richards Bay II	Alusaf Pty. Ltd.(100%)	500	1995
Riouperoux	Pechiney(100%)	31	1926
Rockdale	Alcoa(100%)	315	1952
Santa Cruz	Valesul Alumínio SA(100%)	92	1982
Sebree	Alcan Aluminium Ltd.(100%)	180	1973
Sept-Iles	Aluminière Alouette Inc.(100%)	215	1992
Shawinigan	Alcan Aluminium Ltd.(100%)	84	1900
Sor-AI	Soral(100%)	100	1965
St. Jean de Maurienne	Pechiney(100%)	122	1979
Stade	VAW AG(100%)	70	1973
Steg	Alusuisse(100%)	48	1962
Straumsvik	Icelandic Aluminium Co. Ltd.(100%)	90	1969
Sundsvall	Gränges Aluminium Metal BV(100%)	100	1973
Sunddal	Hydro Aluminium a.s(100%)	140	1954
Tacoma	Kaiser(100%)	73	1942
Tema	Valco(100%)	200	1967
Tiwai Point	Comalco New Zealand(79,36%): Sumitomo(20,64%)	259	1971
Töging	VAW AG(100%)	90	1980
Tomago	Tomago Aluminium Co. Pty. Ltd.(100%)	380	1983
Troutdale	Reynolds Metals Co.(100%)	121	1946
Vancouver	Vanalco Inc.(100%)	115	1940
Vlissingen	Pechiney Netherland NV(100%)	175	1970
Warrick	Alcoa(100%)	220	1952
Wenatchee	Alcoa(100%)	73	1969
Fonte: Empresas Produtoras; Roskill 1993.			

Apêndice II.4
Mudanças na localização dos centros produtores de bauxita/alumina/alumínio



nte: World Bureau of Metal Statistics(versos); UNCTAD, 1994; Nappi, 1994;

Produção^A e custos unitários^B de bauxita.

		Bauxita de grau metalúrgico											
País	Prod. ^I 1988	Custos Op.				Prod. e custos(US\$1994)			0%DCFROR		15%DCFROR		
		Trab.	Insumos	Energia	Overhead	Byproduct credit	Custo Liq. ^C	Recup. do capital	Royalties	Custo Total	Royalties ^D	Retorno do investimento	Custo total ^E
Austrália	36192	1,45	1,45	0,43	0,55	-0,30	3,93	0,78	0,76	5,47	2,32	1,79	8,82
Brasil	7728	1,30	1,30	2,09	0,75	0	5,72	2,56	1,19	9,47	1,97	3,69	13,94
França	878	3,03	5,04	2,01	1,52	0	11,59	1,82	0,18	13,58	0,44	0,91	14,75
Grécia	2400	5,17	3,18	1,86	1,53	0	11,74	3,05	0,22	15,01	1,78	2,00	18,57
Guiné	15600	1,14	2,41	1,56	0,77	-0,70	5,18	4,56	17,59 ^F	27,33	17,97 ^E	0,84	28,54
Índia	3961	1,15	3,91	0,22	0,8	0	6,08	0,65	0,23	6,96	1,75	1,21	9,69
Jamaica	7408	1,54	3,04	0,86	0,81	0	6,25	0,72	16,22 ^F	23,19	16,92 ^E	1,38	25,26
Média ponderada ^G Oper. não produtoras ^I	Nap	1,78	2,35	1,12	0,79	-0,64	5,39	1,89	0,64 ^H	7,92	2,21	1,85	11,34
Média ponderada ^G Todas as oper.	Nap	2,62	3,21	3,71	1,43	0	10,97	2,12	0,99	14,08	8,26	13,13	34,49
Média ponderada ^G	Nap	1,89	2,45	1,45	0,87	-0,56	6,11	1,92	0,68	8,7	2,98	3,3	14,31

Fonte: Wilburn et. al., 1993(Adaptado).

NOTAS:

- A. Os valores de produção refletem os totais por países.
- B. Os custos refletem a média ponderada das instalações incluídas.
- C. O somatório dos custos pode não igualar este valor devido ao arredondamento.
- D. As taxas para um desconto de 15% são maiores dada a maior receita necessária para este retorno do investimento.
- E. O custo total(15%)=custo total(0%) + [taxas(15%) - taxas(0%)] + retorno do investimento.
- F. Foi considerado o "levy" cobrado sobre o material processado nese país.
- G. Excluem os "levies" cobrados por Guiné e Jamaica.
- H. Instalações não produtoras na Austrália, Brasil, Ghana, Índia, e Jamaica foram incluídas.
- I. Produção em 1000 t.

Produção^A e custos^B unitários de alumina

		Alumina metalúrgica												
País	Prod. ^C	Custos Op.			Byproduct credit	Custo Liq. ^D	Recup. do capital	0% DCFROR		15% DCFROR				
		Trab.	Insumos	Energia				Overhead	Taxas	Custo Total	Taxas	Custo Total	Taxas	Retorno do Investimento
	1988													
Austrália	10518	13,67	30,23	44,26	11,80	104,35	7,36	4,19	115,90	13,97	11,80	137,5		
Brasil	1300	13,15	74,29	43,56	13,47	152,30	26,78	4,60	183,68	35,07	52,70	266,8		
Alemanha	1145	51,46	67,43	62,06	20,89	225,45	18,68	2,31	246,44	32,64	26,52	303,3		
Índia	1188	18,84	48,71	93,20	20,84	181,10	12,75	1,09	195,65	18,49	17,39	230,4		
Jamaica	1522	19,70	82,39	30,90	14,15	147,13	9,15	0,51	156,79	7,59	14,99	178,9		
E.U.A.	4575	26,49	69,54	17,57	10,06	138,19	7,72	2,37	148,29	5,86	8,60	160,4		
Média ponderada Oper. não produtoras ^G	Nap	23,10	59,15	42,62	14,47	146,60	11,36	3,09	161,05	17,17	18,79	193,9		
Média ponderada Todas as oper.	Nap	29,35	51,40	58,00	16,73	155,48	32,45	5,32	193,25	89,88	124,40	402,2		
Média ponderada	Nap	23,52	58,55	43,65	14,61	147,15	12,67	3,23	163,04	21,67	25,33	206,8		

Fonte: Wilburn et. al., 1993(adaptado).

A Valores da produção refletem os totais dos países.

B Os custos refletem a média ponderada para as instalações incluídas.

C Produção em 1000 t.

D Custos podem não coincidir com o somatório dos valores em função do arredondamento.

E As taxas para um desconto de 15% são maiores dada a maior receita necessária para este retorno do investimento.

F Custo total(15%) = custo total(0%) + [taxas(15%) - taxas(0%)] + retorno do investimento.

G Instalações não produtoras na Grécia e no Brasil foram incluídas.

Produção^A e custos^B de alumínio primário

		Alumínio primário												
Países	Prod. ^C 1988	Custos Op.				Prod. e custos(US\$1994)			0%DCFROR			15%DCFROR		
		Trab.	Alumina	Energia	Overhead	Transporte fundição	Custo líquido ^D	Recuperação do capital	Taxas	Custo total	Taxas ^E	Retorno do investimento	Custo total ^F	
Austrália	1150	7,10	19,77	10,48	3,55	0,68	41,57	2,70	0,25	44,53	4,39	4,99	53,66	
Brasil	874	4,23	23,91	15,21	4,14	0,34	47,83	3,72	0,34	51,88	1,69	7,52	60,76	
Canadá	1535	9,46	21,80	4,56	3,30	0,51	39,63	2,79	0,42	42,84	7,35	4,99	54,76	
França	328	11,32	28,90	17,33	5,92	0,34	63,80	3,80	0,25	67,85	4,23	5,16	76,98	
Alemanha	744	15,13	27,97	21,46	7,10	0,93	72,59	3,13	0,34	76,05	6,00	4,90	86,61	
Índia	375	12,38	24,76	27,97	7,10	0,00	72,16	2,03	0,09	74,28	3,04	3,38	80,61	
Itália	222	15,81	28,73	17,91	6,76	0,25	69,50	3,63	0,34	73,43	3,97	4,65	81,72	
Noruega	864	14,79	25,69	9,55	5,41	1,01	56,45	2,62	0,17	59,24	4,73	4,48	68,28	
Espanha	323	8,70	32,11	21,72	6,42	0,09	69,04	3,04	0,09	72,16	1,86	4,39	78,33	
Suíça	72	15,72	21,80	12,68	6,25	1,86	58,31	5,24	0,25	63,80	2,45	6,25	72,25	
Reino Unido	300	11,32	31,43	18,34	6,34	0,76	68,20	2,70	0,17	71,07	2,45	4,48	77,83	
E.U.A.	3944	10,82	18,17	17,49	5,49	0,59	52,56	1,44	0,59	54,59	2,11	3,13	59,24	
MÉDIA PONDERADA	Nap	9,46	21,46	13,94	4,73	0,59	50,19	2,54	0,51	53,24	4,90	4,73	61,85	
Oper. não produtoras ^G	Nap	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Média ponderada	Nap	8,37	24,17	8,79	3,97	0,34	45,63	0,17	2,70	48,50	26,03	22,56	94,39	
Todas as oper.	Nap	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Média ponderada	Nap	9,38	21,63	13,52	4,73	0,59	49,86	2,37	0,68	52,90	6,00	7,18	65,40	

Fonte: Wilburn et. al., 1993.

A A produção reflete o total por países.

B Os custos refletem a média ponderada das instalações pesquisadas.

C Produção expressa em 1000 t.

D Somatório dos custos pode não igualar este valor devido ao arredondamento.

E As taxas para um desconto de 15% são maiores dada a maior receita necessária para este retorno do investimento.

F Custo total(15%) = custo total(0%) + [taxas(15%) - taxas(0%)] + retorno do investimento.

G Instalações não produtoras na Austrália, Canadá, França, Qatar, Suriname, e Venezuela, foram incluídas.

Apêndice II.8

Produção de metal primário por empresas. Unidades: 1000 t

Ano	Albrás	Alcan	Alcoa	Aluvale	Billiton	CBA	Valesul	Total
1950	***	***	***	***	***	***	***	***
1951	***	0,4	***	***	***	***	***	0,4
1952	***	1,1	***	***	***	***	***	1,1
1953	***	1,2	***	***	***	***	***	1,2
1954	***	1,5	***	***	***	***	***	1,5
1955	***	1,7	***	***	***	1,0	***	2,7
1956	***	1,7	***	***	***	3,8	***	5,5
1957	***	2,1	***	***	***	4,7	***	6,8
1958	***	2,7	***	***	***	6,7	***	9,4
1959	***	6,5	***	***	***	7,7	***	14,2
1960	***	7,4	***	***	***	7,6	***	15,0
1961	***	9,6	***	***	***	8,3	***	17,9
1962	***	13,0	***	***	***	8,0	***	21,0
1963	***	13,5	***	***	***	6,6	***	20,1
1964	***	14,6	***	***	***	11,4	***	26,0
1965	***	15,4	***	***	***	14,2	***	29,6
1966	***	17,2	***	***	***	15,7	***	32,9
1967	***	19,3	***	***	***	18,8	***	38,1
1968	***	22,1	***	***	***	19,3	***	41,4
1969	***	22,8	***	***	***	20,1	***	42,9
1970	***	25,1	7,9	***	***	23,1	***	56,1
1971	***	27,2	25,0	***	***	28,5	***	80,7
1972	***	35,8	31,3	***	***	30,5	***	97,6
1973	***	41,7	30,4	***	***	39,6	***	111,7
1974	***	45,5	29,5	***	***	38,6	***	113,6
1975	***	55,6	29,9	***	***	35,8	***	121,3
1976	***	59,4	41,3	***	***	38,5	***	139,2
1977	***	59,3	59,4	***	***	48,4	***	167,1
1978	***	61,4	59,0	***	***	66,0	***	186,4
1979	***	79,7	82,3	***	***	76,1	***	238,1
1980	***	87,9	89,3	***	***	83,4	***	260,6
1981	***	87,4	88,5	***	***	80,5	***	256,4
1982	***	88,5	89,7	***	***	96,6	24,2	299,0
1983	***	107,1	90,2	***	***	120,3	83,1	400,7
1984	***	119,6	105,9	***	10,4	127,9	91,2	455,0
1985	8,7	120,1	152,5	***	41,6	135,7	90,8	549,4
1986	98,8	120,2	227,2	***	61,4	158,8	90,9	757,3
1987	166,0	112,7	242,7	21,0	79,1	169,0	53,0	843,5
1988	170,4	117,0	256,4	50,7	108,9	170,1	***	873,5
1989	169,2	115,5	269,6	50,8	113,7	169,1	***	887,9
1990	194,0	115,9	266,1	51,4	128,7	174,5	***	930,6
1991	288,0	113,7	275,9	51,0	206,7	204,3	***	1139,6
1992	335,2	102,2	278,3	50,6	209,6	217,4	***	1193,3
1993	345,0	77,2	279,0	46,5	206,2	218,1	***	1172,0
1994	347,4	72,1	283,6	49,7	210,0	221,8	***	1184,6

Fonte: ABAL, Relatório Anual 1994.

Nota: A partir de agosto de 1987 a divisão da produção da Valesul Alumínio S.A., para efeito de comercialização é considerada nas empresas Billiton e Aluvale, conforme "take" de produção.

Não abrange sucata(nova e usada) recuperada.

