

Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
Fundação Estadual do Meio Ambiente
Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento
Gerência de Desenvolvimento e Apoio Técnico às Atividades Industriais



Levantamento da Situação ambiental e Energética do Setor de Ferroligas e Silício Metálico no Estado de Minas Gerais, Prospecção de Ações para o Desenvolvimento Sustentável da Atividade

Relatório Técnico

FEAM – DPED- GEDIN – RT 12/2010



Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
Fundação Estadual do Meio Ambiente
Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento
Gerência de Desenvolvimento e Apoio Técnico às Atividades Industriais

Levantamento da Situação ambiental e Energética do Setor de Ferroligas e Silício Metálico no Estado de Minas Gerais, Prospecção de Ações para o Desenvolvimento Sustentável da Atividade

Relatório Técnico

FEAM – DPED- GEDIN – RT 12/2010

Belo Horizonte
Dezembro 2010



© 2010 Fundação estadual do Meio Ambiente

Governo do Estado de Minas Gerais

Antônio Augusto Junho Anastasia

Governador

Sistema Estadual do Meio Ambiente – Sisema

Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável - Semad

José Carlos Carvalho

Secretário

Fundação Estadual do Meio Ambiente - Feam

José Cláudio Junqueira

Presidente

Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento

Paulo Eduardo Fernandes de Almeida

Diretor

Gerência de Desenvolvimento e Apoio Técnico às Atividades Industriais

Liliana Adriana Nappi Mateus

Gerente

Elaboração:

Arnaldo Abranches Mota Batista

Analista Ambiental

Humberto Rodrigues Lóes

Analista Ambiental

Victor Freire de Oliveira

Estagiário

Ficha catalográfica elaborada pelo Núcleo de Documentação Ambiental

F9811 Fundação Estadual do Meio Ambiente.
Levantamento da situação ambiental e energética do setor de ferroligas e silício metálico no Estado de Minas Gerais, prospecção de ações para o desenvolvimento sustentável da atividade / Gerência de Desenvolvimento e Apoio técnico às Atividades Industriais. --- Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010.
x, 182p.; il.

1. Indústria metalúrgica. 2. Meio ambiente. I. Título

CDU: 669.15:504.06(815.1)

Rodovia Prefeito Américo Gianetti s/nº - Serra Verde - Belo Horizonte/MG

CEP: - 31630-900 (31) 3915-1465

www.meioambiente.mg.gov.br

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Influência dos elementos de liga no aço	7
Tabela 2.2 – Consumos específicos de energia para diversos produtos dos fornos a arco submerso	56
Tabela 3.1 – Emissão de particulado na produção das ligas AC-FeCr, MC-FeCr e BC-FeCr	61
Tabela 3.2 – Emissão de particulado na produção das ligas FeSi, e Metal-silício ..	62
Tabela 3.3 – Emissão de particulado na produção de AC-FeMn, MC e BC FeMn, e Silício-Manganês	62
Tabela 3.4 – Emissão de particulado na produção de FeNi, FeV, FeMo, FeTi, FeB e queima de molibdenita.....	63
Tabela 3.6 – Produção média de gás em fornos a arco fechados	37
Tabela 3.7 – Composição química dos gases de processo perdidos nos fornos de fundição de sistema fechado	38
Tabela 3.8 – Gases residuais e pó exauridos dos fornos de fundição	38
Tabela 3.9 – Composição química do pó gerado na produção de ferroligas.....	39
Tabela 3.11 – Fontes potenciais de geração de efluentes líquidos em uma produção eletrolítica	47
Tabela 3.12 – Visão geral de efluentes líquidos	48
Tabela 3.13 – Resíduos sólidos gerados	49
Tabela 3.14 – Geração, reciclagem, reutilização e descarte de escória	50
Tabela 3.15 – Geração, reciclagem, reutilização e descarte de material particulado e lama.....	51
Tabela 3.16 – Níveis de poluição associados com os sistemas de tratamento	53
Tabela 3.17 – Comparação da emissão de material particulado coletado e emitido pelo forno	53
Tabela 3.18 – Vantagens e desvantagens de diferentes tipos de fornos elétricos.	56
Fonte: IPPC, 2001.....	Erro! Indicador não definido.
Tabela 3.19 – Coeficientes adimensionais para o dimensionamento de ciclone por diferentes autores.	60
Tabela 3.20 – Constantes empíricas α e β	65
Tabela 3.21 – Principais características de um lavador Venturi.	67
Tabela 3.22 – Vantagens e desvantagens dos processos de tratamento de água ..	76

Tabela 3.22 – Vantagens e desvantagens dos processos de tratamento de água (continuação)	77
Tabela 4.1 – Técnicas para recuperação de energia na indústria de ferroligas	80
Tabela 5.1 – Distribuição do número de empreendimentos por tipo de liga produzida	82
Tabela 5.2 – Capacidade mensal instalada do setor de ferroligas em toneladas por tipo de liga	83
Tabela 5.3 – Consumo e geração própria de energia elétrica do setor de ferroligas em Minas Gerais	99
Tabela 5.4 – Consumo de energia elétrica por tipo de ferroliga produzida	100
Tabela 5.5 – Dados de monitoramento de emissões de efluentes gasosos para fornos produtores de ferroligas com filtros de mangas em Minas Gerais	143
Tabela 5.6 – Dados de emissões de efluentes gasosos para fornos produtores de ferroligas sem filtro em Minas Gerais	144
Tabela 5.7 – Dados de filtros de mangas utilizados no setor de ferroligas em Minas Gerais	145
Tabela 5.8: Dados de ciclones utilizados no setor ferro-ligas	147
Tabela 5.9 – Emissões atmosféricas nas áreas de britagem de produto e descarga de matérias primas	149
Tabela 5.10: Medidas de melhoria da eficiência energética adotadas por empresas do setor de ferroligas	152

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Produção mundial de ferroligas	3
Figura 2.1: Reações internas de um forno elétrico a arco para produção de ferroligas.....	44
Figura 2.2: Representação esquemática de um Forno Elétrico de Redução (FER) utilizado para a fabricação de ferroligas.	46
Figura 2.3: Circuito elétrico equivalente de um forno a arco	47
Figura 2.4: Curvas características de um forno a arco-resistência (monofásico ou uma fase de um forno trifásico) R_u linear.	49
Figura 2.5: Disposição dos eletrodos no forno elétrico de redução	50
Figura 2.6: Variação do consumo de energia com a produção.	57
Figura 3.1: Possíveis locais de emissão de material particulado em uma planta de ferroliga.....	60
Figura 3.2: Sistemas de coleta de gases e material particulado.....	57
Figura 3.3: Separador multiciclônico.....	58
Figura 3.4: Formas e dimensões de um ciclone.	59
Figura 3.5 – Esquema de um lavador Venturi	66
Figura 3.6 - Lavador Venturi com garganta ajustável.....	66
Figura 3.7: Sistema de limpeza por ar reverso.....	72
Figura 5.2: Capacidade mensal instalada (t/mês) do setor de ferroligas	84
Figura 5.3: Número de fornos por liga produzida	85
Figura 5.4: Distribuição de vendas no mercado interno e externo de silício metálico	85
Figura 5.5: Distribuição de vendas no mercado interno e externo de ligas de magnésio	86
Figura 5.6: Distribuição de vendas no mercado interno e externo de cálcio silício.....	86
Figura 5.7: Distribuição de vendas no mercado interno e externo de ferro-silício-manganês	87
Figura 5.8: Distribuição de vendas no mercado interno e externo de ferro-silício	87
Figura 5.9: Distribuição de vendas no mercado interno e externo de ferro-manganês	88
Figura 5.10: Consumo específico de carvão vegetal por liga produzida	90

Figura 5.11: Consumo mensal de matéria prima para produção de Ferro-Manganês	90
Figura 5.12: Consumo mensal de matéria prima para produção de Carbureto de Cálcio	91
Figura 5.13: Consumo mensal de matéria prima para produção de Ferro-Fósforo	91
Figura 5.14: Consumo mensal de matéria prima para produção de Ferro-Nióbio	92
Figura 5.15: Consumo mensal de matéria prima para produção de Ferro-Silício-Manganês	92
Figura 5.16: Consumo mensal de matéria prima para produção de Cálcio-Silício	93
Figura 5.17: Consumo mensal de matéria prima para produção de Silício Metálico	93
Figura 5.18: Origem, em termos percentuais, do carvão vegetal utilizado por tipo de ferroliga produzida	94
Figura 5.19: Consumo específico de água por tipo de ferroliga produzida	94
Figura 5.20: Consumo específico de eletrodo de grafite por tipo de ferroliga produzida	95
Figura 5.21: Consumo específico de eletrodo Soderberg para produção de Ferro-Manganês	95
Figura 5.22: Consumo específico de eletrodo Soderberg para produção de Ferro-Silício	96
Figura 5.23: Consumo específico de eletrodo Soderberg para produção de ferroligas diversas	96
Figura 5.24: Consumo específico de pasta para revestimento da panela por ferroliga produzida	97
Figura 5.25: Consumo específico de tubo trefilado por ferroliga produzida	97
Figura 5.26: Consumo específico de plug poroso por produção de liga	98
Figura 5.27: Consumo de vergalhões e tubos de ferro por ferroliga produzida	98
Figura 5.28: Consumo de energia por tipo de ferroliga produzida	101
Figura 5.29: Relação entre capacidade e o volume útil de fornos para a produção de silício metálico	102
Figura 5.30: Potência dos fornos de produção de silício metálico	103
Figura 5.31: Rendimento dos fornos de silício metálico	103
Figura 5.32: Consumo de energia dos fornos de silício metálico	104
Figura 5.33: Relação rendimento versus fator de potência de fornos de silício metálico	104

Figura 5.34: Fator de potência dos fornos de silício metálico	105
Figura 5.35: Consumo de carvão vegetal dos fornos de silício metálico.....	105
Figura 5.36: Índice de funcionamento dos fornos de silício metálico	106
Figura 5.37: Consumo mensal de cavacos na produção de silício metálico	106
Figura 5.38: Relação capacidade volume útil do forno para produção de cálcio-silício.....	107
Figura 5.39: Fator de potência (cosΦ) dos fornos de cálcio-silício	107
Figura 5.40: Índice de funcionamento dos fornos de cálcio-silício	108
Figura 5.41: Consumo mensal de cavacos na produção de cálcio-silício	108
Figura 5.42: Consumo de carvão vegetal dos fornos de cálcio-silício.....	109
Figura 5.43: Potência dos fornos de cálcio-silício.....	109
Figura 5.44: Rendimento dos fornos de cálcio-silício	109
Figura 5.45: Consumo de energia dos fornos de cálcio-silício.....	110
Figura 5.47: Relação capacidade volume útil do forno para produção de ferro-silício.....	111
Figura 5.48: Relação rendimento versus fator de potência de fornos de ferro-silício	111
Figura 5.49: Potência dos fornos de ferro-silício.....	112
Figura 5.50: Consumo de carvão vegetal dos fornos de ferro-silício.....	112
Figura 5.51: Consumo mensal de cavacos na produção de ferro-silício	113
Figura 5.52: Índice de funcionamento dos fornos de ferro-silício	113
Figura 5.53: Fator de potência (cosΦ) dos fornos de ferro-silício.....	114
Figura 5.54: Rendimento dos fornos de ferro-silício	114
Figura 5.55: Consumo de energia dos fornos de ferro-silício.....	115
Figura 5.56: Consumo de energia dos fornos de ligas de magnésio	116
Figura 5.57: Relação capacidade volume útil do forno para produção de ligas de magnésio	116
Figura 5.58: Relação rendimento versus fator de potência de fornos de ligas de magnésio	117
Figura 5.59: Consumo de carvão vegetal dos fornos de ligas de magnésio	117
Figura 5.60: Potência dos fornos de ligas de magnésio	118

Figura 5.61: Fator de potência ($\cos\Phi$) dos fornos de ligas de magnésio	118
Figura 5.62: Rendimento dos fornos de ligas de ferro-silício-manganês	119
Figura 5.63: Consumo de energia dos fornos de ligas de ferro-silício-manganês.....	119
Figura 5.64: Consumo de carvão vegetal dos fornos de ligas de ferro-silício-manganês	120
Figura 5.65: Relação rendimento versus fator de potência de fornos de ferro-silício-manganês	120
Figura 5.66: Potência dos fornos de ligas ferro-silício-manganês	121
Figura 5.67: Índice de funcionamento dos fornos de ligas de ferro-silício-manganês	121
Figura 5.70: Rendimento dos fornos de ligas de ferro-manganês.....	123
Figura 5.71: Consumo de energia dos fornos de ligas de ferro-manganês	123
Figura 5.72: Índice de funcionamento dos fornos de ligas de ferro-manganês ...	124
Figura 5.73: Consumo de carvão vegetal dos fornos de ligas de ferro-manganês	124
Figura 5.74: Consumo mensal de coque na produção de ligas de ferro-manganês	125
Figura 5.75: Relação rendimento versus fator de potência de fornos de ferro-manganês	125
Figura 5.76: Potência dos fornos de ligas ferro-manganês	126
Figura 5.77: Fator de potência ($\cos\Phi$) dos fornos de ligas de ferro-manganês ...	126
Figura 5.79: Relação capacidade volume útil para fornos produtores de ligas....	127
Figura 5.80: Fator de potência ($\cos\Phi$) dos fornos de liga	128
Figura 5.81: Índice de funcionamento dos fornos de liga	128
Figura 5.82: Potência dos fornos de ligas	128
Figura 5.83: Potência dos fornos de ligas	129
Figura 5.84: Consumo de energia dos fornos de ligas	130
Figura 5.85: Rendimento dos fornos de ligas	131
Figura 5.86: Relação rendimento versus fator de potência de fornos de ligas	132
Figura 5.87: Índice de funcionamento dos fornos de liga	133
Figura 5.88: Fator de potência ($\cos\Phi$) dos fornos de ligas	134
Figura 5.89: Capacidade e volume útil do forno para produção de ligas.....	135

Figura 5.90: Intervalo de vazamento de fornos produtores de ferroligas	136
Figura 5.91: Vazão de gás do forno de produção de silício metálico	137
Figura 5.92: Vazão de gás do forno de produção de ferro-silício	137
Figura 5.93: Vazão de gás do forno de produção de ferro-silício-manganês	138
Figura 5.95: Vazão de gás do forno de produção de ligas	139
Figura 5.96: Vazão de gás do forno de produção de ligas	139
Figura 5.97: Percentual de fornos com e sem filtro no setor de ferroligas	142
Figura 5.98: Percentual de empresas com e sem filtro no setor de ferroligas	142
Figura 5.99: Percentual de empresas com e sem controle de emissões atmosféricas nas áreas de britagem do produto e descarga de matérias primas	148
Figura 5.100: Geração de resíduo do filtro por tonelada de liga produzida	151
Figura 5.101: Geração de escória por tonelada de liga produzida	151

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Foto 5.1: Forno do tipo aberto.....	89
Foto 5. 2: Forno aberto com cortina.....	89
Foto 5.3: Emissão de material particulado de uma planta industrial de ferro-ligas, formando uma espécie de “nuvem” no seu entorno.....	140
Foto 5.4: Visualização da dispersão da pluma de material particulado, referente ao mesmo empreendimento da foto 5.3.	140
Foto 5.5: Emissão de material particulado de outro empreendimento de ferro-ligas	141
Foto 5.6: Filtro de mangas	146
Foto 5.6: Molhagem de carvão vegetal para evitar a emissão de particulados sólidos	150

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	i
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE FOTOGRAFIAS	viii
1 INTRODUÇÃO	1
2 PROCESSO PRODUTIVO	6
2.1 Processo de produção de ferroligas	6
2.1.1 Descrição das ferroligas	36
2.1.1.3 Carbetos de Cálcio	38
2.1.2 Matérias Primas	39
2.1.3- Descrição dos processos de redução	43
2.1.4 Reações Químicas	52
2.1.5 Aspectos energéticos associados aos fornos a arco	55
3 ASPECTOS AMBIENTAIS	60
3.1 Emissões Atmosféricas	60
3.2 Efluentes Líquidos	46
3.3 Resíduos sólidos	48
3.4 Sistemas de controle de poluição	52
3.4.1 Sistemas de controle no armazenamento e no transporte de material	52
3.4.2 Sistemas de controle de emissões atmosféricas no processo de fusão da liga	53
3.4.3 Princípio de funcionamento de equipamentos de controle de gases e particulados	58
3.4.4 Sistemas de tratamento de água	74
4 RECUPERAÇÃO DE ENERGIA	79
5 DIAGNÓSTICO DO SETOR	82
5.1 Produção	82
5.2 Matérias Primas	89
5.3 Insumos	94
5.4 Consumo de Energia	98
5.5 Dados dos fornos elétricos	102
5.5.1 Fornos de Silício Metálico	102
5.5.2 Fornos de cálcio-silício	106
5.5.3 Fornos de ferro-silício	110
5.5.4 Fornos de ligas de magnésio	115

5.5.5 Fornos de ferro-silício-manganês	118
5.5.6 Fornos de ferro-manganês	122
5.5.7 Fornos de carbureto de cálcio, ferro-nióbio e ferro-fósforo.....	127
5.5.8 Comparações gerais para as diferentes ligas	129
5.6 <i>Avaliação Ambiental e Energética</i>.....	137
5.6.1 Controle de emissões atmosféricas.....	137
5.6.2 Controle de efluentes líquidos.....	150
5.6.3 Controle de resíduos sólidos	150
5.6.4 Medidas de melhoria de eficiência energética	152
6 CONCLUSÃO	155
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	160

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

A primeira empresa brasileira a produzir ferroligas em escala industrial foi a Companhia Níquel do Brasil, que entrou em operação em 1935, com o incentivo do governo federal. Em 1966, já operavam no país seis empresas nesse mercado: Companhia Brasileira de Carbureto de Cálcio (CBCC), Paulista de Ferroligas, Mineração Geral do Brasil, Alumínio Minas Gerais, Companhia de Ferro Ligas da Bahia (FERBASA) e Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), as quais totalizavam uma produção de 51 mil t/ano, aproximadamente. Alavancada pelo desenvolvimento da siderurgia brasileira, a indústria de ferroligas experimentou um grande desenvolvimento na década de 70, quando a produção saltou de 127 mil t (1972) para 552 mil t (1980).

Após a segunda crise do petróleo, a produção de eletrointensivos começou a ser transferida gradativamente das nações desenvolvidas – que repensavam suas matrizes energéticas e sofriam pressões ambientais – para regiões com maiores vantagens comparativas em insumos, especialmente, minério e energia, como a África do Sul, a Austrália e o Brasil. Na ocasião, o governo brasileiro, também em função da crise energética, desenvolvia um grande esforço para substituir o petróleo importado por energéticos nacionais, apoiando, por meio de programas como o CONSERVE, sua substituição por energia elétrica.

Vale destacar que o CONSERVE, criado em 1981 pelo então Ministério da Indústria e do Comércio, possibilitava a realização de diagnósticos energéticos em empreendimentos industriais para fins de identificar o potencial de conservação de energia caso a caso, sem ônus para o empreendedor. Houve incentivos à implantação e ao desenvolvimento de investimentos destinados à produção em larga escala de eletrointensivos, especialmente alumínio, metais não-ferrosos e ferroligas. Com isso, a potência do setor passou de 626 MVA, no início da década de 80, para 1.200 MVA em 1990, com a capacidade de produção movendo-se do patamar de 500 mil t/ano para cerca de 1.130 mil t/ano no mesmo período. No início da década de 90, após significativa expansão do setor, o Brasil ocupava o quarto lugar em produção e o terceiro em exportação, entre os países produtores de ferroligas do

mundo ocidental, sendo responsável por aproximadamente 7% das trocas internacionais do setor.

Apesar de sua posição favorável no final dos anos 80, a indústria nacional de ferroligas sofreu, ao longo desta década, um forte desaquecimento, reduzindo em, aproximadamente, 1/4 sua produção e em 1/3 seu nível de exportações. Na década de 90, a desaceleração da demanda siderúrgica mundial e a queda no consumo específico contribuíram para o encolhimento do mercado mundial de ferroligas, tornando-o super ofertante. Além disso, as volumosas exportações da China e dos países do Leste Europeu favoreceram a queda acentuada dos preços internacionais e o acirramento do protecionismo por parte dos importadores tradicionais, agravando a situação do mercado ocidental e afetando negativamente o parque brasileiro.

Mais de 85% da produção mundial de ferroligas são consumidos pelo setor siderúrgico, sendo o restante destinado às indústrias metalúrgica, às química e à eletrônica. (Andrade, 1999)

Atualmente, embora haja cerca de 60 países produtores, apenas oito são os responsáveis por 80% da produção mundial. A presença de diferenciais competitivos como a abundância de minério, redutores (carvão vegetal) e a existência de mão-de-obra competitiva, colocou o Brasil entre os oito maiores países produtores de ferroligas e silício metálico, apresentando um crescimento de 1,8% entre os anos de 1990 e 2000, como pode ser observado na Figura 1.1.

Neste período, diversos países, como China, África do Sul, Índia, Noruega e França conseguiram, por meio de políticas específicas para o setor, ganhar posições no mercado internacional, aproveitando o espaço deixado por outros produtores (ABRAFE, 2010).

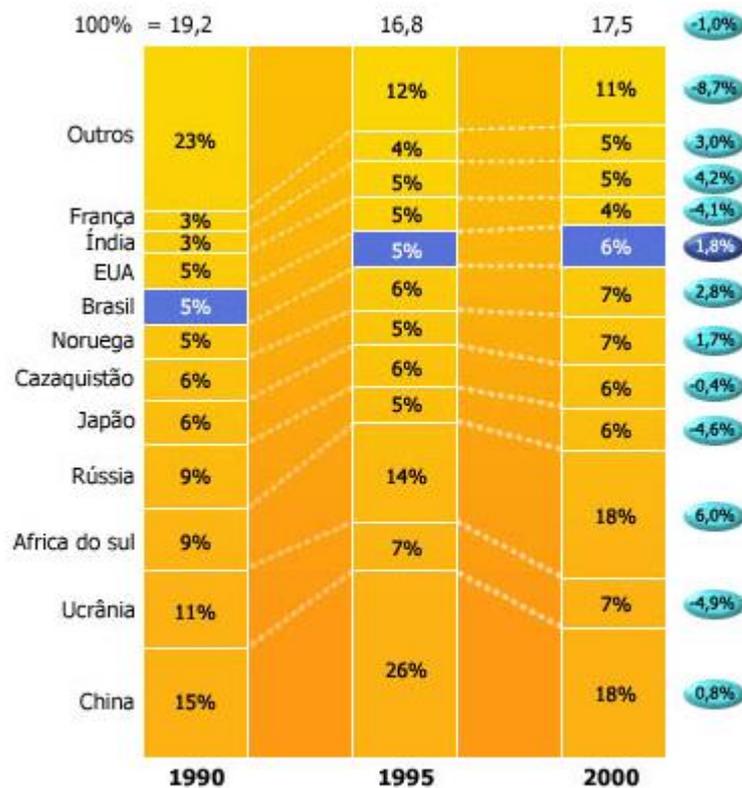


Figura 1.1: Produção mundial de ferroligas

Fonte: ABRAFE, 2010

No Brasil, esse setor é fortemente voltado para o mercado externo, que consome aproximadamente 56% do volume produzido, o que corresponde a 73% do seu faturamento. Atualmente, Japão, Estados Unidos e alguns países europeus, como Reino Unido e Alemanha, são os principais importadores mundiais de ferroligas (ABRAFE, 2010).

A indústria de ferroligas é caracterizada pela presença de grupos empresariais com porte competitivo internacional, como Eramet, Comilog, Pechiney, Fesil, Billiton, Anglo American, Assmang e Globe Metal, que, por meio de fusões e associações, têm aumentado a concentração do setor.

O mercado de ferroligas é segmentado pelo tipo de substância utilizada para a produção da liga. Os segmentos de maior representatividade, bem como os respectivos percentuais de produção em relação à produção mundial, são: a) ligas

de manganês, correspondendo a 39% I; b) ligas de silício (incluindo silício metálico), que correspondem a 27%; c) ligas de cromo, com 26%; e d) ligas de níquel, com 5%. A rota tecnológica, preponderantemente, utilizada na indústria de ferroligas é eletrointensiva. Atualmente, cerca de 96% da produção mundial utiliza fornos elétricos no processo produtivo. Dessa forma, a oferta e o custo da energia elétrica se caracterizam como fatores importantes na determinação da competitividade dentro da indústria.

Entretanto, outros aspectos também assumem uma fundamental importância na agregação das vantagens competitivas de custo, como: a) proximidade, abundância e qualidade das reservas de minérios; b) mão-de-obra; e c) os redutores utilizados (Andrade, 1999).

Procurou-se, neste trabalho, com o preenchimento de questionário padrão desenvolvido pela FEAM, durante as visitas técnicas realizadas nas empresas produtoras de ferroligas no Estado de Minas Gerais, levantar a situação atual do setor, focando, principalmente, nos aspectos de produção, processo industrial, aspectos ambientais e consumo energético.

Os dados foram compilados em planilhas do programa *Excel*, sendo apresentados neste relatório em função do que foi informado pelas empresas. Utilizou-se como metodologia seguir com o máximo de fidelidade os dados apresentados pela empresas, com pequenas correções daqueles considerados como discrepantes em comparação ao conjunto.

PROCESSO PRODUTIVO

2 PROCESSO PRODUTIVO

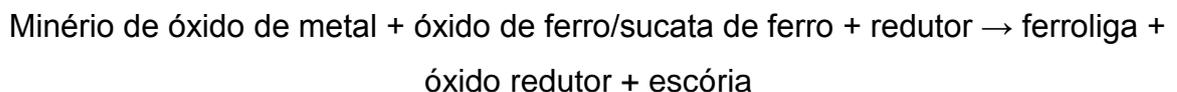
2.1 Processo de produção de ferroligas

As ferroligas são ligas de ferro combinadas a um ou mais elementos químicos, a proporção do elemento na composição do ferro-liga é sempre superior a do ferro. São utilizadas, principalmente, em processos metalúrgicos para adição de propriedades aos materiais e destinam-se, sobretudo à produção de aço, contribuindo como um importante insumo para aumento da qualidade dos produtos siderúrgicos.

As ferroligas podem ser divididas em dois grupos: ferroligas de cromo, manganês e silício e as ferroligas especiais, constituídas de cobalto, molibdênio, nióbio, níquel, tungstênio e vanádio. Uma descrição das propriedades conferidas pelas ligas aos aços está relacionada na Tabela 2.1.

Dependendo da matéria-prima que é utilizada (primárias ou secundárias), a produção de ferroligas pode ser realizada como um processo primário ou secundário. As principais reações químicas de ambos os processos podem ser apresentadas da seguinte forma.

Processos primários:



Processos secundários:



Tabela 2.1 Influência dos elementos de liga no aço

Elemento de Liga	Influência na Estrutura	Influência nas Propriedades	Aplicações	Produtos
Níquel	Refina o grão e diminui a velocidade de transformação na estrutura do aço	Aumento da resistência à tração e alta ductilidade	Aço para construção mecânica, aço inoxidável e aço resistente a altas temperaturas	Peças para automóveis, utensílios domésticos e caixas para tratamento térmico
Manganês	Estabiliza os carbonetos, ajuda a criar microestrutura dura por meio de têmpera e diminui a velocidade de resfriamento	Aumento da resistência mecânica e temperabilidade da peça e a resistência ao choque.	Aço para construção mecânica	Peças para automóveis e peças para uso geral em engenharia mecânica
Cromo	Forma carbonetos e acelera o crescimento dos grãos.	Aumento da resistência à corrosão e a oxidação e a aumento da resistência a altas temperaturas	Aços para construção mecânica, aços-ferramenta e aços inoxidáveis	Produtos para indústria química, talheres, válvulas e peças para fornos e ferramentas de corte.
Silício	Auxilia na desoxidação, auxilia na grafitização e aumenta a fluidez.	Aumento da resistência à oxidação em temperaturas elevadas e melhora da temperabilidade e da resistência à tração.	Aços com alto teor de carbono e aços para fundição em areia.	Peças fundidas.
Vanádio	Inibe o crescimento dos grãos e forma carbonetos	Maior resistência mecânica, maior tenacidade e temperabilidade e resistência à fadiga e à abrasão.	Aços cromo-vanádio	Ferramentas de corte.
Tungstênio	Forma carbonetos muito duros.	Aumento da dureza, aumento da resistência a altas temperaturas.	Aços rápidos e a aços ferramentas.	Ferramentas de corte.
Cobalto	Forma carbonetos (fracamente) e desloca a curva TTT para esquerda.	Aumento da dureza, aumento da resistência à tração e resistência à corrosão e à erosão.	Aços rápidos e elementos de liga em aços magnéticos.	Lâminas de turbina de motores a jato.
Molibdênio	Influência na estabilização do carboneto.	Alta dureza ao rubro. Aumento da resistência à tração. Aumento da temperabilidade.	Aços-ferramenta, aços-cromo-níquel, substituto do tungstênio em aços rápidos.	Ferramentas de corte.
Nióbio	Promove estabilização nos aços austeníticos, impedindo o empobrecimento de cromo via precipitação em forma de carbonetos	Aumenta a resistência à corrosão e capacidade de solda de aço e aço inoxidável.	Indústrias de construção civil, automotiva, naval, aeronáutica e espacial.	Tubulações (grades, estruturas, gasodutos e oleodutos) e ferramentas de alta precisão.

Atualmente, ferroligas primárias são produzidas, principalmente, por redução metalotérmica ou carbotérmica de óxidos de minérios e concentrados. O processo mais importante é a carboredução, em que carbono na forma de coque (coque metalúrgico), carvão mineral ou carvão vegetal é normalmente utilizado como agente redutor.

A redução metalotérmica é realizada, principalmente, com sílica ou alumínio como agente redutor. As equações químicas a seguir mostram os princípios básicos das rotas carbo e metalotérmica de redução.

Redução carbotérmica: Metal-óxido + Carbono \rightarrow Metal + Monóxido de Carbono

Redução silicotérmica: Metal-óxido + Silício \leftrightarrow Metal + Óxido de Silício

Redução aluminotérmica: Metal-óxido + Alumínio \rightarrow Metal + Óxido de Alumínio (IPPC).

2.1.1 Descrição das ferroligas

2.1.1.1 Ferroligas principais

As ferroligas principais são produzidas por redução em forno elétrico a arco submerso. Podem também ser produzidas em alto-forno, porém a quantidade de coque utilizada para geração de energia tornou esta forma de produção economicamente inviável, e atualmente a maioria das ferroligas são produzidas em forno elétrico.

Tipos de ferroligas principais

a) Ferro-cromo

Ferro-cromo juntamente com ferro-níquel são os principais elementos usados na produção de aço inoxidável. A quantidade de cromo na liga de ferro-cromo varia de 45 a 75%, junto com quantidades variáveis de ferro, carbono e outros elementos. O

uso do ferro-cromo depende da quantidade de carbono contido na liga e as ligas podem ser classificadas como:

- Ferro-cromo alto carbono com 4 a 10% deste elemento.
- Ferro-cromo médio carbono com 0.5 a 4% deste elemento.
- Ferro-cromo baixo carbono com 0,01 a 0,5% deste elemento.

b) Ferro-silício e ligas de silício

O ferro-silício, o silício metálico e o cálcio-silício, podem ser utilizados em diferentes atividades industriais. O primeiro é utilizado na indústria siderúrgica, sendo que o ferro-silício de alta pureza é usado na produção de aços altamente permeáveis para transformadores elétricos; o segundo é importante na produção de produtos químicos e equipamentos eletrônicos; e o terceiro é utilizado principalmente em indústrias siderúrgicas.

As ligas de silício são classificadas de acordo com a quantidade de silício na liga:

- Ferro-silício: quantidade de silício menor que 96%
- Silício metálico: quantidade de silício em torno de 96%
- Ferro-silício-cálcio: quantidade de silício entre 60 e 65% e cálcio de 30 a 35%

c) Ferro-manganês e ligas de manganês

O ferro-manganês é de grande importância na produção de aço inoxidável. As ligas e ferroligas de manganês são classificadas de acordo com a quantidade de carbono.

- Ferro-manganês alto carbono com 7,5 % deste elemento (teor máximo).
- Ferro-manganês médio carbono com 1,5 % deste elemento (teor máximo).
- Ferro-manganês baixo carbono com 0,5 % deste elemento (teor máximo).
- Silício-manganês 2,0 % deste elemento (teor máximo).
- Silício-manganês baixo carbono 0,05 % deste elemento (teor máximo).

2.1.1.2 Ferroligas especiais

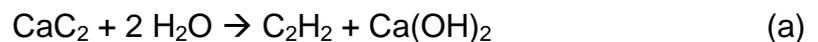
A produção das ferroligas especiais é utilizada para conferir propriedades específicas aos aços. As ligas de níquel são produzidas em forno elétrico a arco submerso. As ligas de ferro-vanádio podem ser produzidas por processos metalotérmicos ou carbotérmicos dependendo da quantidade requerida no produto final, sendo que, usualmente, são produzidas por redução aluminotérmica.

As ligas de ferro-nióbio são produzidas por processo aluminotérmico, enquanto as de ligas de ferro-molibdênio e de ferro titânio são produzidas por processo metalotérmico. As ligas ferro-tungstênio são produzidas pelo processo carbotérmico e as de ferro-boro são produzidas por rotas metalotérmica ou carbotérmica

2.1.1.3 Carbetos de Cálcio

O carbeto de cálcio (CaC_2) é utilizado na dessulfuração de ferro gusa e na produção de acetileno. Também conhecido como carbureto de cálcio, deve ser manuseado com cuidado, pois o contato com umidade do ar libera um gás inflamável (acetileno), que pode causar acidentes. A produção vem caindo desde a década de 50 devido à preferência pela utilização de derivados petroquímicos e pela substituição do acetileno pelo eteno.

A reação de produção de acetileno ocorre segundo a Equação (a).



A produção de CaC_2 é muito dependente da disponibilidade e do preço da energia, pois é um processo de grande demanda energética, que varia de 2.800 a 3.100 kWh/t. As matérias primas utilizadas são a cal e uma fonte de carbono, por exemplo, coque de petróleo ou metalúrgico. A reação ocorre em duas etapas conforme as Equações (b) e (c), a altas temperaturas, entre 1800°C e 2100°C.



A reação ocorre em um forno a arco elétrico com os eletrodos de carbono inseridos até o fundo da mistura de carbono e cal. Uma mistura líquida contendo 80% de carbeto de cálcio e 20% de cal é retirada descontinuamente do forno para uma panela de resfriamento. O excesso de cal é necessário para que a mistura esteja líquida na temperatura de processo.

2.1.2 Matérias Primas

As principais matérias primas utilizadas na indústria de são:

- Matéria prima mineral (óxidos dos metais a serem produzidos)
- Fundentes
- Redutores
- Eletrodos

As matérias primas devem seguir alguns requisitos para garantir uma boa operação no forno. Segundo Silveira (1980), devem ter uma faixa granulométrica estreita com diâmetro médio de grão adequado para cada componente individual da carga; elevada resistência à degradação sob os pontos de vista de abrasão, queda, crepitação e redução; elevada resistividade elétrica mesmo em altas temperaturas.

A classificação eficiente dos componentes individuais da carga, assim como resistência à degradação, permitirá obter uma distribuição uniforme do fluxo de gás em qualquer seção transversal do forno, o que proporciona melhor pré-aquecimento da carga pelo gás ascendente assim como um maior contato gás-sólido. Além disso, uma carga bem classificada apresenta reduzida tendência de segregação.

A elevada resistividade elétrica da carga é importante para se obter uma mais profunda imersão das extremidades dos eletrodos na carga, melhor distribuição de energia no forno e aproveitamento maior da capacidade dos eletrodos em transportar a corrente elétrica.

Como vantagem adicional, a elevada resistividade elétrica da carga conduz a maiores valores de fator de potência, o que não só permite operar com potência ativa mais elevada, como também reduzir custos de investimento, quando a compensação para a potência reativa é requerida. (Silveira, 1980)

2.1.2.1 Matéria prima mineral

A granulometria da matéria prima deve ser ajustada para que os gases gerados na reação atravessem a fase sólida de maneira uniforme. Além disso, a matéria prima também deve ser escolhida conforme a quantidade máxima de óxidos (impurezas) especificada para o produto. Dessas impurezas, as principais são SiO_2 , Al_2O_3 , e MgO . O coque utilizado deve ser seco a menos de 2% de umidade e deve conter menos que 15% de cinzas. Adicionalmente, para fornos fechados, deve ser utilizada uma granulometria entre 3 mm e 25 mm.

a) Cromita

O principal minério utilizado na fabricação de ferro-cromo, a cromita ($\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$), é um minério contendo óxido de cromo e óxido de ferro. Sua composição teórica contém 68% de óxido de cromo (Cr_2O_3) e 32% de óxido ferroso (FeO). Entretanto, estes valores nunca são encontrados nos minerais naturais, em decorrência de impurezas. O magnésio e o alumínio ocorrem em sua estrutura, substituindo parcialmente o ferro (CETEM).

A relação entre ferro e cromo no minério determina sua aplicação em um tipo determinado de liga, por exemplo, um minério com uma alta relação cromo/ferro é mais recomendado para produção de uma ferroliga com alta concentração de cromo.

b) Quartzo

Utilizado na produção de ferro-silício, silício metálico e cálcio-silício, o quartzo pertence à classe mineralógica dos silicatos, sendo sua fórmula molecular a do dióxido de silício (SiO_2), cuja composição é de 46,75% silício e 53,25% de oxigênio,

em porcentagem de massa. A força térmica do quartzito é de especial importância na qualidade do processo de produção, porque está relacionada à permeabilidade do gás na carga onde a presença de uma grande quantidade de finos pode impedir o fluxo de gás.

c) Manganês

A produção de ferro-manganês e silício-manganês é baseada em uma mistura de manganês contendo óxidos como matéria prima primária. O manganês é encontrado em uma variedade de rochas sob a forma de óxidos, dentre os quais se destacam: dióxidos, hidróxidos, silicatos e carbonatos. Os dióxidos constituem as mais importantes fontes comerciais do metal, destacando-se a pirolusita (MnO_2), o psilomelano [$\text{Ba Mn}^{+2} \text{Mn}_8^{+4} \text{O}_{16} (\text{OH})_4$] e a manganita ($\text{Mn}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$).

Para se obter uma boa eficiência do processo, o minério de manganês e concentrados (com baixo teor de ferro) devem ser granulares ou materiais sinterizados.

d) Níquel

Os minerais de níquel podem ocorrer associados aos sulfetos, como a millerita (NiS) e pentlandita (FeNi_9S_8), ou a outros sulfetos metálicos em rochas básicas, freqüentemente acompanhados de cobre e cobalto. O sulfeto é o principal mineral utilizado, contribuindo com mais de 90% do níquel extraído.

O outro mineral é a garnierita ou silicato hidratado de níquel e magnésio, que se encontra associado às rochas básicas (peridotitos).

e) Nióbio

O nióbio, utilizado na produção de ligas especiais, começou a ser obtido do minério pirocloro a partir da década de 60, após a descoberta de significativas deste mineral

em Araxá em Minas Gerais. Antes disso, era obtido como um subproduto do tratamento das colombitas e tantalitas, minerais pouco abundantes.

f) Molibdênio

Na produção de ferro-molibdênio, outra liga especial, é utilizado o trióxido de molibdênio (MoO_3) grau técnico.

g) Tungstênio

O tungstênio é encontrado em cerca de 15 diferentes tipos de minerais, no entanto, os de importância econômica se resumem a scheelita (CaWO_4), wolframita [$(\text{FeMn})\text{WO}_4$], ferberita (FeWO_4), huebnerita (MnWO_4), e powelita [$\text{Ca}(\text{MoW})\text{O}_4$], (Balanço Mineral Brasileiro, 2001), utilizados nas ligas especiais.

h) Cobalto

O cobalto ocorre em minerais como a cobaltita (sulfoarsenieto de cobalto, CoAsS), embora esteja mais frequentemente associado a minérios de níquel, de prata, de chumbo, de cobre e de ferro, sendo obtido como subproduto do processamento desses elementos.

2.1.2.2 Fundentes

Para alcançar uma alta qualidade da ferro-liga, e uma satisfatória operação do forno, materiais auxiliares como quartzo (SiO_2), bauxita ($\text{AlO}_x(\text{OH})_{3-2x}$), alumina (Al_2O_3), óxido de cálcio (CaO), olivina ($\text{Mg}_{1,5}\text{Fe}_{0,5}\text{SiO}_4$), calcário (CaCO_3) e dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] podem ser adicionados como agentes de fluxo.

2.1.2.3 Redutores

A escolha do agente redutor assim como a combinação entre os redutores é de grande importância para uma boa operação do forno. Os agentes redutores

utilizados na redução carbotérmica são o carvão e o coque. Há também a possibilidade de realizar a redução silico-térmica quando a quantidade de carbono requerida na liga for baixa. Por exemplo, para produção de ferro-cromo alto carbono, o carbono é utilizado como redutor na forma de carvão mineral ou vegetal. Para produção de ferro-cromo baixo carbono, é utilizada a sílica como agente de redução.

No Brasil são utilizados os seguintes redutores:

- Carvão vegetal;
- Coque metalúrgico;
- Coque de petróleo;
- Coque verde de petróleo;
- Cavacos de madeira;

2.1.2.4 Eletrodos

Os eletrodos são utilizados para produção do arco elétrico nos fornos elétricos a arco, podendo ser utilizados eletrodos de grafite, eletrodos amorfos de carbono ou eletrodos *Soderberg*.

Os eletrodos *Soderberg* consistem em uma “camisa”, um invólucro de aço macio ou aço inoxidável, reforçada internamente e preenchida com uma pasta carbonácea, geralmente, antracita calcinada, e uma pasta de carvão *tap pitch*.

Quando aquecido o alcatrão torna-se plástico e preenche todo o volume da camisa. Por aquecimento dentro do forno a pasta é cozida e torna-se sólida.

2.1.3- Descrição dos processos de redução

A principal tecnologia utilizada na produção de ferroligas é a do forno elétrico de arco submerso. De acordo com (Santos, 2007) o arco elétrico fornece calor para a redução dos diferentes óxidos presentes nas matérias primas pelo carbono e outros elementos.

A figura abaixo apresenta regiões de um forno elétrico a arco usado para produção de ferroligas. As regiões seca, de transição, de amolecimento e de fusão, de escória e de liga têm origem em fenômenos químicos e físicos que ocorrem à medida que a carga desce no forno.

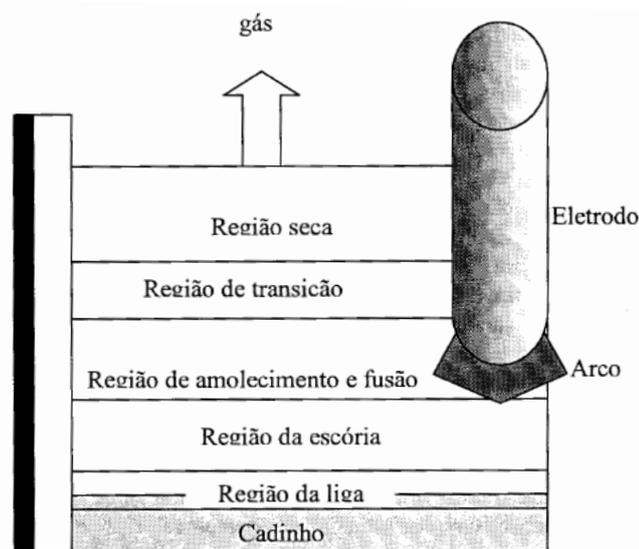


Figura 2.1: Reações internas de um forno elétrico a arco para produção de ferroligas.

Fonte: Matos, 2004 (apud Santos, 2007).

2.1.3.1 Forno elétrico a arco submerso

Em muitos casos, o forno elétrico a arco submerso sintetiza o produto requerido diretamente. O processo a arco submerso é uma operação de redução de fundição.

Os reagentes consistem em óxidos metálicos (óxidos de ferro, óxidos de sílica, óxidos de manganês, óxidos de cromo etc.) e agentes de redução, usualmente, na forma de coque, carvão vegetal ou mineral. O calcário pode ser utilizado como agente de fluxo.

As matérias primas são trituradas, peneiradas, e em alguns casos, secas, então são encaminhadas para a casa de mistura onde são misturadas e pesadas. O material é adicionado acima do forno, por meio de uma calha, de forma intermitente ou contínua de acordo com a necessidade. Na temperatura elevada da zona de reação,

a fonte de carbono reage com o óxido de metal para formar monóxido de carbono e reduzir os óxidos para formação do metal.

O aquecimento em um forno elétrico a arco é obtido pela transformação de energia elétrica em calor. Uma corrente alternada aplicada aos eletrodos provoca o fluxo de corrente através da carga entre as pontas dos eletrodos. Isso proporciona uma zona de reação com temperaturas de até 2000°C. A ponta de cada eletrodo muda de polaridade continuamente com os fluxos da corrente alternada entre as pontas. Para manter uma carga elétrica uniforme, a profundidade dos eletrodos é variada continuamente por meios mecânicos ou hidráulicos.

A parte inferior do forno, o cadinho, é feita de aço e coberta por uma ou duas camadas de refratário, podendo ser refrigerada à água para protegê-lo do calor do processo. Normalmente, três eletrodos de carbono arranjados em uma formação triangular estendem-se através da abertura do forno. Eletrodos pré-fabricados ou eletrodos *Soderberg* com diâmetro variando entre 76 a 100 cm são tipicamente utilizados.

A superfície da carga do forno, que contém material fundido e material ainda não convertido durante a operação, é mantida perto do topo do forno. As extremidades dos eletrodos são mantidas cerca de 0,9 a 1,0 m abaixo da superfície da carga.

O arco elétrico de corrente trifásica passa de eletrodo para eletrodo através da carga que derrete e reage para formar o produto desejado quando a energia elétrica é convertida em calor.

O material carbonáceo na carga do forno reage com o oxigênio dos óxidos metálicos da carga e reduz estes óxidos para o metal. A reação produz grandes quantidades de monóxido de carbono que passam através da carga do forno. O metal fundido e a escória são removidos por meio de um ou mais orifícios ao longo da “corrida”.

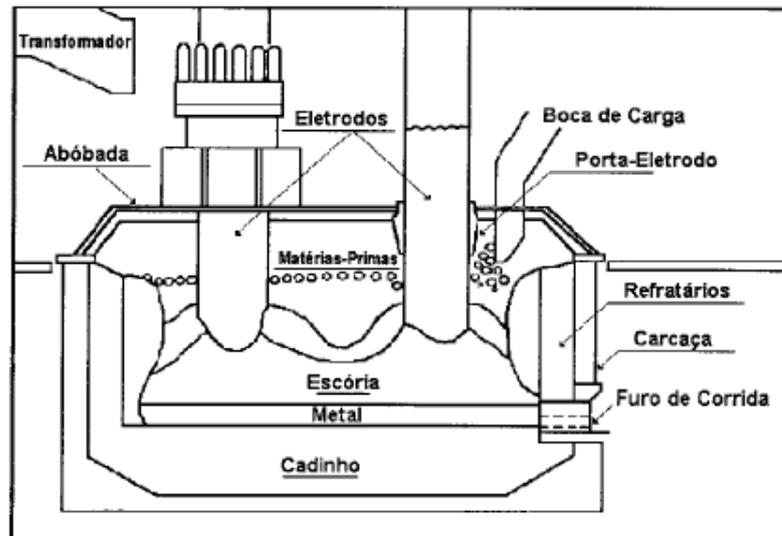


Figura 2.2: Representação esquemática de um Forno Elétrico de Redução (FER) utilizado para a fabricação de ferroligas.

Fonte: Santos, 2007.

O forno elétrico a arco pode ser de dois tipos: aberto ou fechado. No Brasil, utilizam-se, mais freqüentemente, fornos abertos para produção de ferroligas.

Fornos abertos possuem sistema de exaustão, posicionados até um metro acima do forno. Painéis móveis ou telas podem ser utilizados para reduzir o espaço aberto entre o forno e o exaustor melhorando a captura das emissões de gases e particulados.

O monóxido de carbono, que passa através da carga, queima na sua superfície, o que aumenta significativamente o volume do gás. Adicionalmente, a vigorosa combustão arrasta finos de minério da carga. Filtros de manga são, geralmente, utilizados para controle das emissões desse tipo de forno.

Fornos fechados têm uma cobertura de aço resfriada com a utilização de água. O objetivo do forno fechado é reduzir a entrada de ar no forno, o que diminui a combustão do gás, reduzindo assim o volume de gás a ser tratado. A cobertura possui furos para permitir a entrada da carga e por onde passam os eletrodos. Fornos que têm esses furos parcialmente fechados são denominados de fornos semi-fechados.

Embora esses fornos reduzam a entrada de ar, a combustão ainda ocorre sob a tampa do forno. Dependendo da matéria prima a ser processada, a produção de gás pode ser altamente variável, dessa forma, por razões de segurança, essas matérias primas são processadas em fornos abertos. Conforme o grau de confinamento aumenta, diminui a quantidade de gás produzido e aumenta a concentração de monóxido de carbono. Entretanto, esse monóxido de carbono contido no gás pode ser queimado ou utilizado na própria planta.

A corrida, normalmente, ocorre durante um período que varia entre 10 a 15 minutos e, após o vazamento do metal e da escória, o forno é selado com uma pasta de carbono. Após resfriar, a ferroliga produzida é quebrada, moída e peneirada de acordo com a especificação requerida do consumidor.

- **Características elétricas do forno a arco submerso**

O forno a arco é um equipamento que transforma energia elétrica em energia térmica. Dessa forma, é necessário que se conheçam alguns de seus componentes elétricos principais para que se tenha um melhor controle na operação do forno.

Nos fornos a arco submerso, a potência elétrica útil se transforma em calor, em parte no arco e em parte nas matérias primas. Dessa forma pode se considerar a “resistência útil” (R_U) como resistência linear (das matérias primas).

O circuito equivalente mostrado na figura 2.3 vale tanto para o forno monofásico quanto para uma fase do forno trifásico.

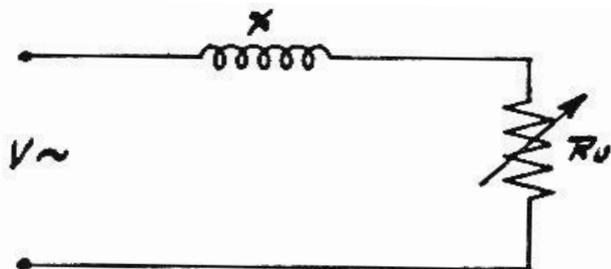


Figura 2.3: Circuito elétrico equivalente de um forno a arco

Deste circuito resultam as seguintes relações:

Potência absorvida pelo forno $\rightarrow P. X / V^2 = I/I_{cc} \cdot [1 - (I/I_{cc})^2]^{1/2}$

Potência reativa absorvida pelo forno $\rightarrow Q. X/V^2 = (I/I_{cc})^2$

Potência aparente absorvida pelo forno $\rightarrow Pa. X/V^2 = I/I_{cc}$

Fator de potência $\rightarrow \cos\Phi = \frac{\text{Potência ativa}}{\text{Potência aparente}} = [1 - (I/I_{cc})^2]^{1/2}$

As relações são dadas em função da I/I_{cc} (corrente/corrente curto circuito) que é uma unidade adimensional dada por $I/I_{cc} = \sin\Phi$, sendo Φ o ângulo entre a tensão de alimentação e a corrente.

Com esses valores, é possível obter curvas características de um forno a arco submerso, as quais, segundo di Stasi (1981), têm validade universal. Com base nessas curvas, algumas considerações acerca do forno a arco submerso podem ser feitas:

- A potência ativa absorvida pelo forno aumenta com o aumento da corrente, alcança o valor máximo para $I/I_{cc} = 0,707$ ($\cos\Phi = \sin\Phi = 0,707$) e depois diminui até o valor zero para $I/I_{cc} = 1$ (curto circuito).
- a potência reativa aumenta com a lei quadrática (parábola) ao aumentar de I/I_{cc} até alcançar o valor máximo de curto circuito.
- a potência aparente aumenta com lei linear ao aumentar de I/I_{cc} até alcançar o valor máximo $I/I_{cc} = 1$.
- o fator de potência diminui ao aumentar a corrente absorvida até alcançar o valor zero para $I/I_{cc} = 1$.

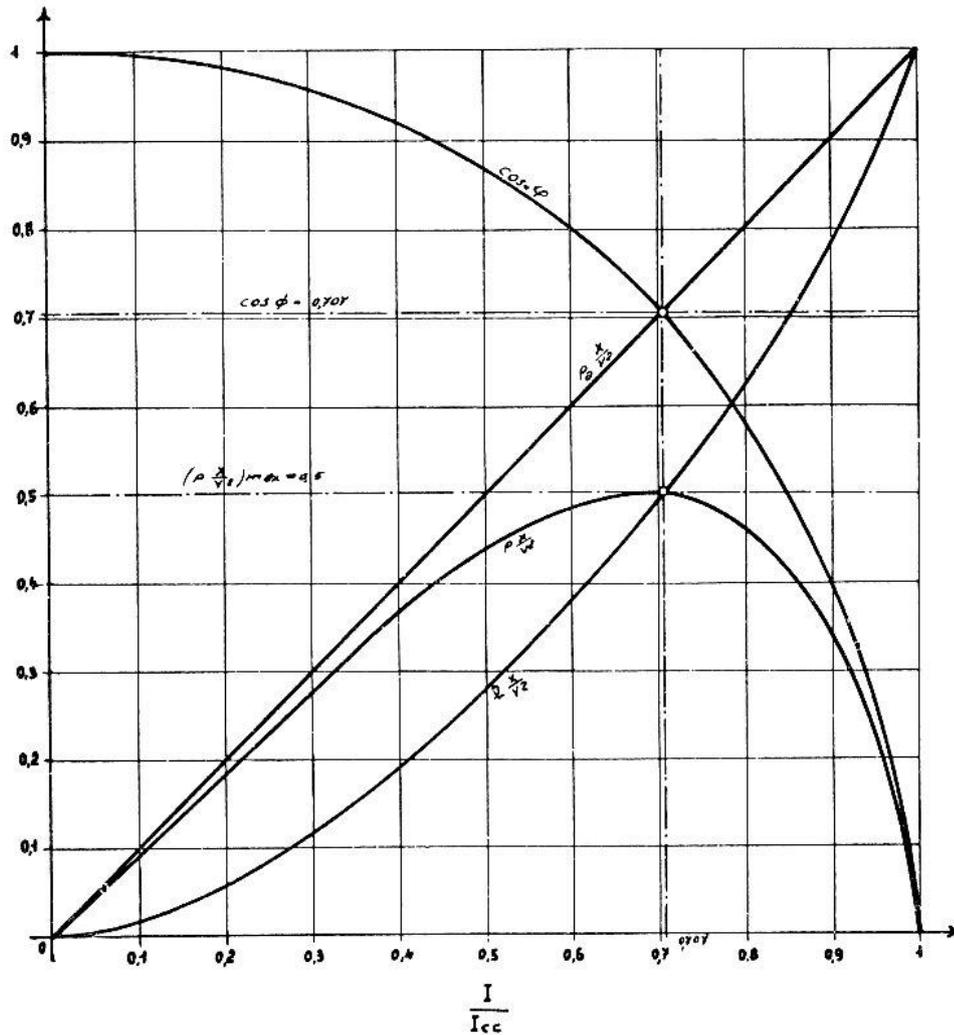


Figura 2.4: Curvas características de um forno a arco-resistência (monofásico ou uma fase de um forno trifásico) Ru linear.

Fonte: di Stasi, 1981.

• Arco elétrico

O arco elétrico é um tipo de descarga elétrica na qual a corrente passa através de um gás ionizado, vapores de metais e óxidos. Ele é formado quando três eletrodos, ligados a uma fonte de energia elétrica, são colocados em contato entre si e, em seguida, afastados um do outro, ou então colocados em contato com a carga e logo depois afastados desta. À medida que esses eletrodos se tornam mais distantes, a resistência nos pontos de contato aumenta, elevando a potência liberada, resultando na formação do arco elétrico que produz altas temperaturas, disponibilizadas para que as reações do processo ocorram.

Para controlar o processo de fusão, a operação do forno pode ser baseada no controle da corrente ou resistência, o que pode ser feito elevando e abaixando os eletrodos quando necessário, com o objetivo de manter a resistência ou corrente constante.

A emissão de elétrons tem lugar, principalmente, no ponto catódico, onde a temperatura pode alcançar 3000°C ou mais. Os elétrons adquirem uma alta energia na zona catódica e ionizam o gás. Os íons positivos do gás bombardeiam o catodo, aumentando a temperatura.

A coluna do arco consiste de moléculas neutras de gás, íons positivos e elétrons. Nessa região de plasma do arco, não há carga no espaço, e a eletricidade é transferida por elétrons. No processo de produção de ferroligas, o arco está submerso na carga e flui entre o eletrodo de carbono e a liga. Os pontos de fusão e vaporização de todos os elementos numa liga são muito inferiores à temperatura do arco. Portanto, vapores de todos os elementos de uma liga estão sempre presentes na atmosfera dele.

Segundo Santos (2007), os eletrodos são produzidos, continuamente, durante o processo, pelo cozimento de pasta carbônica em altas temperaturas. O triângulo formado pelos eletrodos está inscrito em um círculo cujo diâmetro, denominado “diâmetro do círculo positivo”, é pré-estabelecido em função da ferroliga que se deseja produzir. Dentre outros fatores, esse diâmetro é um parâmetro importante para o dimensionamento do projeto do forno.

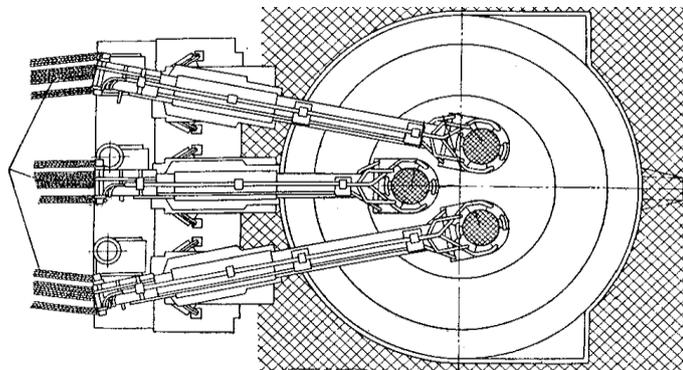


Figura 2.5: Disposição dos eletrodos no forno elétrico de redução

2.1.3.2 Processo metalotérmico

O processo metalotérmico é, geralmente, utilizado para produzir ligas com baixo teor de carbono. A liga intermediária usada no processo pode vir de diferentes fornos de redução, arco elétrico ou outro tipo de forno. O silício ou alumínio se combinam com o oxigênio na liga de fundição, resultando em um aumento acentuado de temperatura e agitação forte do banho derretido.

O ferro-cromo e ferro-manganês contendo baixo e médio carbono são produzidos por sílico-redução. A alumino-redução é usada para produzir cromo metálico, ferro-titânio, ferro-vanádio e ferro-nióbio.

O processamento térmico misto alumínio/sílica é usado para produção de ferro-molibdênio e ferro-tungstênio. O ferro-cromo de baixo carbono é tipicamente produzido por fusão do minério de cromo com cal. Os processos exotérmicos são geralmente realizados em fornos abertos e podem ter emissões semelhantes às do processo a arco submerso.

2.1.3.3 Processos Eletrolíticos

Processos eletrolíticos são usados para produzir manganês e cromo de alta pureza. O manganês pode ser produzido por eletrólise de um eletrólito extraído de minério de manganês ou manganês de escória de ferro-liga.

O processo é realizado em cinco etapas: 1) calcinação do minério para convertê-lo em óxido de manganês (MnO); 2) lixiviação do minério calcinado com ácido sulfúrico para solubilizar o manganês; 3) neutralização e filtração para remover hidróxidos de ferro e alumínio; 4) purificação do líquido lixiviado por meio de tratamento com a utilização de sulfeto e filtração, para remover uma grande variedade de metais; 5) eletrólise.

O cromo eletrolítico é, geralmente, produzido a partir de ferro-cromo alto carbono, sendo gerado grande volume de gás hidrogênio pela dissolução da liga em ácido

sulfúrico. O lixiviado é tratado com sulfato de amônia e condicionado ou precipitado para remoção de sulfato ferroso de amônio, sendo produzido um alúmen de cromo, que alimenta a célula eletrolítica.

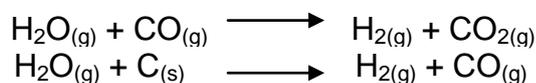
As células eletrolíticas são bem ventiladas para reduzir o hidrogênio no ambiente e a concentração de cromo hexavalente dentro das células.

2.1.4 Reações Químicas

De acordo com Santos (2007), as reações químicas e físicas ocorrem em regiões específicas, ao longo do forno, sendo denominadas regiões seca, de transição, de amolecimento e fusão, de escória e de liga, que são representadas na Figura 2.1, e serão descritas neste item.

a) Região seca

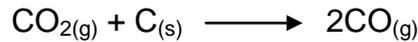
A carga é carregada pela parte superior do forno e, usualmente, contém minérios dos elementos de liga a serem produzidos, minérios de ferro, quartzo, calcário, dolomita, eventualmente escória reciclada e carvão vegetal ou coque. A primeira reação que ocorre é a vaporização da água, cuja origem é a umidade dos componentes da carga. Posteriormente, a água de hidratação também é removida, ocasionando certa crepitação dos minérios. O vapor liberado reage com o carbono ou o monóxido de carbono, produzindo hidrogênio, que também funciona como redutor de acordo com as reações:



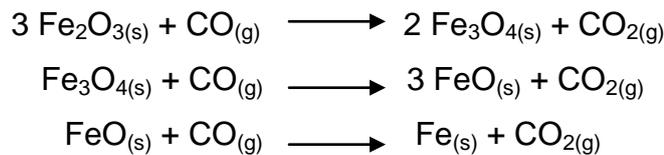
Com a descida e o aquecimento da carga, começa a ocorrer a decomposição dos carbonatos de cálcio e magnésio oriundos dos fundentes utilizados, a partir das temperaturas de 897 e 419 °C, respectivamente, representados pelas reações:



Ainda na região seca, outra reação importante é a de *boundouvard*, que envolve a gaseificação do carbono presente no carvão vegetal ou coque. Esta reação produz o gás redutor, monóxido de carbono, a partir de dióxido de carbono produzido na redução de minérios, consumindo calor de acordo com a reação:



O minério de ferro é parcialmente reduzido no estado sólido na região seca pelo gás redutor de acordo com as reações:



Dependendo do elemento de liga a ser produzido, a redução pode iniciar-se na região seca, a temperaturas mais baixas, ou numa região inferior, onde temperaturas superiores são alcançadas. Entretanto, na maioria dos casos, a redução final do óxido contendo o elemento de liga desejado somente ocorrerá em temperaturas elevadas, e o metal será produzido pela redução do óxido líquido na interface metal-escória. Portanto, na zona seca haverá somente uma redução parcial do óxido metálico de acordo com a reação genérica:



Da mesma maneira que os óxidos de alumínio, cálcio e magnésio, a sílica não sofre nenhum tipo de reação no interior da região seca, pois somente se reduz a altas temperaturas, apresentando alto ponto de fusão. A carga sofre aquecimento nesta região, e as reações de redução ocorrerão apenas em temperaturas mais elevadas.

b) Região de transição

A região de transição separa a região seca da região de amolecimento e fusão. Dentro da região de transição, algumas reações da região seca continuam a ocorrer. Iniciam-se, nessa região, o processo de amolecimento e fusão da carga e algumas reações de formação de carbonetos de ferro e dos metais de liga. As temperaturas

de início e de final dessa região são determinadas de acordo com as composições dos diferentes minérios que formam a carga do processo.

c) Região de amolecimento e fusão

A região de amolecimento e fusão apresenta como principal característica o fato das reações ocorrerem em alguma extensão entre os gases e sólidos, como na região seca, e também entre líquidos e sólidos, entre sólidos e sólidos e entre gases e líquidos.

Essa região do forno é formada por uma mistura de material em fusão, coexistindo com sólidos e gases, resultando daí sua importância para as questões elétricas do forno, pois é neste local que os eletrodos devem estar corretamente posicionados.

d) Região da escória

A escória funciona como um filtro, retendo as impurezas que comprometem a qualidade da liga. O seu controle é de fundamental importância para a operação adequada do forno elétrico de redução. Dependendo do metal de liga a ser produzido, haverá um grande arraste deste material para a escória, tornando-a rica no produto.

O controle de sua basicidade é essencial para promover a recuperação do metal, visando à manutenção de taxas mais elevadas de produtividade. Entretanto, invariavelmente, em vez do controle do processo evitando perda de produto, adotam-se práticas de reciclagem e reaproveitamento de escória para recuperação do metal de liga.

Cada tipo de ferro-liga a ser produzida irá gerar uma escória com composição, viscosidade e basicidade específicas. A basicidade binária da liga exerce forte influência na partição do metal de liga entre a liga metálica e a escória.

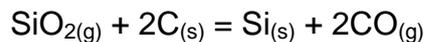
e) Região de liga

A região da liga é onde se encontra o metal fundido que é a ferro-liga desejada. (Santos, 2007).

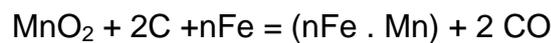
As regiões onde ocorrem as reações químicas dependem do tipo de ferro-liga que está sendo produzida. A seguir são apresentadas reações básicas que ocorrem na produção de algumas ferroligas

Reações por processos carbotérmicos:

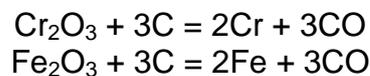
- Silício Metálico



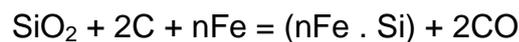
- Ferro-manganês



- Ferro-cromo

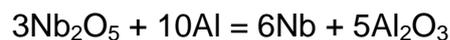


- Ferro-silício



Reação por processo metalotérmico (aluminotérmico):

- Ferro-nióbio



2.1.5 Aspectos energéticos associados aos fornos a arco

A potência elétrica necessária nos fornos a arco se situa entre algumas centenas de kW até cerca de 100 MW. O rendimento global é elevado e o consumo específico

varia consideravelmente com o tipo de forno, o produto e a forma de operação do forno, conforme a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Consumos específicos de energia para diversos produtos dos fornos a arco submerso

Produto	Energia (kWh/t)
Ferro-manganês (padrão)	2.800 – 3.200
Ferro-cromo (4 - 6% C)	4.000 – 6.000
Silício-cromo	5.500 – 6.500
Ferro-silício (75% Si)	8.500 – 10.000
Silício metálico	11.000 – 14.000
Carbureto de cálcio	2.800 – 3.200
Gusa	2.200 – 2.800

Fonte: Di Stasi, 1981.

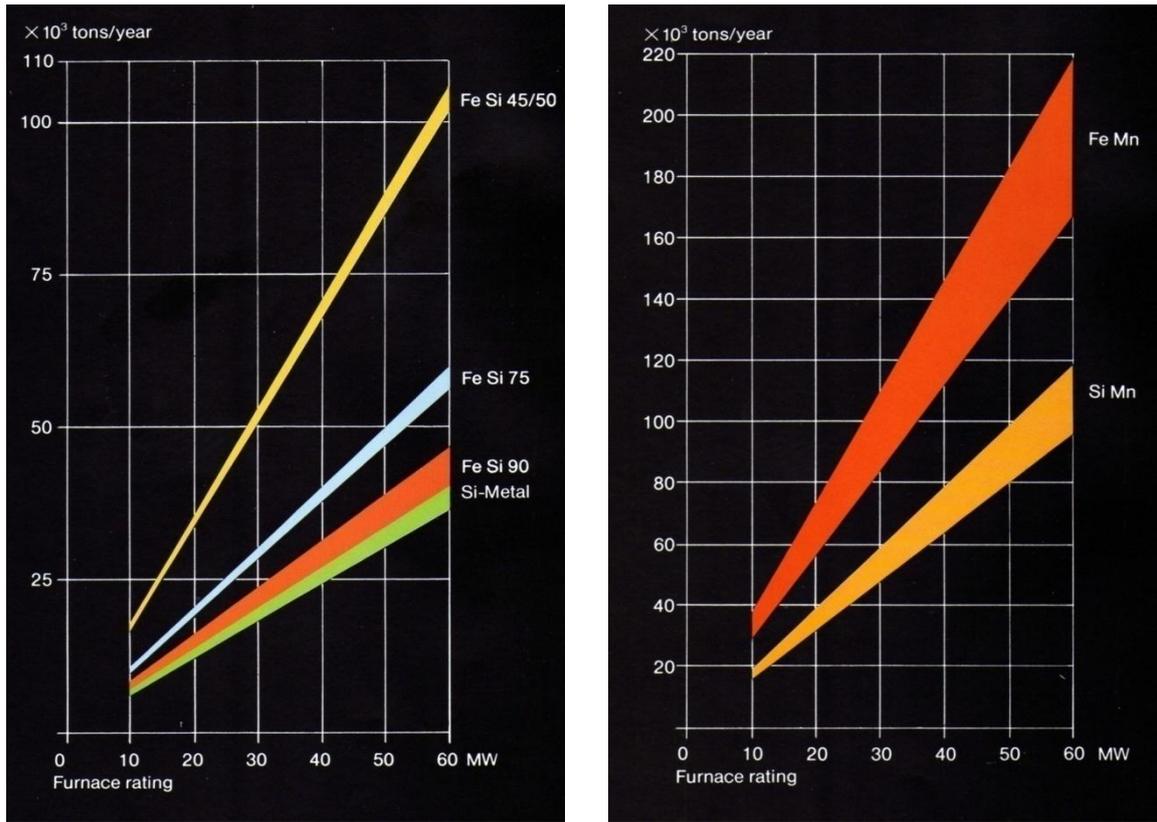
Esses valores de consumo específico de energia são parâmetros necessários para o dimensionamento de um forno elétrico destinado à produção de determinada quantidade de produto, de acordo com a seguinte fórmula:

$$P = \frac{Q \cdot c_s}{h}$$

Onde:

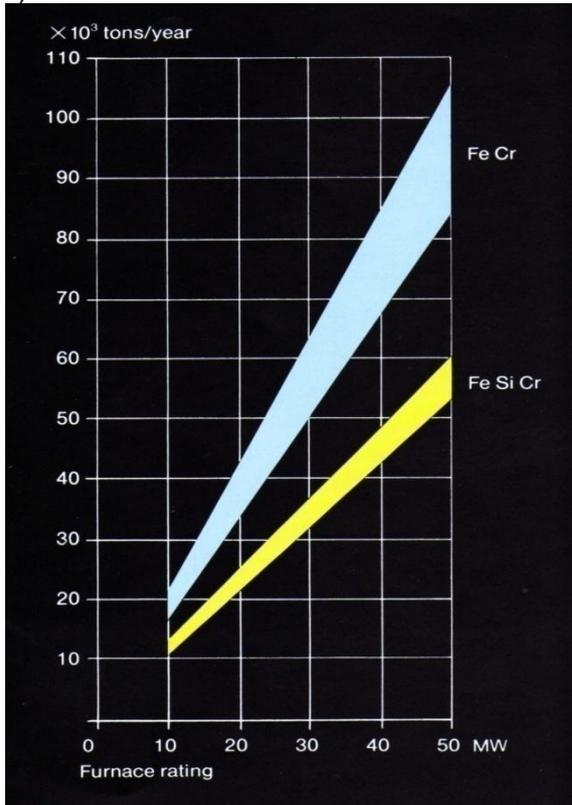
- P é a potência do forno em kW
- Q é a quantidade em toneladas de produto, em base anual
- h é o número de horas de funcionamento no ano
- c_s é o consumo específico de energia por tonelada de produto, constante na Tabela 2.2.

Como pode ser observado na Figura 2.6, o consumo de energia é diretamente proporcional à produção e ao tamanho do forno.

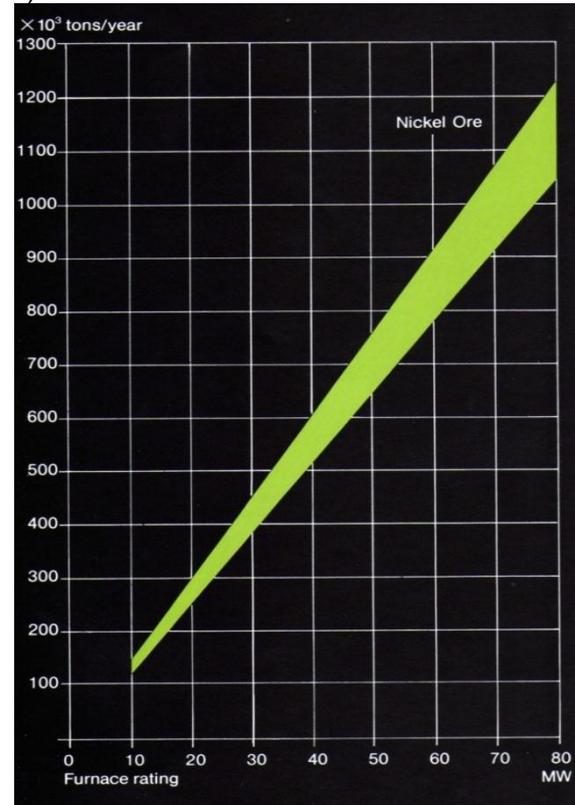


a) FeSi

b) FeMn



d) FeCr



e) FeNi

Figura 2.6: Variação do consumo de energia com a produção.

Fonte: Catálogo Mannesmann DEMAG- Submergic-Arc Furnaces.

O consumo específico de energia pode ser previsto levando-se em conta as quantidades de calor envolvidas no processo, a energia dispensada em fenômenos colaterais como evaporação da umidade e de substâncias voláteis, as impurezas e as perdas envolvidas, tais como perdas térmicas através das paredes do forno, por calor irradiado da superfície superior da carga, perdas de materiais por vaporização, perdas elétricas nos transformadores, condutores secundários e contatos.

Considerando como exemplo o processo de produção de silício, as quantidades de calor a serem consideradas são:

- variação entálpica da reação: $5,46 \times 10^6$ kcal/t;
- calor de aquecimento do silício produzido a temperatura ambiente até cerca de 1.500°C : $0,27 \times 10^6$ kcal/t;
- calor de fusão do silício produzido: $0,34 \times 10^6$ kcal/t;
- calor de aquecimento do CO produzido a temperatura ambiente até cerca de 1.000°C : $0,51 \times 10^6$ kcal/t de silício.

A soma da quantidade de calor é de 7.660 kWh/t.

As previsões de consumo energético segundo di Stasi (1981) considerando um forno de 10.000 kW, tendo carcaça metálica cilíndrica com 7m de diâmetro e 4m de altura são as seguintes: a soma das perdas térmicas é avaliada em cerca de 1.430 kW; sendo assim utilizável uma potência de 8570 kW; a obtenção de 1 t de silício a 1500°C exige 7.660 kW; porém esta produção é seguida de fenômenos colaterais que absorvem 1200 kWh; portanto a produção de 1 t de silício exige 8860 kW; desta forma o forno funcionando a uma potência de 10000 kW produz:

$$8.570 / 8.860 = 0,968 \text{ t / hora de silício}$$

O que resulta em um consumo de energia da ordem de:

$$10.000 / 0,968 = 10.300 \text{ kWh/t.}$$

ASPECTOS AMBIENTAIS

3 ASPECTOS AMBIENTAIS

O processo produtivo das indústrias de ferroligas possui impactos negativos no ambiente, dada a geração de resíduos sólidos, efluentes líquidos e, principalmente, emissões atmosféricas, que serão detalhados ao longo deste capítulo.

As emissões atmosféricas são compostas, de modo geral, por material particulado e gases. Estes contêm dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrocarbonetos aromáticos e metais pesados. Nesse último caso, a presença e a concentração nos gases dependem do processo adotado. Em relação aos resíduos sólidos, destaca-se a geração de escória, de lamas diversas e resíduos do filtro de poeira, enquanto os efluentes líquidos podem ser gerados quando a água utilizada no processo entra diretamente em contato com os produtos e nos processos de resfriamento de equipamentos.

3.1 Emissões Atmosféricas

A Figura 3.1 mostra os possíveis locais de emissão de material particulado em uma indústria de ferroliga.

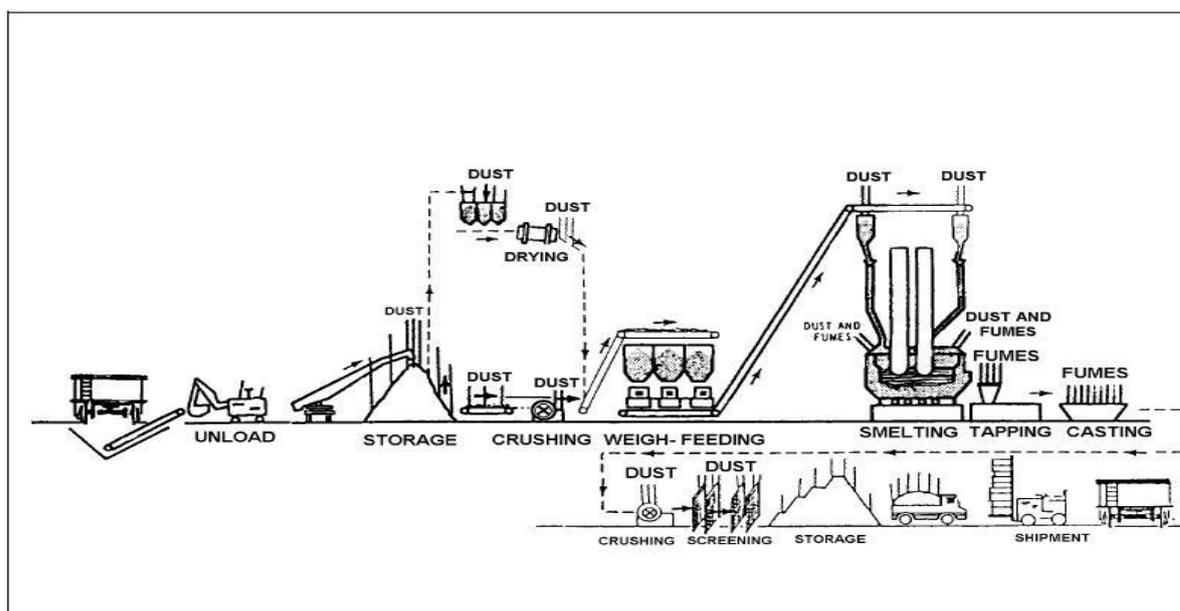


Figura 3.1: Possíveis locais de emissão de material particulado em uma planta de ferroliga

As emissões de material particulado (poeira) ocorrem nos processos de descarga e armazenamento, quando o material é transferido de um transportador para outro, ou se o transporte é feito em alta velocidade (acima de 3,5 m/s). O material particulado gerado no processo é coletado e conduzido para uma planta de redução de poeira para coletar o particulado com a utilização de um filtro de manga ou um lavador de gás (*wet scrubbing*).

A emissão na saída do forno nas etapas de corrida e refino contém poeira da lança de oxigênio, e principalmente óxidos dos metais envolvidos no processo de fusão. As Tabelas 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 mostram os níveis de emissão de material particulado em cada etapa do processo na indústria de ferro ligas, separadas por tipo de produto.

Tabela 3.1 – Emissão de particulado na produção das ligas AC-FeCr, MC-FeCr e BC-FeCr

Etapa do Processo	AC-FeCr		MC-FeCr		BC-FeCr	
	kg/t	mg/Nm ³	kg/t	mg/Nm ³	kg/t	mg/Nm ³
Armazenagem e transporte de matéria prima	0,01 a 0,02	f(N2)	n.a.	f(N2)	na	f(N2)
Secagem	0,002 (coque)	1 - 50	n.a.	n.a.	0,082 (minério)	5
Pelotização	0,01 – 0,02 por t pelotas	1 - 15	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.
Sinterização	0,2 – 0,5	1 – 30 (N4)	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.
Dosadores	0,01 – 0,02	1 – 30 (N4)	n.r.	n.r.	0,24	5
Pré-aquecimento	0,001 – 0,005	1-15 (N4)	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.
Forno de fundição	0,02 – 0,1 (N1)	1-100 (N4, 5,6)	n.a.	n.a.	0,101	8
Drenagem do forno	(N3)	5 – 12 (N4)	n.r.	n.r.	(N7)	(N7)
Manuseio da escória	n.m.	n.m.	n.a.	n.a.	0,04	10 - 15
Manuseio do produto (britagem, armazenagem etc.)	0,02 – 0,05	r	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Total	0,5 – 1,3	11-25	n.a.	n.a.	0,5	28-33
Observações:						
(N 1) O Cromo (VI) contido no material particulado está entre 5 – 100 ppm em fornos fechados e entre 1000 – 7000 ppm em fornos abertos;						
(N 2) A quantidade de material perdido na armazenagem e no transporte de matéria prima é estimada em menos de 2%;						
(N 3) A amostragem da ventilação do ar que sai do forno, incluindo a drenagem do forno e a solidificação, por um longo período de tempo pode dar uma indicação dos valores médios. Foram obtidas concentrações médias de poeiras entre 5 e 12 mg/Nm ³ e as quantidades de emissões de poeira no total de 0,2-0,6 kg/tonelada de ferro-liga produzida;						
(N 4) As emissões de poeira são dependentes do tipo de forno e da técnica de coleta dos gases utilizada. Por exemplo, a utilização de filtros manga em muitos casos alcança emissões menores que 5mg/Nm ³ . Emissões de poeira de um forno de sinterização utilizando uma cascata de lavadores de gás podem alcançar níveis de emissão menores que 4mg/Nm ³ ;						
(N 5) Ilustra o intervalo entre uma boa e uma má performance;						
(N 6) O gás de um forno fechado é utilizado como combustível depois de passar pelo lavador de gás;						
(N 7) Incluído na fonte de "Forno de fundição";						
n.a. = dados não disponíveis; n.r. = não relevante; n.m. = não foi medido; f = Poeira fugitiva;						
r = material particulado é reciclado no processo.						

Fonte: IPPC, 2001

Tabela 3.2 – Emissão de particulado na produção das ligas FeSi, e Metal-silício

Fonte	FeSi		Metal-silício	
	kg/t	mg/Nm ³	kg/t	mg/Nm ³
Armazenagem e transporte de matéria prima	f(N2)	f(N2)	f(N2)	f(N2)
Secagem de madeira	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.
Pesagem e dosagem	f	f	f	f
Forno de fundição	0,1 – 2	1 – 20 (N1)	0,1 – 1,5	1 – 20 (N1)
Drenagem do forno	(N3, 4)	5 – 12 (N3, 4)	(N3, 4)	5 – 12 (N3, 4)
Refinamento	(N3)	(N3)	(N3)	(N3)
Britagem do produto	0,3 – 0,5	r	0,3 – 0,5	r

Observações:
(N1) A utilização de filtros manga em muitos casos alcança emissões menores que 5 mg/Nm³, o que corresponde a um grau de filtração de 99,5%. A sílica é coletada no filtro como um co-produto (Micro-sílica);
(N2) A quantidade de material perdido na armazenagem e no transporte de matéria prima é estimado em menos de 2%;
(N3) Se os gases e a poeira são coletados no canal de corrida e filtrados por filtros manga as emissões de material particulado são as mesmas da poeira coletada no forno de fundição;
(N4) A amostragem da ventilação do ar que sai do forno, incluindo a drenagem do forno e a solidificação, por um longo período de tempo pode dar uma indicação dos valores médios. Foram obtidas concentrações médias de poeiras entre 5 e 12 mg/Nm³ e quantidades de emissões de poeira no total de 0,2-0,6 kg / tonelada de ferro-liga produzida;
n.a. = dados não disponíveis; n.r. = não relevante; n.m. = não foi medido; f = Poeira fugitiva;
r = material particulado é reciclado no processo.

Fonte: IPPC, 2001

Tabela 3.3 – Emissão de particulado na produção de AC-FeMn, MC e BC FeMn, e Silício-Manganês

Fonte	AC FeMn		MC e BC FeMn		Silício-Manganês	
	Kg/t	mg/Nm ³	Kg/t	mg/Nm ³	Kg/t	mg/Nm ³
Armazenagem e transporte de matéria prima	f	f	f	f	f	f
Dosadores	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Forno de fundição	0,1 - 0,4	5-60 (N3)	n.a.	<25	0,1 – 0,4	5-60 (N1, 3) 1-30(N2)
Drenagem do forno	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Caldeira	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.
Produção de energia elétrica	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.

Observações:
(N 1) Emissão de material particulado de um forno fechado com um lavador de gás tipo Venturi;
(N 2) Emissão de material particulado de um forno aberto;
(N 3) Se o tratamento do material particulado de um forno fechado for feito em uma cascata de lavadores de gás, a emissão atinge níveis de 10 – 20 mg/Nm³. Algumas indústrias operando com fornos semi-fechados utilizando filtros manga atingem níveis de emissão de material particulado menores que 5 mg/Nm³;
n.a. = dados não disponíveis; n.r. = não relevante; n.m. = não foi medido; f = Poeira fugitiva;
r = material particulado é reciclado no processo.

Fonte: IPPC, 2001

Tabela 3.4 – Emissão de particulado na produção de FeNi, FeV, FeMo, FeTi, FeB e queima de molibdenita

Fonte	FeNi	FeV	FeMo	FeTi	FeB	Queima de Molibdenita
	mg/Nm ³					
Armazenagem e transporte de matéria prima	1-15	<5	0,5-2	1-15	1-15	1-15
Secagem	1-15	n.r.	4-17	1-15	1-10	n.r.
Peletização	1-15	n.r.	n.r.	1-15	1-10	n.r.
Sinterização	<1 (N2)	n.r.	n.a.	1-15	1-10	1-15
Dosadores	<1 N(2)	n.r.	1	1-15	1-10	n.m.
Pré-aquecimento		n.r.	n.r.			n.r.
Forno de fundição	1-15	<5	1-30	1-15	1-10	n.r.
Drenagem do forno	n.a.	<5	5-15 (N1)	n.a.	n.a.	n.r.
Manuseio da escória	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.r.
Manuseio do produto (britagem, armazenagem etc.)	1-15	<5	0,5-5	n.a.	n.a.	n.m.

Observações:
(N 1) Emissões estimadas nos ventiladores do sistema de exaustão;
(N 2) Os dados são da produção de FeNi onde uma moderna membrana de filtro manga foi utilizada;
n.a. = dados não disponíveis; n.r. = não relevante; n.m. = não foi medido; f = Poeira fugitiva;
r = material particulado é reciclado no processo.

Fonte: IPPC, 2001

A emissão dos gases contendo SO₂, NO_x, CO, CO₂, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e metais pesados pode escapar tanto pelas chaminés quanto por emissões fugitivas, o que depende da idade da planta e da tecnologia utilizada. As quantidades relativas de cada gás dependem do tipo e da quantidade do redutor utilizado. Nos processos carbotérmicos, onde o carbono é utilizado como agente redutor, são geradas cinzas e gases de substâncias voláteis que são, em sua maioria, hidrocarbonetos. Esses hidrocarbonetos deixam o forno junto com os óxidos de carbono quando em fornos fechados ou queimam perto da superfície quando em fornos abertos e semi-abertos.

O coque metalúrgico contém na faixa de 4 a 1% de enxofre, sendo que, desse total, 60 a 80% permanecem na escória, 5% deixam o forno na forma de SO₂. Na produção de ligas de silício, são necessários outros agentes redutores como carvão mineral ou vegetal e coque, que possuem teores de enxofre variando de 0,5 e 3%. Como a produção de ligas de silício quase não produz escória, todo o enxofre que entra no processo escapa na forma de SO₂. Os metais com ponto de ebulição inferior à temperatura do processo podem dar origem a vapores metálicos. Esses podem sofrer condensação e oxidação, formando parte da poeira que deixa o forno.

Mesmo após a drenagem, o metal derretido e a escória possuem temperaturas elevadas o suficiente para que ocorram emissões de vapor de metais. A tabela 3.5 mostra os dados referentes à emissão de gases após o sistema de redução.

Tabela 3.5 – Emissão de gases do forno na produção de FeCr, FeSi, Silício Metálico, FeMn, e SiMn

Parâmetro	FeCr				FeSi		Silício Metálico		FeMn				Silício-manganês	
	AC FeCr		MC e BC FeCr						AC FeMn		MC e BC FeMn			
	kg/t	mg/Nm ³	kg/t	mg/Nm ³	kg/t	mg/Nm ³	kg/t	mg/Nm ³	Kg/t	mg/Nm ³	Kg/t	mg/Nm ³	Kg/t	mg/Nm ³
SO ₂	0,2-3,0	n.a.	n.r.	n.r.	20 (N7)	230	12-18		0,002-0,1	n.a.	n.a.	n.a.	0,002 - 01	n.a.
CO	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	traços	traços	n.m.	n.m.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
CO ₂	1200-2000 (N1)	n.a.	110(N3)	n.a.	4240 (N4)	55	6500 (N4)	55	1200-1500	n.a.	1560-2340 (N5)	n.a.	1100-1800	n.a.
NO _x	0,5-1,5	n.a.	n.m.	n.m.	15	170	10-13	80-110	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
HF	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
PCDD/F	0,2 g/a (N2)	n.a.	n.m.	n.m.	5µg/t	n.a.	3µg/t	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Metais pesados	Cr (na poeira) 1-15% CrVI 0,1-0,6 (N6)	n.a.	Cr<0,01 CrVI<0,002	n.a.	n.a.	0,78µgHg (N8)	n.a.	0,13µgHg (N8)	Hg (n.a.)	n.a.	n.a.	n.a.	Hg(0-0,002)	n.a.
Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos	n.m.	n.m.	n.a.	n.a.	0,0015 (N8)	0,02	0,003 (N8)	0,02	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Compostos orgânicos voláteis	n.m.	n.m.	n.a.	n.a.	0,045 (N8)	0,9	0,13 (N8)	0,9	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Cianetos	0,02-0,05	n.a.	n.a.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

Observações:
 (N1)Emissões de CO₂ incluindo o total de emissões do pré-tratamento, fundição, e processos pós forno;
 (N2)A quantidade anual de emissão de dioxina é somente para um forno de sinter;
 (N3)As emissões são devido à 80kg/t de gás natural nos processos de secagem, e 30kg/t de eletrodo consumido;
 (N4)Estas quantidades de CO₂ contém a quantidade de combustíveis fósseis e biológicos;
 (N5) Esses dados de emissão de CO₂ são devidos à produção silico-térmica de LCFeMn. As emissões de CO₂ na produção de MC e HC FeMn estão por volta de 100-500Kg/t de liga de ferro;
 (N6)A quantidade de CrVI na poeira que é emitida de um forno semi-fechado; cianetos= 0,2-0,5 de um forno fechado;
 (N7)Os altos valores correspondem a uma alta pureza de FeSi, onde uma grande quantidade de coque de petróleo é utilizada;
 (N8)Resultados de levantamentos globais de 24h de emissões na produção de FeSi75 e Silício Metálico de alta pureza; Neste caso deve ser observada que os dados são baseados em uma amostragem de curto período em duas plantas específicas, e não deve ser tomado como regra geral para a indústria;
 n.a = dados não disponíveis; n.r. = não relevante; n.m. = não foi medido.

Fonte: IPPC, 2001

Os fornos a arco fechados, em função da produção à qual são destinados, apresentam uma produção média de gás descrita na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Produção média de gás em fornos a arco fechados

Tipo de Liga	Geração de gás (Nm ³ /MWh)
Silício metálico	300 – 330
Ferro-silício 50%	285 – 300
Ferro-manganês	350 – 375
Silício-manganês	265 – 285
Ferro-silício-cromo	250 – 265
Ferro-cromo alto teor de carbono	175 – 200
Carbureto de cálcio	155 – 175

Fonte: Di Stasi, 1981.

O gás produzido pelos fornos a arco fechados possui, normalmente, em sua composição, 80 a 85% de CO, exceto na produção da liga ferro-manganês para a qual a concentração de CO pode ser reduzida em 55% (a favor de 25 a 30% de CO₂). A temperatura do gás é de cerca de 700°C e a concentração de poeiras varia entre 10 a 100 g/Nm³ nas emissões lançadas.

Os fornos a arco abertos possuem um volume de gás na saída da chaminé cerca de 50 vezes superior aos valores acima mencionados. A composição do gás é praticamente similar à do ar, porém com concentrações de 0,6% de CO₂ e 0,2 a 0,4% de CO, e a temperatura média varia entre 100 e 150 °C, podendo atingir um valor máximo de até 280°C (em chama). A concentração das poeiras varia de 0,2 a 4,6 g/Nm³ nas emissões lançadas (Di Stasi, 1981).

As Tabelas 3.7, 3.8 e 3.9, mostram, conforme Andonyev *et. Filipyev* (1977), a composição química dos gases de processo emitidos em porcentagem por volume, a quantidade de gases residuais e pó emitidos, por tonelada de liga produzida, e a composição química do pó gerado na produção de ferroligas.

Na Tabela 3.10 é apresentada a distribuição granulométrica das partículas emitidas.

Tabela 3.7 – Composição química dos gases de processo perdidos nos fornos de fundição de sistema fechado

Tipo de Liga	Conteúdo Percentual dos Componentes (por Volume)					
	CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	N ₂	O ₂
Ferro-Silício (75%)	87,3	5,1	6,2	1,4	-	-
Ferro-Silício (45%)	80-88	2-4	3-7	0,3-0,7	3,6	0,3-1,0
Ferro-Silício (18%)	79	8	1,8	-	-	0,2
Ferro-Manganês contendo carbono	71	19,7	1,9	5	2	0,4
Silício-Manganês comercial	70-85	7-14	2-5	0,6-2,3	0,7-4,0	0,4-1,7
Escória livre de fósforo	75,5	7,3	3,4	12,1	-	2,1
Ferro-Cromo contendo carbono	75-84	4,7-8,5	7-11,1	0,3	0,1	0,3

Fonte: Andonyev e Filipyev, 1977.

Tabela 3.8 – Gases residuais e pó exauridos dos fornos de fundição

Tipo de Liga	Condições Operacionais	Quantidade Real de Pó Carregada para o Aparato de Purificação de Gases (m ³ /t)	Quantidade de Pó Exaurida com os Gases (kg/t)	Quantidade de Pó Exaurida Através dos Respiradouros com a Mistura de Gás e Ar (kg/t)
Ferro-Silício (90%)	Aberto	-	-	340-380
Ferro-Silício (75%)	Aberto	-	-	170
Ferro-Silício (45%)	Aberto	-	-	40-55
	Fechado	800	15-30	3,4-6,0
Ferro-Silício (25%)	Aberto	540	Sem Dados Disponíveis	Sem Dados Disponíveis
Ferro-Silício (18%)	Aberto	350	4,5-6,5	2,4
Silício Cristalino	Aberto	-	-	425-470
Ferro-Manganês contendo carbono	Fechado	630	3,0-4,0	Sem Dados Disponíveis
Silício-Manganês comercial	Fechado	800-900	16-26	Sem Dados Disponíveis
Silício-Manganês para produção de aço	Aberto	-	-	25,0
Escória livre de	Aberto	-	-	11,0

fósforo	Fechado	140	0,9	-
Silício-Cálcio	Aberto	-	-	170-570
Silício-Cromo (50%)	Aberto	-	-	60,0
Silício-Cromo (30%)	Aberto	-	-	50,0
	Fechado	400	6	0,9
Ferro-Cromo contendo carbono	Aberto	-	-	35-50
	Fechado	620	3,0-12,0	1,5
Ferro-Cromo para produção de aço	Aberto	-	-	20-35

Nota: O conteúdo de CO + CO₂ no gás de processo é 83,0 - 94,0 por cento (para fornos abertos antes da combustão); a quantidade de pó por m³ de gás de processo é 15-30g; a quantidade de pó por m³ da mistura de ar e gás é 0,1-2,4g.

Fonte: Andonyev e Filipyev, 1977.

Tabela 3.9 – Composição química do pó gerado na produção de ferroligas

Tipo de Liga	Conteúdo Percentual dos Componentes (por Massa)							
	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	FeO + Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	SiC	MnO
Pó dos Fornos de Fundição								
Ferro-Silício (90%)	75-90	1,0-2,0	0,5-1,0	1,0-2,0	Dados Não Disponíveis	Dados Não Disponíveis	3-4	Dados Não Disponíveis
Ferro-Silício (75%)	47-90	0,8-1,1	0,2-0,3	0,4-4	1,1-3,2	Dados Não Disponíveis	3-7	Dados Não Disponíveis
Ferro-Silício (45%)	42-90	0,2-0,4	1,3-6,5	1-7	1,5-20	Dados Não Disponíveis	8-10	0-5,0
Ferro-Manganês contendo carbono	5-33	1,5-6	0,5-1,5	1,5-3	4-12,4	Dados Não Disponíveis	Dados Não Disponíveis	5-20
Silício-Manganês	30-50	0,1-3	1,2-3	2,3-3,5	0,5-4	Dados Não Disponíveis	Dados Não Disponíveis	10-25
Escória Sem Fósforo	27	4-10	1,0-2,0	1,0-5,0	8,8	Dados Não Disponíveis	Dados Não Disponíveis	Dados Não Disponíveis
Silício-Cálcio	66-74	20-24	1,4-3,4	0,4-1,4	0,2	Dados Não Disponíveis	1,2-1,4	Dados Não Disponíveis
Silício-Cromo	56-64	20-37	2-8	1,3-4	2-6	3,3-10	Dados Não Disponíveis	Dados Não Disponíveis
Ferro-Cromo contendo carbono	out/15	0,8-4,5	13-20	6-8	10-12	15-30	Dados Não Disponíveis	Dados Não Disponíveis
Pó dos Fornos de Refino								
Refinado	3,3-11,5	36-44	7-11	3,3-4,7	5,5-7,7	14-25	Dados Não Disponíveis	Dados Não Disponíveis
Manganês Metálico	6,6	39,2	1,8	0,34	0,44	Dados Não Disponíveis	Dados Não Disponíveis	Dados Não Disponíveis
Ferro-Tungstênio	0,15-3	9-25	0,2-0,6	3/nov	7-15	1,7-10	5,7-15	0,1-0,7

Fonte: Andonyev e Filipyev, 1977.

Tabela 3.10 – Distribuição granulométrica das partículas presentes no pó exaurido dos fornos de fundição

Tipo de Liga	Condições Operacionais no Forno	Conteúdo Percentual da Fração (por Massa) para Diâmetros de Partículas (μm)		
		<10	14885	>40
Ferro-Silício (90%)	Aberto	32	30	38
Ferro-Silício (75%)	Aberto	14	14	71
	Fechado	90	10	-
Ferro-Silício (45%)	Aberto	24	33	43
	Fechado	40,0-70,0	O Resto	
Silício, cristalino	Aberto	93	6	1
Ferro-Manganês Contendo Carbono	Fechado	49	39	12
Silício-Manganês comercial	Aberto	23	28	49
	Fechado	54	30	16
Silício-Manganês para produção de aço	Aberto	8	26	66
Escória livre de fósforo	Aberto	27	18	55
	Aberto	1	8	91
Silício-Cromo 50-%	Aberto	43	42	15
Silício-Cromo 30-%	Aberto	33	44	23
Ferro-Cromo contendo carbono	Aberto	44	41	15
	Fechado	43,0-70,0	15-30	O Resto
Ferro-Cromo para produção de aço	Aberto	41	25	34
	Aberto	0,04	5,6	94

Fonte: Andonyev e Filipyev, 1977.

3.1.1 Efeitos nocivos das emissões atmosféricas sobre a saúde humana

Alguns elementos presentes nos processos de produção de ferroligas podem ser prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente. Para a saúde do homem, esses elementos podem causar irritações na pele, nos olhos, no nariz e na garganta. Esses sinais e sintomas funcionam como alerta para o organismo da presença de algum produto prejudicial à saúde e, com o passar do tempo, podem ocasionar doenças graves nos pulmões, no fígado, nos rins, nos olhos e no sistema nervoso.

Ao meio ambiente, tais elementos podem causar desequilíbrios na flora e fauna, muitas vezes de forma irreversível.

Neste item, serão apresentadas as emissões atmosféricas relacionadas aos principais elementos químicos utilizados na produção de ferroligas e seus efeitos nocivos à saúde humana e ao ambiente.

a) Cromo

O cromo é um metal que se apresenta na natureza sempre combinado ao oxigênio dando origem aos chamados “cromatos”, entre outros óxidos. A inalação de poeiras, fumaças e névoas liberadas na utilização destes produtos e subprodutos do cromo e o contato da pele e mucosas com os compostos de cromo, sob a forma de cromatos, são geralmente responsáveis pelo aparecimento de dermatites, ulcerações na pele, perfuração do septo nasal e comprometimento do aparelho respiratório. A inalação de poeiras ou névoas contendo cromatos produz tosse, falta de ar, dores de cabeça e no peito. A exposição prolongada ao cromo e bicromatos pode causar câncer no pulmão.

b) Magnésio

As fumaças de óxido de magnésio podem provocar a “febre das fumaças metálicas”, queimaduras de pele, irritação dos olhos, do nariz e da garganta, além de alterações musculares difusas. Apresenta alta capacidade de se incendiar podendo causar lesões profundas à pele.

c) Manganês

O manganês penetra no organismo humano pelos pulmões, principalmente, mas também é absorvido pelo sistema digestivo e pela pele. Na siderurgia, as fumaças liberadas durante a fusão do minério de manganês são extremamente tóxicas. O manganês chega as vias circulatórias, acumulando-se no sangue e, ao atingir uma determinada concentração, passa a depositar-se na maioria dos órgãos do corpo, particularmente nos pulmões, no fígado, no baço e no cérebro. Alterações de comportamento manifestadas por euforia ou depressões, assim como alterações da

fala, do andar, dos desejos, entre outros, são comuns no período inicial da doença, apesar do trabalhador tomar consciência dessas alterações em seu comportamento, em determinado momento, ele não consegue controlá-las. Dores musculares, falta de apetite, dores de cabeça, o esquecimento, o gosto metálico na boca, as alucinações, também são sintomas que podem ser observados.

d) Níquel

Intoxicações mesmo leves por níquel podem causar sintomas como apatia, diarreia, dores no pênis ou vagina, febre, insônia e náuseas.

e) Ferro

A inalação da fumaça ou de pó de óxido de ferro pode produzir uma pneumoconiose chamada siderose.

f) Sílica

Os efeitos tóxicos sobre o organismo humano devido à exposição contínua a poeiras contendo sílica livre cristalina dependem de uma série de variáveis que podem causar silicose (fibrose pulmonar). Além disso, segundo a IARC (International Agency for Research on Cancer), instituição ligada a Organização Mundial da Saúde, a sílica livre cristalina inalada na forma de quartzo ou cristobalita a partir de exposições ocupacionais é carcinogênica para humanos.

g) Material particulado

As partículas dispersas no ar, tanto na forma líquida quanto na forma sólida, formam uma fração apreciável de todos os poluentes, especialmente em ambientes urbanos. A composição desse material particulado é de variedade ampla, incluindo os óxidos, os sais de metais, particularmente cloreto de sódio (NaCl), materiais moleculares complexos, gotículas de ácidos e até matéria viva. A faixa granulométrica de tais compostos varia de 0,0001 a 1000 μm , em termos de diâmetro, admitindo-se que

sejam esferas rígidas e indeformáveis de modo a descrever seu comportamento aerodinâmico, a despeito da existência de várias outras formas de determinação desse diâmetro das partículas.

As propriedades físicas de partículas atmosféricas são fortemente dependentes do seu tamanho e, em alguma extensão, sua toxicologia também o é. A faixa de 0,1 µm até 10 µm representa a maior parte da massa particulada que se encontra na atmosfera. Essas partículas são geradas por condensação ou por combustão, sendo seu tamanho inferior a 1 µm, ao passo que partículas maiores, com a exceção de chuva, granizo, neve resultam de operações de cominuição (britagem, moagem etc.).

Os produtos de combustão e aerossóis fotoquímicos compõem uma grande fração das partículas na faixa de 0,1 a 1 µm de diâmetro. Aquelas entre 1 e 10 µm, geralmente, incluem partículas de solos, assim como pós finos emitidos pela indústria.

Em ambientes marítimos, sais da água do mar suspensos no ar também compõem essa mistura.

As fontes industriais de material particulado incluem unidades municipais de incineração, cimenteiras, siderúrgicas, plantas de produção de ácido sulfúrico, fornalhas industriais, fábricas de papel e celulose, dentre outras.

As partículas de diâmetro superior a 10 µm, freqüentemente, resultam de processos mecânicos, tais como a construção de estradas, a erosão eólica, a moagem e o uso de *sprays*, além de materiais derrubados e cominuídos por veículos e pedestres. As partículas suspensas na atmosfera interferem na visibilidade por meio da difração e absorção da luz solar. O carregamento atmosférico com tais materiais pode causar quedas de até 33% na quantidade de luz solar que chega à superfície terrestre.

Em meados de 1984, teorizava-se que, em um ambiente urbano típico nos EUA, com a concentração na atmosfera de cerca de 100 µg/m³ de material particulado, a

incidência de luz solar sobre a superfície era reduzida em 5% a cada vez que a concentração de partículas dobrava. Esse efeito é mais pronunciado na faixa do ultravioleta no espectro eletromagnético.

Evidentemente, particulados na atmosfera, tais como a poeira, os fumos, a névoa e os produtos de combustão incompleta, por causa de seu estado físico e de sua composição química variada, podem causar danos aos materiais. Estes podem se manifestar sob a forma de corrosão química, sujeiras ou, em alguns casos, fazendo com que tecidos, imagens ou monumentos se deteriorem, perdendo, consideravelmente, seu valor.

A presença de SO₂ e névoas ácidas aumenta drasticamente a concentração e a corrosividade de material particulado do ar. O próprio acabamento de pinturas de veículos, por exemplo, pode ser danificado por materiais particulados emitidos pela atividade industrial.

As substâncias como cloretos solúveis de ferro, de cobre, e de cálcio e sais de zinco são comumente encontrados em amostras de particulados atmosféricos de ambientes urbanos, assim como em amostras de água de chuva, e podem causar empolamento (surgimento de vazios entre as superfícies do material e da camada de tinta) e degradação de superfícies pintadas. As partículas podem se depositar sobre superfícies pintadas antes que o processo de cura e secagem da tinta tenha sido concluído, o que produz imperfeições e reduz a capacidade protetora da tinta. Naturalmente, esses efeitos nocivos de partículas incorrem em custos.

Os efeitos de material particulado sobre a vegetação não são muito conhecidos. A maior parte dos estudos nesse sentido lidou com sistemas específicos, ao invés da mistura complexa que é encontrada na atmosfera. Ainda que se estudasse essa mistura, é possível que os resultados obtidos fossem de reprodutibilidade limitada, uma vez que o regime de ventos e o climático de um dado ambiente urbano são variáveis com o tempo, assim como dificilmente a atmosfera de uma cidade será igual à de outra. Por outro lado, é conhecido que algumas poeiras são significativamente fitotóxicas. Novamente, ressalta-se que tal fitotoxicidade é devida

à composição química dessas poeiras, ou até mesmo aos compostos químicos que elas podem carrear por adsorção.

Sabe-se, também, que a presença de material particulado na atmosfera está associada à pelo menos alguns tipos de poluição olfativa (odores irritantes ou desagradáveis). Alguns exemplos são os gases de descarga de automóveis, os odores de restaurantes, de processos de pintura, de incêndios de graxarias e de curtumes, todos atribuídos a essa classe de poluentes. Aparentemente, há evidências de que particulados que possuam componentes voláteis também podem produzir reações em receptores olfativos humanos.

Do ponto de vista de toxicidade humana, materiais particulados podem exercer um efeito tóxico por meio de três mecanismos: (1) a partícula pode ser intrinsecamente tóxica devido às suas características químicas e/ou físicas; (2) a partícula pode interferir com um ou mais dos componentes do trato respiratório; (3) a partícula pode atuar no carreamento de substâncias tóxicas por adsorção, conforme mencionado anteriormente.

A rigor, o tamanho de partícula e a carga de particulado são, ambos, fatores que contribuem para a toxicidade de qualquer substância específica. Uma redução no tamanho de partícula, geralmente, atua no sentido de aumentar a sua toxicidade. Isso pode ser associado a um aumento de superfície de contato da partícula ou ao próprio fato de que superfícies são sempre áreas de alta energia (e, portanto, de alta reatividade) de qualquer material. Até mesmo partículas inertes podem provocar reações quanto em concentrações suficientemente altas.

É de conhecimento que os materiais particulados podem conter substâncias reconhecidamente carcinogênicas, tanto para a fauna como para seres humanos. À luz das diferentes incidências de câncer pulmonar nos ambientes urbanos e rurais, reveladas por estudos epidemiológicos, é possível concluir-se que tais substâncias, presentes em atmosferas contaminadas, tais quais as dos meios urbanos típicos, configurariam as causas básicas desses tipos de enfermidades. Dentre os tipos de

câncer que podem ser causados por essas substâncias, citam-se o pulmonar, de bexiga, labial, bucal, do esôfago, dentre outros.

3.2 Efluentes líquidos

A contaminação de água na produção de ferroligas é muito dependente do processo de fabricação da liga de ferro e do sistema de redução. O sistema de tratamento da água contaminada pode ser integrado, onde todas as vazões de água são tratadas no mesmo local, ou as fontes podem ser tratadas separadamente.

Os principais poluentes dessas águas são partículas suspensas e compostos metálicos. Alguns metais, mesmo em baixas concentrações, são muito tóxicos. Alguns exemplos são o cádmio e mercúrio.

As possíveis fontes de efluentes líquidos são: sistemas de lavagem de gás, dos britadores de escória, sistemas de resfriamento de contato direto e indireto, sistemas de escoamento de águas superficiais e de drenagem e processos hidrometalúrgicos (como lixiviação e extração líquido-líquido).

Os sistemas de controle de emissões atmosféricas, como os lavadores de gás ou precipitadores eletrostáticos, devem ser utilizados quando há risco de explosão ou combustão de substâncias presentes no gás, ou quando algumas substâncias ou partículas têm que ser retiradas do gás, por exemplo, óxidos de enxofre (SO_x). O efluente líquido desses sistemas requer tratamento posterior como neutralização e/ou sedimentação sólido-líquido e o líquido tratado pode ser reutilizado no sistema.

Em vários casos, esses efluentes contêm cianetos formados no forno pela reação do carbono com o nitrogênio atmosférico. Nesses casos, o nível de cianetos pode ser reduzido com o tratamento da água do sistema de lavagem de gás em conjunto com a água do sistema de granulação de escória, o que promove a oxidação da maior parte dos cianetos.

Quando a liga e escória saem do forno, eles podem ser quebrados (britados) usando água a alta pressão. Essa água pode ser aproveitada em um circuito fechado. Entretanto, parte dessa água contendo partículas sólidas deve ser removida periodicamente para evitar o acúmulo desse material ao longo do tempo. Esse efluente pode ser tratado em um sistema central de tratamento.

A água utilizada nos sistemas de resfriamento que não entre em contato com os produtos pode ser recirculada utilizando uma torre de resfriamento, ou então pode ser lançado diretamente no corpo d'água receptor (rios, lagoas etc.), apenas tomando-se cuidado para que não se aqueça o corpo hídrico. A água que entra em contato direto com o processo de modo geral contém compostos metálicos e partículas suspensas em alta concentração, o que torna necessário ser tratada em um sistema separado.

As águas de chuva que escoam superficialmente no terreno do empreendimento, podem ser contaminadas ao carrear algum material na área de estocagem, ou óleo e poeira que se encontram no chão para o sistema de drenagem. Essa água, após um tratamento físico-químico, pode ser reutilizada no processo, por exemplo, como água de resfriamento ou apenas para reduzir a emissão de poeira, que é gerada pelo tráfego de veículos.

As principais fontes de efluentes líquidos em uma planta de ferroliga e o tipo de sistema de tratamento a ser adotado estão apresentados nas Tabelas 3.11 e 3.12.

Tabela 3.11 – Fontes potenciais de geração de efluentes líquidos em uma produção eletrolítica

Unidade de Processo	Fonte/Operação	Opções de Uso
Limpeza dos gases de queima	Lavadores de gás	Tratamento da água utilizando etapas de precipitação, algumas vezes com a remoção de metais pesados utilizando trocadores iônicos
Lixiviação	Qualquer operação utilizando lavadores de gás	Retorno à lixiviação
Purificação	Operações gerais	Retorno à lixiviação, ou próxima etapa do processo
Eletrólise	Limpeza de células, anodos e catodos. Eletrólito gasto.	Retorno à lixiviação Retorno à eletrólise após tratamento.

Fonte: IPPC, 2001.

Tabela 3.12 – Visão geral de efluentes líquidos

Fonte de Efluentes Líquidos	Métodos de Minimização	Métodos de Tratamento
Águas do processo	Retornar ao processo o máximo possível	Neutralização, precipitação e clarificação. Eletrólise
Água de resfriamento indireto	Utilização de sistemas de resfriamento selados	Sedimentação
Granulação de escória	Retornar ao processo o máximo possível	Clarificação e precipitação se necessário
Sistemas de redução de poeira	Utilização de sistemas de resfriamento selados	Clarificação e precipitação se necessário
Água superficiais	Boa armazenagem de matéria prima	Clarificação e precipitação se necessário. Filtração

Fonte: IPPC, 2001

De uma forma geral, o efluente líquido é encaminhado para um espessador ou para uma bacia de sedimentação para retirar as partículas suspensas, podendo ser necessária a adição de um agente floculante para auxiliar no processo, caso estejam presentes partículas muito finas. Após esse tratamento, a água pode atingir uma concentração de partículas sólidas inferior a 20 mg/L, o que permite sua reutilização em algumas etapas do processo.

3.3 Resíduos sólidos

A produção de ferroligas está relacionada com a produção de uma grande variedade de co-produtos e resíduos sólidos. Os resíduos de processos mais importantes são a poeira dos filtros, lama dos lavadores de gás, escória do processo de fundição, e o revestimento do interior dos fornos.

Dependendo do material que compõe o resíduo e o seu valor econômico, esse resíduo pode ser comercializado como co-produto, reaproveitado no processo ou então, se o resíduo não apresenta nenhum valor econômico, encaminhado para

aterros com licença ambiental. A Tabela 3.13 mostra os possíveis resíduos que podem ser gerados e suas respectivas fontes.

Tabela 3.13 – Resíduos sólidos gerados

Código EWC*	Descrição	Origem
10.08.00	Resíduos da metalurgia de outros metais não ferrosos	-
10.08.01	Escória	Fundição
10.08.02	Impurezas	Fundição
10.08.03	Resíduos sólidos do tratamento de gases	Sistema de tratamento de gases
10.08.04	Outros materiais particulados e poeiras	Armazenamento, transporte, processo.
10.08.05	Lodo do tratamento de gás	Sistema de tratamento de gases
10.08.06	Revestimentos e refratários gastos	Forno
10.08.99	Resíduos diversos não especificados	-
11.02.00	Resíduos e lamas de processos hidrometalúrgicos	-
11.02.01	Lama do tratamento de água	Tratamento de água
11.02.03	Resíduos da produção de anodos aquosos para o processo eletrolítico	Produção de anodos
11.02.04	Lamas diversas não especificadas	-
15.02.00	Absorventes, materiais filtrantes, limpeza de roupa, e roupas de proteção	-
10.02.01	Absorventes, materiais filtrantes, limpeza de roupa, e roupas de proteção	Tratamento de gases (filtragem a seco)

* EWC (European Waste Catalogue) é a classificação de referência da comunidade Européia de lixos e resíduos tóxicos.

Fonte: IPPC, 2001

A quantidade de escória, poeira dos filtros ou lama gerada por tonelada de liga produzida são mostradas nas Tabelas 3.14 e 3.15, bem como a possibilidade de reutilização

Tabela 3.14 – Geração, reciclagem, reutilização e descarte de escória

Ferro-liga		Geração Específica (t de escória/t de liga)	Composição analítica	Reciclagem, reutilização e descarte
FeCr	AC	1.0 – 0.17	n.a.	Escória granulada é utilizada como material de construção e para construção de rodovias. Escória pode ser utilizada como areia de jateamento, e para a produção de concretos refratários.
	MC	n.a.	n.a.	-
	BC	1	CaO 44 - 45% SiO ₂ 23–33% MgO 9 - 13% Al ₂ O ₃ 5 - 9% Cr ₂ O ₃ 2.5 - 6.5% FeO 0.6 - 1.2%	A escória deve ser aterrada.
Liga recuperada dos resíduos da aciaria		0.4 – 1.2	CaO 25 - 40% SiO ₂ 35 - 50% MgO 3 - 15% Al ₂ O ₃ 12 - 18% Cr ₂ O ₃ < 3% Fe ₂ O ₃ < 2%	A baixa basicidade da escória (0.7 a 0.8) garante a formação de silicatos estáveis, os quais não são lixiviáveis. A escória é utilizada em várias aplicações de construção.
Silício Metálico FeSi		20 – 30 Kg/t	Si ou FeSi 20 - 30% SiO ₂ 5 – 20% SiC 20 –40% CaO 25 – 40% Al ₂ O ₃ 3 – 35%	A produção de FeSi é um processo que quase não produz escória. A escória deve ir para um aterro. Durante o refinamento de FeSi, pequenas quantidades de escórias são produzidas. A escória vai para um aterro.
Carbeto de Silício		0.4 – 0.6	SiO ₂ 10 – 20% SiC 15 –25% CaO 50 – 60% Al ₂ O ₃ 5 – 10% CaC ₂ 3 – 8%	Toda a escória é reciclada no forno
Fe-Mn	AC	0.4 – 0.8	n.a.	A escória padrão (baixo teor de MnO) é utilizada como material de construção. A escória rica em MnO é vendida como matéria prima para a produção de silício-manganês
	MC	1.6 – 1.9	n.a.	A escória é utilizada como matéria prima na produção de silício-manganês
	BC	1.6 – 1.9	n.a.	A escória é utilizada como matéria prima na produção de silício-manganês
SiMn		0.9 – 2.2	n.a.	A escória é utilizada como material de construção.
FeNi		n.a.	n.a.	-
FeV		2.6 - 3	n.a.	A escória é vendida como matéria prima secundária de processos industriais. (Ex: produção de refratários)
FeMo		1.5 – 2 (N1)	n.a.	Dependendo da composição da escória pode ser vendida para processamento, ou depositada em um aterro
FeW, FeTi, FeB		n.a.	n.a.	-
FeNb		1.9	n.a.	-
Observações: (N1) Escória por tonelada de FeMo inclui o peso da areia adicionada a escória.				

Fonte: IPPC, 2001

Tabela 3.15 – Geração, reciclagem, reutilização e descarte de material particulado e lama

Ferro-liga		Geração Específica (kg de material particulado ou lama/t de liga)	Reciclagem, reutilização e descarte
FeCr	AC	20 – 80 (N1)	O material particulado do forno deve ir para um aterro O material particulado da britagem é refundido no forno, ou utilizado na produção de aço inox O material particulado da manipulação da matéria prima pode ser reciclado no processo Lama dos lavadores de gás contendo hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e metais pesados necessita ser depositada em um aterro de materiais perigosos Cerca de 8 – 10 Kg/t de material particulado grosso contendo grandes quantidades de cromo coletado após um forno semi-fechado, pode ser facilmente ser recirculado no processo.
	MC	n.a.	-
	BC	70	A escória é reciclada no processo de fundição.
Liga recuperada dos resíduos da aciaria		100 - 500	Lama dos lavadores de gás contendo hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e metais pesados necessita ser depositada em um aterro de materiais perigosos
FeSi		200 - 300	Fumos de sílica (micro sílica) são coletados nos filtros manga e vendidos como co-produtos. Micro sílica é utilizada como aditivo de cimento, que aumenta a resistência do concreto e produz uma superfície lisa que previne a infiltração de água
Metal - Silício		300 - 40	
FeMn	AC	30 – 50	Material particulado e a lama são reciclados no processo, utilizados em outras indústrias, ou descartados em aterros. Lama dos lavadores de gás contendo hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e metais pesados necessita ser depositada em um aterro de materiais perigosos.
	MC	30 - 50	Material particulado e a lama são reciclados no processo, utilizados em outras indústrias, ou descartados em aterros.
	BC	30 - 50	Material particulado e a lama são reciclados no processo, utilizados em outras indústrias, ou descartados em aterros.
SiMn		30 - 50	Material particulado e a lama são reciclados no processo, utilizados em outras indústrias, ou descartados em aterros. Lama dos lavadores de gás contendo hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e metais pesados necessita ser depositada em um aterro de materiais perigosos.
FeNi		n.a.	-
FeV		n.a.	Material particulado é reciclado no processo de fundição, ou parcialmente descartado em um aterro especial.
FeMo		n.a.	Dependendo da composição da escória, ela pode ser vendida para processamento, ou depositada em um aterro
FeW,FeTi, FeB,FeNb		n.a.	Material particulado do forno é descartado em um aterro exceto para alguns FeNb
Observações:			
(N1) A composição do material particulado e da lama variam dependendo do forno de fundição e da matéria prima.			
(N2) Na poeira de um forno semi-fechado de ferro-cromo um conteúdo de 0.1 a 0.3% de CrVI, foi detectado.			

Fonte: IPPC, 2001

3.4 Sistemas de controle de poluição

3.4.1 Sistemas de controle no armazenamento e no transporte de material

No descarregamento de matéria-prima, devem ser utilizados sistemas de coleta e redução de poeira. Um grande problema ocorre quando o descarregamento é feito por gravidade, onde não há controle da velocidade, resultando em uma grande emissão de poeira. Dessa forma, sistemas de descarregamento fechados com portas automáticas são utilizados.

Os materiais com grande quantidade de finos (que podem gerar poeira) devem ser armazenados e transportados dentro de galpões fechados ou silos a fim de evitar a emissão de poeira fugitiva para o meio ambiente, bem como para o ambiente de trabalho. *Sprays* de água são freqüentemente utilizados para suprimir o material particulado. Algumas operações requerem a utilização de uma alimentação seca, o que torna inviável a utilização desses *sprays* de água. Alternativamente, podem ser utilizados *sprays* de água em névoa (atomização de água) para suprimir a poeira sem molhar o material.

A retirada da matéria prima armazenada pode ser feita através de um transportador com alimentação inferior, por meio de pás carregadeiras ou de transporte pneumático. Materiais que geram grande quantidade de poeira devem ser transportados por sistemas totalmente fechados.

Os combustíveis sólidos são armazenados em silos, pilhas em depósitos fechados ou abertos, de acordo com o tipo de combustível e a tendência de formação de poeira. O sistema de transporte deve ser projetado de modo a minimizar o número de mudanças de direção e a formação de poeira. Transportadores fechados podem ser utilizados para minimizar a emissão de material particulado.

Sistemas de coleta e filtragem de poeira devem ser utilizados nos locais de transporte e armazenagem de sólidos finos. A Tabela 3.16 relaciona a quantidade de particulados formados com a melhor técnica para tratamento.

Tabela 3.16 – Níveis de poluição associados com os sistemas de tratamento

Parâmetro	Emissão associada com o uso da técnica recomendada	Técnica Recomendada	Comentário
Particulados	<5 mg/Nm ³	Filtro Manga	Os filtros manga são normalmente utilizados para a coleta de material particulado de fornos abertos ou semi-fechados.
	<10 mg/Nm ³	Lavador de Gás	Sistemas de lavagem de gás são utilizados para tratamento dos gases de saída de fornos fechados ou alto-fornos. Lavadores tipo Venturi são utilizados em fornos fechados de AC FeCr, e alcançam emissões menores que 50mg/Nm ³ devido às partículas muito finas que são geradas no processo.

Fonte: IPPC, 2001

3.4.2 Sistemas de controle de emissões atmosféricas no processo de fusão da liga

Emissões de poeira fugitiva nesse processo têm elevada importância, uma vez que são de difícil medida e quantificação. Alguns dados indicam que a quantidade de poeira fugitiva é muito maior do que a quantidade coletada, sendo mostrada na Tabela 3.17 exemplos dessas quantidades.

Tabela 3.17 – Comparação da emissão de material particulado coletado e emitido pelo forno

Origem	Emissão de material particulado kg/ano	
	Antes da implantação de um sistema secundário de coleta de gás	Depois da implantação de um sistema secundário de coleta de gás
Produção de Anodo t/ano	220.000	325.000
Emissões fugitivas		
Total na fundição	66.490	32.200
Na linha de fundição	56.160	17.020
Emissões controladas		
Fundição/planta ácida	7.990	7.600
Bateria de exaustores secundários	2.547	2.116

Fonte: IPPC, 2001

O forno aberto possui um exaustor para coleta de poeira e gases a aproximadamente um metro acima de seu topo. Painéis móveis ou telas podem ser utilizados para reduzir a área aberta entre o forno e o coletor, com a finalidade de aumentar a eficiência de captura dos fumos.

O monóxido de carbono produzido queima na área entre a superfície da carga e o coletor, o que aumenta o volume de gás que o sistema de exaustão deve tratar. Filtros de mangas são os sistemas mais comuns no controle de emissões. O CO produzido escapa pelo topo do forno, onde se oxida formando CO₂ em uma reação exotérmica.

Os fornos abertos possuem o maior consumo de energia elétrica devido à alta formação de gases que deverão ser filtrados, o que requer um grande volume da casa de filtro. Além disso, mesmo com a utilização de um sistema padrão de filtros de mangas, o grande volume de gás induz uma grande emissão de material particulado para o meio ambiente. A energia dos gases produzidos em um forno aberto geralmente não pode ser recuperada.

Se a reação ocorrer em um forno completamente fechado, o grande volume de CO produzido pode ser recuperado como co-produto para aproveitamento energético. Os gases do forno devem ser despoeirados para que seja possível o aproveitamento do CO nas linhas de gás combustível, ou então o excesso de gás produzido deve ser queimado.

No caso de fornos fechados, todos os gases do forno são captados e limpos eficientemente, o que permite seu uso no pré-aquecimento dos materiais da alimentação ou então como uma fonte de combustível. Na parte superior desses equipamentos, há calhas de escoamento e válvulas de selagem para a alimentação, existem orifícios onde os eletrodos devem passar e lacres mecânicos em volta dos eletrodos, além de vedantes em volta das bordas externas.

Os exaustores e, ocasionalmente, o corpo do forno podem ser resfriados com água para controlar o processo e prevenir acidentes. Podem ocorrer vazamentos de água

de resfriamento para o interior do forno, o que deve ser minimizado, pois isso leva a produção excessiva de gás e funcionamento instável do equipamento. O objetivo do uso de fornos fechados é reduzir a infiltração de ar nos gases do forno, o que reduz a combustão desses gases. Isso também reduz o volume de gás a ser coletado e tratado, por um fator de 50 a 75.

Se a reação ocorrer em um forno completamente fechado, o grande volume de CO produzido pode ser recuperado como co-produto para aproveitamento energético. Os gases do forno devem ser despoeirados para que seja possível o aproveitamento do CO nas linhas de gás combustível, ou então o excesso de gás produzido deve ser queimado.

Fornos parcialmente fechados, denominados semi-fechados, possuem abertura na tampa para alimentação de material. Embora esses fornos cobertos reduzam significativamente a infiltração de ar, alguma combustão ainda ocorre no forno e a redução do volume de gás fica em torno de 10 a 20 vezes se comparado com o forno aberto. À medida que o grau de recobrimento do forno aumenta, menos gás é produzido para a captura pelo sistema de exaustão, porém a concentração de monóxido de carbono no forno aumenta. Por esse motivo, produtos com lançamentos altamente variáveis de gases geralmente não são feitos em fornos fechados por razão de segurança. Os lavadores de gás são utilizados para controlar as emissões com alta concentração de monóxido de carbono. Entretanto, esse gás pode ser utilizado na própria planta industrial para geração de energia, ou queimado, sendo que, a primeira opção tem uma crescente importância em termos de eficiência energética.

A Tabela 3.18 sumariza as principais vantagens e desvantagens de diferentes tipos de fornos.

Tabela 3.18 – Vantagens e desvantagens de diferentes tipos de fornos elétricos

Sistema de fundição	Ferro-liga produzido	Coleta e tratamento de gases	Vantagens	Desvantagens
Forno aberto com três eletrodos submersos	FeCr, FeMn, SiMn, FeSi, FeNi, Silício Metálico.	Exaustor e tratado utilizando filtros manga	<ul style="list-style-type: none"> *Design simples *Baixo investimento e custo de manutenção *Pode-se utilizar com quase todas as matérias-primas *Produção de água quente 	<ul style="list-style-type: none"> *Alto consumo de energia elétrica *Não recupera calor exceto pela água quente *Alto impacto ambiental devido ao volume dos gases de saída e o aquecimento do ar ambiente.
Forno aberto com um eletrodo submerso	Ferro-ligas especiais FeV, FeB	Exaustor e tratado utilizando filtros manga	<ul style="list-style-type: none"> *Design simples, alta flexibilidade de produção *Baixo investimento e custo de manutenção *Pode-se utilizar com quase todas as matérias-primas *Pode refundir os finos 	*O forno aberto com um eletrodo é normalmente utilizado na produção de ligas especiais em pequenas quantidades. As desvantagens citadas acima são, portanto, relativamente menores.
Forno semi-fechado com eletrodos submersos	FeCr, FeMn, SiMn, FeNi, FeSi, Silício Metálico, ferro ligas especiais	Exaustor e tratado utilizando filtros manga	<ul style="list-style-type: none"> *Alta flexibilidade de matérias primas *Recuperação de energia em eletricidade ou vapor *Produção de água quente *Menos gases de saída, menor casa de filtros *Facilidade no controle do processo de fundição *Impacto ambiental reduzido 	<ul style="list-style-type: none"> *Relativamente, alto consumo de energia *Sistema mais complexo *Alto custo de manutenção *Pode usar uma quantidade limitada de finos sem que haja aglomeração.
Forno fechado com arco submerso	FeCr, FeMn, SiMn, FeNi, ferro-ligas especiais		<ul style="list-style-type: none"> *Baixo impacto ambiental *Recuperação de energia do gás rico em CO, como combustível secundário *Baixo volume de gás de saída *Sistema simples 	<ul style="list-style-type: none"> *Grãos com maior tamanho, ou matéria prima aglomerada. *Gases de saída contém CO (explosivo e tóxico) *Águas residuais e lama devem ser tratados ou reutilizados
Forno fechado com arco submerso com forno de pré-aquecimento	FeCr	Forno selado com lavador de gás	<ul style="list-style-type: none"> *Baixo consumo de energia elétrica *Energeticamente eficiente *Baixo impacto ambiental *Aumenta a capacidade de produção do forno 	<ul style="list-style-type: none"> *Necessita de uma planta de peletização ou aglomeração *Alto custo de investimento *Baixa flexibilidade em matéria-prima *Sistema complexo.
Alto-Forno	HC FeMn	Forno Fechado	<ul style="list-style-type: none"> *Alta capacidade de produção *Gases de saída com alto poder calorífico *Recuperação de energia, completa utilização da energia dos gases de saída 	<ul style="list-style-type: none"> *Consumo de coque muito alto *Lavadores de gás *Alto custo de investimento *Planta complexa

Fonte: IPPC, 2001

Pode também ser utilizado um sistema de exaustão no canal de corrida para diminuir a emissão de poeira fugitiva. O gás coletado é, geralmente, filtrado por filtros de mangas, podendo ser filtrado em um filtro individual ou em conjunto com os outros gases coletados no forno.

A Figura 3.2 exemplifica um sistema de coleta de gases.

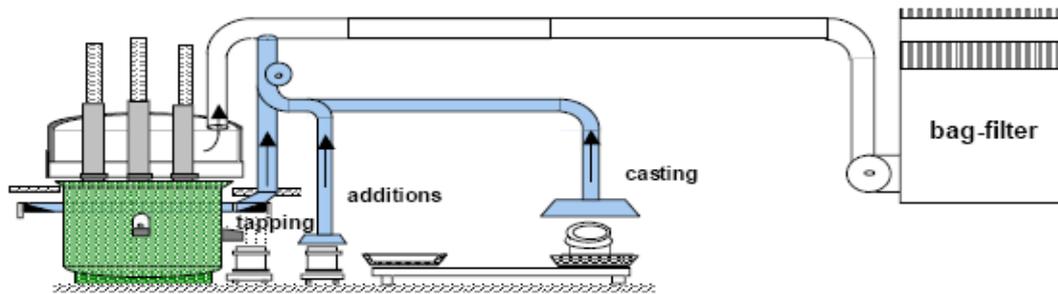


Figura 3.2: Sistemas de coleta de gases e material particulado

Fonte: IPPC, 2001

Os sistemas de controle de material particulado basicamente utilizados são: precipitadores eletrostáticos, ciclones, filtros de mangas, filtros de cerâmica e lavadores de gás, dentre os quais o filtro de mangas e os lavadores de gás são os mais utilizados.

As câmaras de filtração, se tratando de filtros manga, são, em muitos casos, filtros pressurizados com os ventiladores do lado do gás sujo. Desenvolvimentos recentes levaram à utilização de um sistema onde o gás é succionado por ventiladores do lado do gás limpo.

Lavadores de gás são sistemas utilizados em fornos fechados quando o gás precisa ser lavado ao mesmo passo em que a poeira é retirada em alta temperatura. As desvantagens de um lavador de gás são a emissão de poeira um pouco maior do que aquela retirada pelo filtro-manga, e também o fato de a água utilizada necessitar de um tratamento posterior.

3.4.3 Princípio de funcionamento de equipamentos de controle de gases e particulados

a) Ciclone

O princípio de operação do ciclone é a força centrífuga sobre as partículas sólidas em movimento num fluxo rotativo. Por ser mais intensa que a força gravitacional e que a coesão molecular, a força centrífuga empurra as partículas em direção às paredes do ciclone. Assim, elas perdem movimento e caem no fundo do ciclone, retirando-se do fluxo gasoso. Os ciclones podem ser dispostos em paralelo, constituindo os chamados multiciclones (Figura 3.3), essa configuração possibilita a utilização de células de alta eficiência com menores diâmetros e maiores velocidade de entrada do gás. (Batista, 2009).

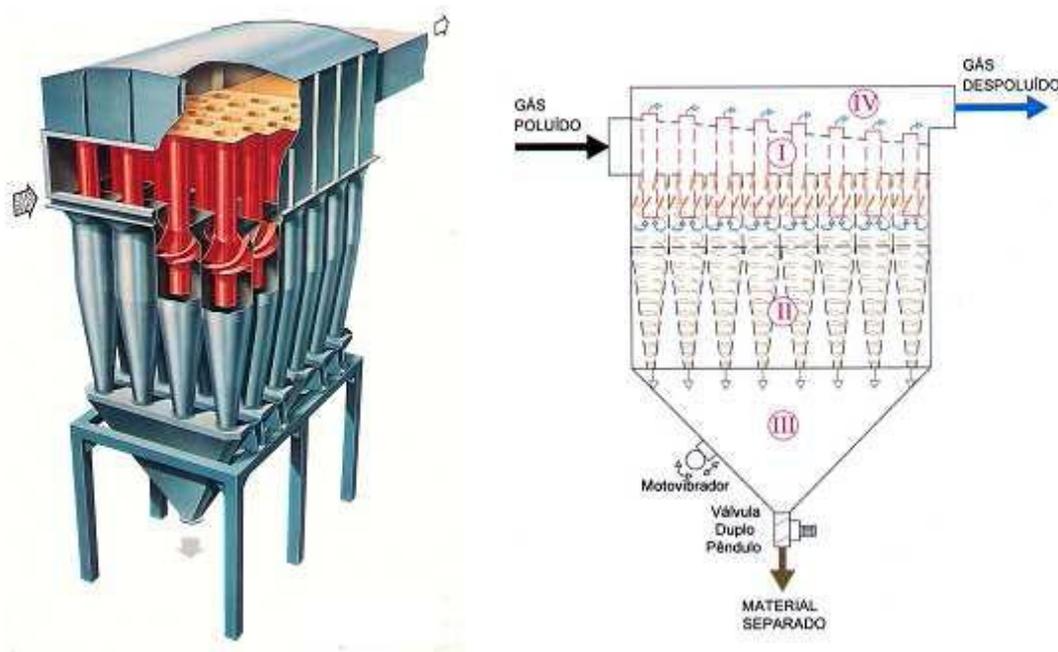


Figura 3.3: Separador multiciclônico

Fonte: Barreto Neto, 2007

Os ciclones são mais utilizados como pré-coletores, devido à sua limitação em relação à coleta de partículas com diâmetros superiores a 5 μm , e podem ser classificados segundo a sua eficiência e perda de carga da seguinte forma:

- Ciclones de baixa eficiência (convencionais)
Ciclones com perda de carga entre 50 e 100 mmH₂O

- Ciclones de média eficiência
Ciclones com perda de carga entre 100 e 200 mmH₂O
- Ciclones de alta eficiência (cone longo)
Ciclones com perda de carga maior que 200 mmH₂O

A coleta por meio do mecanismo da força centrífuga será tanto maior quanto maiores forem o diâmetro da partícula e sua velocidade tangencial e quanto menor o diâmetro do coletor.

Para especificação de um ciclone de entrada tangencial são requeridos oito parâmetros dimensionais, como mostrado na Figura 3.4. Estas dimensões são determinadas por relações adimensionais do tipo $K_a = a/D$, $K_b = b/D$ etc.

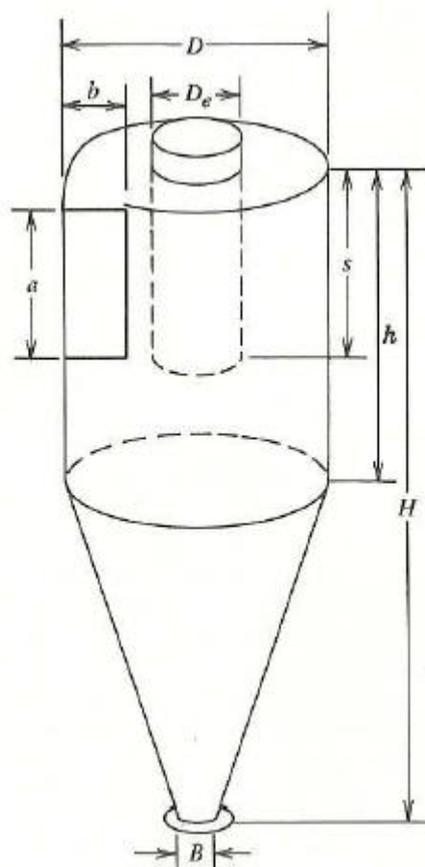


Figura 3.4: Formas e dimensões de um ciclone.

Fonte: Licht, 1984 (*apud* Batista, 2009).

Diferentes configurações são possíveis, mas devem manter-se as seguintes recomendações e relações conforme a Tabela 3.19, onde também estão descritos todos os parâmetros aqui mencionados.

$a \leq s$ para prevenir o curto-circuito dos particulados da seção de entrada até o tubo de saída;

$b \leq (D - D_e)/2$ para evitar excessiva queda de pressão;

$H \geq 3D$ para manter a ponta do vórtex (formado pelos gases) dentro da seção cônica;

Ângulo do cone de $\approx 7-8^\circ$ para permitir o deslizamento do pó;

$D_e/D \approx 0,4-0,5$, $H/D_e \approx 8-10$, e $S/D_e = 1$, para maximizar a eficiência.

Tabela 3.19 – Coeficientes adimensionais para o dimensionamento de ciclone por diferentes autores.

Termo	Descrição		Alta eficiência		Propósito geral	
			Stairmand	Swift	Swift	Peterson e Whitby
D	Diâmetro da seção cilíndrica		1	1	1	1
a	Altura da seção de entrada	ka:	0,5	0,44	0,5	0,583
b	Largura da seção de entrada	kb:	0,2	0,21	0,25	0,208
s	Comprimento do tubo de saída	ks:	0,5	0,5	0,6	0,583
De	Diâmetro do tubo de saída	kDe:	0,5	0,4	0,5	0,5
H	Altura total	kH:	4	3,9	3,75	3,17
h	Altura da seção cilíndrica	kh:	1,5	1,4	1,75	1,333
B	Diâmetro da saída do pó	kb:	0,375	0,4	0,4	0,5
K	Parâmetro de configuração		551,3	699,2	381,8	342,3
Nh	Carga de velocidade de entrada		6,4	9,24	8	7,76
Surf	Parâmetro de superfície		3,67	3,57	3,65	3,2

Fonte: Licht, 1984, e Lora, 2002 (apud Batista, 2009).

Um dos métodos para o cálculo da eficiência em ciclones de entrada tangencial é o proposto por *Lapple*. O método caracteriza a eficiência pelo “diâmetro crítico” ou pelo “diâmetro de corte”. O diâmetro crítico refere-se ao diâmetro da partícula que o

ciclone coleta com 100% de eficiência. Similarmente, o diâmetro de corte refere-se ao diâmetro da partícula coletado com 50% de eficiência. Estes podem ser obtidos pelas seguintes equações:

$$d_{(100)} = \left(\sqrt{\frac{18\mu_g b}{2\pi V_i \rho_p N_v}} \right) \times 10^6$$

$$d_{(50)} = \left(\sqrt{\frac{9\mu_g b}{2\pi V_i \rho_p N_v}} \right) \times 10^6$$

Sendo:

d crítico = $d(100)$ [μm]

d corte = $d(50)$ [μm]

μ_g = viscosidade do gás [$\text{kg/m}\cdot\text{s}$]

b = largura da entrada do ciclone [m]

V_i = velocidade do gás na entrada do ciclone, de 15 a 21 [m/s] (velocidade das partículas)

ρ_p = densidade da partícula [kg/m^3]

N_v = número de voltas do “vórtex” (3 a 10)

No caso de N_v , que se refere ao número de revoluções dadas pelas partículas no interior do ciclone, destaca-se que os maiores valores devem ser utilizados para ciclones de alta eficiência.

Cálculo de perda de carga em um ciclone:

$$\Delta P = \frac{12l \cdot h}{k \cdot d_a^2 \cdot \sqrt[3]{L/d} \cdot \sqrt[3]{L/d}}$$

Onde:

k é uma constante que depende das condições de entrada, sendo:

$k = 0.5$ para entrada simples sem guias;

$k = 1.0$ para entrada com guias retas;

$k = 2.0$ para entrada com guias expansoras.

d = diâmetro do ciclone (m);

l = largura do ciclone (m);

h = altura do ciclone (m);

L = comprimento da parte cilíndrica (m);

L' = comprimento da parte cônica (m);

d_d = diâmetro do duto de saída (m);

Muitas são as vantagens dos coletores ciclônicos, a saber: têm baixo custo, são de simples operação e projeto, apresentam poucos problemas de manutenção devido à simplicidade do equipamento, exigem relativamente pouco espaço para instalação, possuem baixa perda de carga, apresentam alta resistência à corrosão e à temperatura e possuem coleta a seco. Por outro lado, as principais desvantagens são: possuem baixa eficiência para partículas pequenas ($< 5\mu\text{m}$), em geral necessitam de segundo coletor para atender a emissão exigida, a eficiência desses coletores depende muito de condições operacionais (menor vazão implica em menor eficiência), existe a possibilidade de abrasão para determinadas partículas e velocidades e, no caso de altos-fornos, possuem a eficiência máxima observada em torno de 80%. (Batista, 2009).

b) Lavador de gases

Os lavadores são equipamentos projetados para incorporar as partículas de pó à gotícula de um líquido, determinado de acordo com a emissão a ser controlada, sendo que o mais utilizado é a água. As gotículas, de 50 a 500 μm de diâmetro, são produzidas e colocadas em contato com o material particulado, sendo então coletadas por mecanismos simples, tais como a própria gravidade, impacto em anteparos ou por ação ciclônica. Essas gotículas podem ser produzidas por um bico *spray*, pelo efeito de aspiração do fluxo gasoso cisalhando um filme de líquido ou pelo movimento de um rotor movido mecanicamente.

A relação líquido/gás é a relação entre o fluxo da água utilizado para a limpeza do gás e a vazão desse gás que está sendo limpo, geralmente, expressa em L/m^3 .

As principais variáveis para o bom desempenho de um lavador são a vazão de água, a perda de carga e a velocidade relativa entre a partícula de pó e a gota de água. A água de lavagem não deve conter sólidos, pois esses tendem a se acumular nos condutos ou nos bicos aspersores, restringindo o fluxo.

Além disso, os lavadores de alta energia como os do tipo Venturi, mais eficientes, podem ser utilizados apenas se o alto-forno operar com pressões compatíveis de topo que forneçam a queda de pressão necessária.

Em geral, as pressões de topo dos altos-fornos independentes oscilam entre 380 e 1.500 mmH₂O com média em torno de 800 mmH₂O, sendo suficiente para operar um lavador venturi. O lavador de média energia exige uma perda de carga entre 250 e 380 mmH₂O (9,8N/m²), enquanto que o de alta energia pode chegar a 1.500 mmH₂O (9,8N/m²).

Semrau desenvolveu uma teoria empírica que relata a perda de pressão total (P_T) do sistema para eficiência de coleta. Matematicamente, segundo essa teoria, as expressões são (Suhara, 1992):

$$P_T = P_G + P_L \quad (\text{hp} / 1000 \text{ acfm})$$

Onde:

P_T = energia total de contato (hp/1000 acfm)

P_G = energia para fluxo de gás (hp/1000 acfm)

P_L = energia para injeção de líquido (hp/1000 acfm)

A energia gasta para movimentar o gás através do sistema, P_G , é expressa em termos da perda de carga do lavador:

$$P_G = 0,1575 \cdot \Delta p \quad (\text{hp} / 1000 \text{ acfm})$$

Onde:

Δp = perda de pressão (pol. H₂O (249 N/m²))

$acfm^1 = 0,03 \text{ (m}^3/\text{min)}$.

A energia gasta no fluxo líquido (P_L) é expressa como:

$$P_L = 0,583 \cdot P_1 \cdot \left(\frac{Q_L}{Q_G} \right) \quad (\text{hp}/1000 \text{ acfm})$$

Onde:

P_1 = pressão de entrada do líquido (lb/po²)(0,0703 kgf/cm²)

Q_L = vazão de líquido (gal/min)(0,06 L/s)

Q_G = vazão de gás (pé³/min)(0,03 m³/min)

As constantes dadas nas expressões para P_G e P_L incorporam os fatores de conversão. A energia total pode, portanto, ser expressa como:

$$P_T = P_G + P_L$$

$$P_T = 0,1575 \cdot \Delta p + 0,583 \cdot P_1 \cdot \left(\frac{Q_L}{Q_G} \right) \quad (\text{hp}/1000 \text{ acfm})$$

Semrau correlaciona a eficiência do lavador por meio da fórmula:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\alpha \cdot P_T^\beta\right)$$

Onde:

α e β = constantes empíricas que são determinadas experimentalmente que dependem da característica do material particulado.

A Tabela 3.20 especifica os valores de α e β , respectivamente, para diferentes indústrias. As fórmulas citadas anteriormente permitem obter a eficiência do lavador a partir de dados obtidos facilmente em campo, o que torna as fórmulas interessantes e práticas.

¹ $acfm$ = actual cubic feet per minute, cujo valor equivalente no sistema métrico corresponde a 0,03 m³/minuto.

Tabela 3.20 – Constantes empíricas α e β

Efluente	Tipo de Lavador	α	β
Gás sujo	Venturi e <i>spray</i> ciclônico	1,47	1,05
Gás pré-lavado	Venturi e <i>spray</i> ciclônico	0,915	1,05
Pó de talco	Venturi	2,97	0,362
Licor negro	Venturi e <i>spray</i> ciclônico	1,75	0,62
Fumo de forno			
Gases úmidos			
Fumos quentes		0,74	0,861
Licor negro quente	Venturi	0,522	0,861
Mistura gasosa de ácido fosfórico		1,33	0,647
Pó de forno cubilo de fundição		1,35	0,621
Aciaria		1,26	0,569
Fumo de forno		1,26	0,569
Forno de ferro silício	Venturi e <i>spray</i> ciclônico	0,87	0,459
Mistura de gases com odores	Venturi	0,363	1,41

Fonte: Semrau apud Suhara(1992)

c) Lavador tipo Venturi

Os lavadores tipo Venturi são também chamados de “lavadores gás-atomizador”. Nesses equipamentos, demonstrados nas figuras 3.5 e 3.6, os gases, ao passar através de uma constricção na parte superior (garganta), têm sua velocidade aumentada, segundo Jacomino *et al.*(1999), na ordem de 60 a 120 m/s, o que faz com que a água injetada na entrada do equipamento seja atomizada em quantidades que variam de 0,4 a 1,0 cm³/m³, gotas cujo tamanho médio pode ser estimado na faixa de 50 μ m. As partículas sólidas são coletadas por impacto, interceptação e condensação.

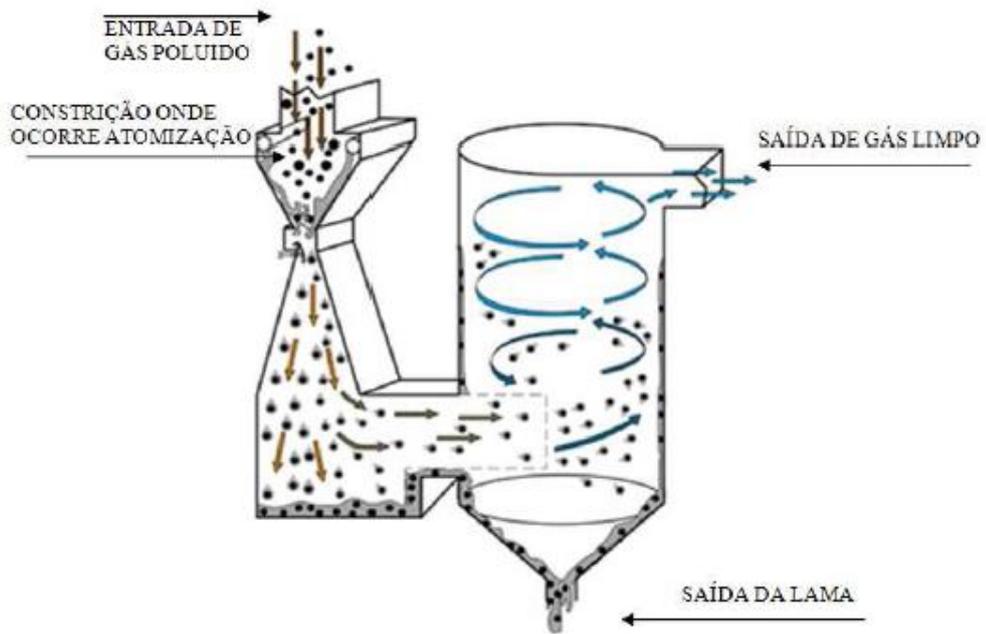


Figura 3.5 – Esquema de um lavador Venturi

Fonte: Jacomino *et al.*, 1999.

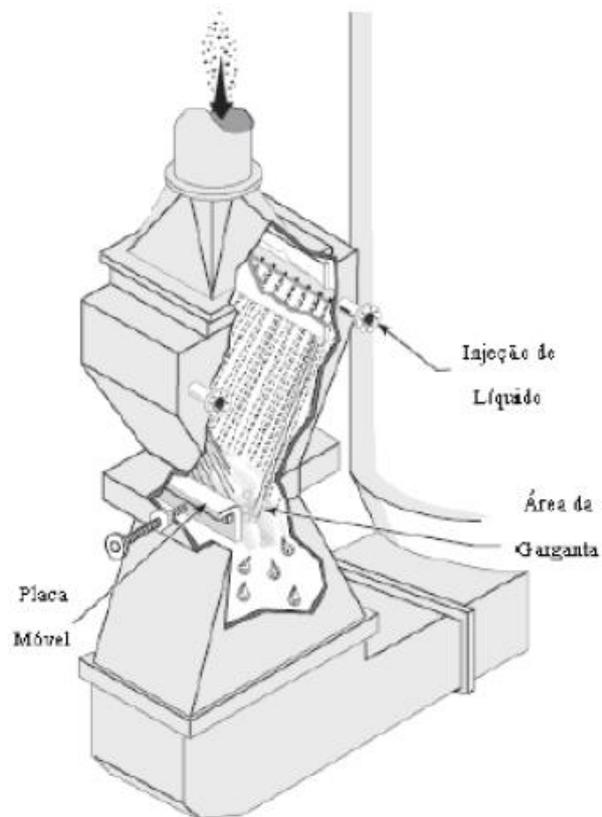


Figura 3.6 - Lavador Venturi com garganta ajustável

Fonte: Meile, 2006

O lavador Venturi apresenta alta eficiência de coleta e alta perda de carga. Suas principais características são apresentadas na Tabela 3.21.

Tabela 3.21 – Principais características de um lavador Venturi.

Parâmetro	Faixa
Vazão do gás	95 a 68400 L/s
Velocidade na garganta	60 a 183 m/s
Perda de carga	250 a 750 mmH ₂ O
Eficiência	98% ≥ 1µm

Fonte: Higa, 1986.

Uma das formas de calcular a perda de carga em um lavador Venturi é citada por Suhara (1992) sendo:

$$P = 0,85 \times 10^{-3} V_g^2 \frac{QL}{QG}$$

P = perda de carga (cmH₂O) (98 N/m²)

V_g = velocidade do gás na garganta (cm/s)

QG = relação líquido/gás (adimensional)

QL = vazão do líquido

d) Filtro de Manga

Este sistema é um dos métodos mais antigos de remoção de partículas de um fluxo gasoso, podendo apresentar alta eficiência para uma ampla faixa de tamanhos de partículas. O sistema parte do princípio básico de forçar a passagem das partículas coletadas por um meio poroso, provocando a retenção das mesmas.

A separação se processa de acordo com as leis dos efeitos de peneiramento, inércia e restrição. As partículas depositadas no tecido, em geral, são menores do que os poros do tecido, logo a filtração não é um simples processo de peneiramento.

Durante a separação de uma partícula de pó nas fibras do meio filtrante, os processos de interação entre forças de inércia, massa, difusão e eletrostática atuam

com grande intensidade. Entende-se como força de inércia as forças de gravidade, as quais podem ser efetivas com partículas maiores de $1\mu\text{m}$.

Além desses mecanismos, existem ainda forças de aderência mútua entre as próprias partículas e entre as partículas e os fios, as quais influenciam o grau de separação.

A utilização de dispositivos de separação de partículas do meio gasoso a base de filtros vem crescendo de forma acentuada devido à sua eficiência (podendo separar partículas menores de $1\mu\text{m}$ de diâmetro). Na prática, vem sendo notado que a maioria das instalações do setor de ferroligas no Estado de Minas Gerais optou pela utilização deste tipo de filtro, por ser um processo a seco, não havendo águas residuárias, portanto não havendo problemas resultantes com o tratamento desses efluentes.

O meio poroso pode ser composto de material granulado ou fibroso, podendo ser disposto na forma de leitos, compactado em painéis ou na forma de tecido.

As dimensões dos filtros devem ser superiores ao que foi dimensionado no projeto para a área efetiva de filtragem, considerando um fator determinado, de forma a possibilitar uma operação mais segura, sem muitas interrupções para manutenção. Os custos adicionais, no caso da utilização de áreas filtrantes maiores, são compensados pela economia relativa ao desgaste e a manutenção das peças, evitados, em decorrência da vida útil mais prolongada do material filtrante.

Na escolha do material filtrante deve ser levado em consideração o processo utilizado, pois os gases podem, devido ao efeito sinérgico, despolimerizar o material filtrante, fazendo-o dilatar pela umidade, endurecer, entupir ou decompor.

Na confecção das mangas, podem ser utilizados materiais como a poliácridonitrila, o polipropileno, a poliamida, o nomex (polímero derivado do nylon), o teflon, de fibras de aço e de tecidos, sendo que deve ser feita uma análise do gás a ser filtrado e do custo de implantação. O material mais utilizado é o de poliéster devido à elevada

resistência a temperatura altas e a ácidos, porém, sua resistência em um meio básico e úmido é baixa.

A eficiência do filtro varia no início do funcionamento de, aproximadamente, 60 para 90% devido à deposição de partículas na manga. Ela também depende da velocidade de filtração, da quebra das camadas de poeira, da deposição heterogênea das partículas e das características do tamanho das partículas.

No projeto de dimensionamento do filtro de mangas, as variáveis de projeto que devem ser levadas em consideração são:

- perda de pressão
- arraste do filtro
- relação ar / tecido
- eficiência de coleta
- condicionamento do efluente gasoso

- Perda de pressão

À medida que o material particulado se deposita sobre as mangas é dificultada a passagem do gás através delas e, conseqüentemente, a perda de carga do sistema aumenta, exigindo um gasto de energia maior por parte do sistema de ventilação. Para evitar um gasto excessivo de energia e o acúmulo de material particulado na manga, o material depositado deve ser removido em intervalos regulares, mantendo assim a variação da perda de carga do sistema em uma faixa constante.

O comportamento da variação de perda de carga pode ser visto na Figura 3.7. À medida que a poeira vai se depositando no filtro, a perda de carga vai aumentando gradativamente até atingir um valor máximo, quando o sistema de limpeza é acionado e a poeira coletada é descarregada.

Porém, como nem todas as partículas são descarregadas, o reinício se dá com um residual de perda de carga por meio da camada de pó depositado (Δp_d) de acordo com a equação:

$$\Delta p = \Delta p_0 + \Delta p_d$$

Onde:

Δp = pressão máxima -ponto de limpeza

Δp_0 = pressão mínima (cmH₂O)

Δp_d =variação entre o ponto máximo e mínimo (cmH₂O)

$$\Delta p_d = K_1 v_f q$$

Sendo:

Δp_d = Perda de pressão através do tecido limpo (cmH₂O)

v_f = Velocidade de filtragem (cm/s)

K_1 = fator básico de resistência da camada de poeira no tecido (cmH₂O/cm.s)

q = carga de poeira;

O fator K_1 depende, principalmente, da espessura da camada de poeira, do tipo de tecido e da freqüência do acionamento do mecanismo de limpeza e são tabelados.

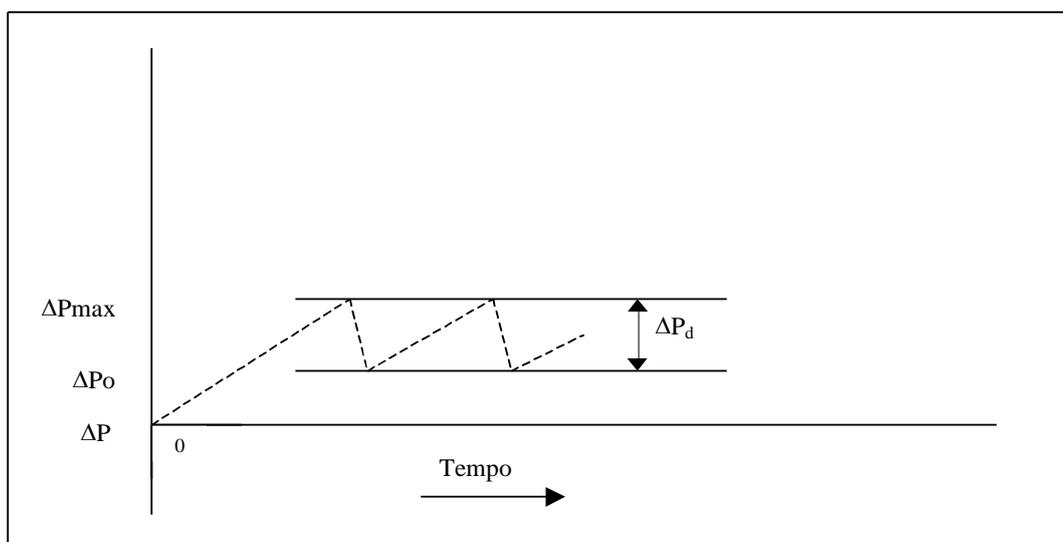


Figura 3.7. Variação temporal da perda de carga.

- Arraste do filtro

O arraste consiste da resistência do filtro através da camada de poeira e do tecido:

$$S = \Delta P / V_f \text{ [kPa/ (cm/s)]}$$

ΔP = perda de carga através do filtro e da massa de material [kpa] V_f = velocidade de filtragem [cm/s].

- Relação ar / tecido

Esta relação, também chamada de velocidade de filtragem ou taxa de filtração, ou seja, a quantidade de gases (m³) passará por de área filtrante (m²). A importância dessa variável está no fato de que ela determinará a quantidade de mangas e o tamanho do filtro.

A velocidade de filtragem é dada pela fórmula:

$$V_f = Q/A_C \text{ (cm/s)}$$

Q = vazão do efluente gasoso (cm³/s)

A_C = área do tecido (cm²)

A relação ar / tecido (A/C) varia de acordo com o projeto do filtro com agitação ou ar reverso como mecanismos de limpeza.

- unidades com agitação: (A/C) < 3:1 (cm³/s)/cm²
- unidades com ar reverso: (A/C) < 1,5 (cm³/s)/cm²
- unidades com jato pulsante: 2,5:1 < (A/C) < 10:1 (cm³/s)/cm²

O equipamento com um bom projeto pode alcançar eficiências elevadas, podendo atingir valores de até 99,99%.

- Métodos de limpeza do filtro manga

Existem várias formas de remoção de material particulado acumulado nas mangas, esses métodos podem ser:

Por agitação mecânica e raspagem das mangas - As mangas são agitadas mecânica ou manualmente;

Por ondas sonoras de baixa frequência - Uma fonte sonora emite ondas fazendo as mangas vibrarem;

Por meio de colapso das mangas - Diferenciais de pressão provocam colapso das mangas, desalojando a poeira coletada;

Por jato reverso - Um anel perfurado sopra, continuamente, ar em sentido inverso, em volta da manga;

Por fluxo reverso - Faz-se uma inversão do sentido do fluxo gasoso, insuflando ar comprimido sob pressão, por meio de bocais, nas extremidades das mangas.

O método por fluxo reverso é o mais utilizado, sendo que a limpeza é realizada ininterruptamente, ou seja, enquanto uma das mangas está sendo limpa, as outras estão funcionando, completando um ciclo. Alguns métodos citados acima estão ilustrados nas Figuras 3.7 a 3.9.

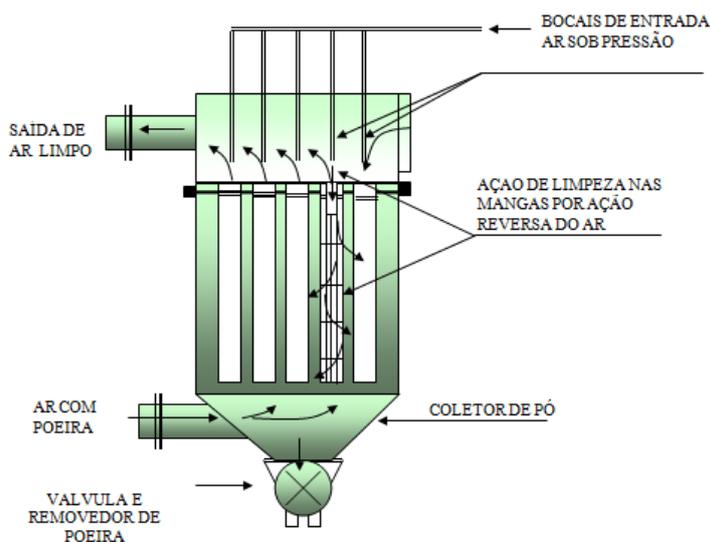


Figura 3.7: Sistema de limpeza por ar reverso

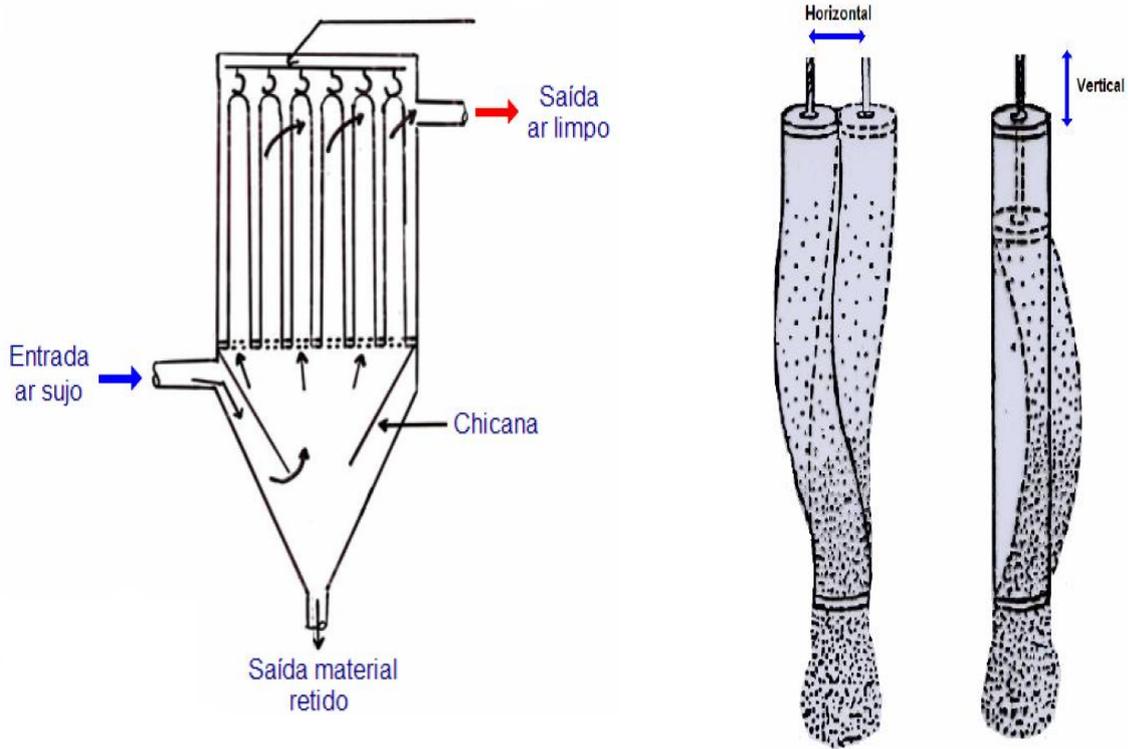


Figura 3.8: Sistema de limpeza mecânica por sacudimento

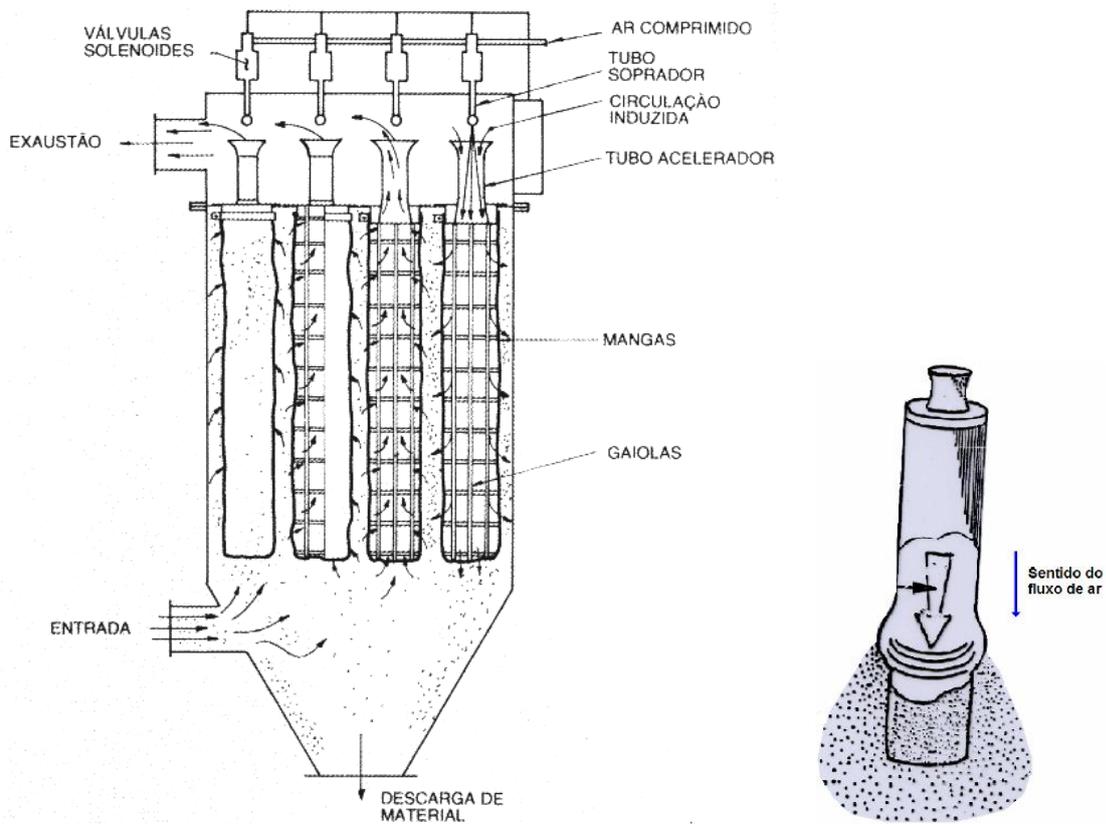


Figura 3.9: Sistema de limpeza por jato pulsante

3.4.4 Sistemas de tratamento de água

Na produção de ferroligas, as contaminações de água, assim como a determinação do método de tratamento, são muito dependentes do processo produtivo adotado e dos tipos de ferro-liga produzidos.

O reciclo e a reutilização de água são processos adotados nas plantas de ferroligas, sendo que o reciclo envolve a recirculação da água no processo onde ela foi gerada, enquanto a reutilização de um efluente significa utilizar água contaminada gerada em um processo em outro processo diferente.

Qualquer quantidade de água contaminada que não possa ser reutilizada ou recirculada deve passar por tratamentos específicos para reduzir a concentração de poluentes como metais pesados, substâncias ácidas e partículas sólidas.

Os principais processos utilizados são a precipitação físico-química, sedimentação e filtração. São comuns, também, os usos de eletrólise e de filtração com carvão ativado.

A escolha do processo de tratamento utilizado para reduzir a concentração dos poluentes depende fortemente do processo produtivo, da vazão de efluente gerada, do tipo de poluentes e de suas concentrações, além do nível de tratamento a ser atingido (concentração máxima de poluentes) que está relacionado ao uso posterior do efluente tratado e da disponibilidade de água.

A precipitação físico-química é utilizada, principalmente, para remover íons metálicos dissolvidos no efluente líquido. O processo de tratamento consiste na adição de reagentes como cal, hidróxido de sódio, entre outros, para formar precipitados dos metais pesados, uma vez que a maioria dos hidróxidos de metais pesados é insolúvel. Pode ser utilizado um agente coagulante ou floculante para formar flocos maiores, a fim de facilitar a separação sólido-líquido por meio de filtração ou sedimentação.

A sedimentação é uma técnica que utiliza a gravidade como princípio de separação sólido-líquido. Ela pode ser realizada em tanques denominados de sedimentação, de espessadores, de clarificadores, entre outros.

A técnica da filtração é, normalmente, utilizada para separação sólido-líquido em uma etapa final de clarificação no sistema de tratamento de água. O filtro, em geral, é constituído de um meio filtrante por onde o líquido atravessa e as partículas sólidas ficam retidas. O tipo de filtro deve ser escolhido de acordo com a granulometria do material a ser retido.

O carvão ativado, devido a sua principal característica de adsorção, que é um dos vários tipos de meio filtrante, é um material altamente poroso, geralmente, utilizado para remover compostos orgânicos da água. A Tabela 3.22 mostra as principais vantagens e desvantagens de cada processo de tratamento dos efluentes líquidos gerados no setor de ferroligas.

Para uma melhor utilização dos recursos hídricos em uma planta de ferro-liga, devem ter-se sempre em mente os seguintes pontos:

- Ciclos de água em circuitos fechados são convenientes para os processos onde se utilizam lavadores de gás, sistemas de resfriamento e em processos de granulação.
- A água purgada de ciclos em circuito fechados deve ser tratada para remoção de partículas e compostos metálicos.
- A água tratada deve ser reciclada e reutilizada o máximo possível no processo produtivo ou nos sistemas de apoio da planta industrial

Tabela 3.22 – Vantagens e desvantagens dos processos de tratamento de água

Técnica de Tratamento	Vantagens	Desvantagens
Precipitação	<ul style="list-style-type: none"> *Técnica simples e barata *Longo histórico de sucesso na utilização *Não necessita de alto investimento em uma nova planta *Capaz de tratar uma grande variedade de metais contaminantes, particularmente se dois estágios de precipitação com hidróxido e sulfetos são utilizados *Sob condições corretas podem alcançar excelentes níveis de remoção de metais *Precipitados podem ser retornados à alimentação 	<ul style="list-style-type: none"> *Efluentes ácidos podem ser difíceis de tratar *Não é seletivo, grandes quantidades de água na lama, que é composta de um <i>mix</i> de metais tóxicos e não tóxicos *A lama provavelmente tem de ser aterrada, talvez a um alto custo *A presença de outros sais, compostos orgânicos complexantes e solventes podem comprometer a eficiência da precipitação *Nem sempre pode ser utilizado para tratamento de resíduos com baixa concentração
Sedimentação	<ul style="list-style-type: none"> *Técnica simples e barata *Longo histórico de sucesso na utilização 	<ul style="list-style-type: none"> *Pode remover somente partículas sólidas *Para partículas com baixa diferença de densidade com a água a sedimentação toma um longo tempo e são necessárias bacias muito largas
Filtração	<ul style="list-style-type: none"> *Técnica simples e barata *Longo histórico de sucesso na utilização 	<ul style="list-style-type: none"> *Pode remover somente partículas sólidas *A eficiência da filtração diminui se as partículas são muito finas *Eficiência da filtração diminui com o aumento da velocidade
Flotação	<ul style="list-style-type: none"> *Técnica simples e barata *Longo histórico de sucesso na utilização 	<ul style="list-style-type: none"> *Pode remover somente complexos cujas partículas sólidas são flotáveis *Ar necessita ser dissolvido pressurizado em água para ser disperso
Ultra filtração	<ul style="list-style-type: none"> *Técnica simples *Partículas muito finas, até moléculas podem ser removidas *Membranas muito finas podem filtrar solutos tão pequenos quanto metais *Emissão de particulados praticamente nula 	<ul style="list-style-type: none"> *Fluxo e velocidade de filtração são limitados *Membranas podem se decompor rapidamente em efluentes corrosivos *Não separa metais *Membranas velhas podem se romper

Fonte: IPPC, 2001.

Tabela 3.22 – Vantagens e desvantagens dos processos de tratamento de água (continuação)

Técnica de Tratamento	Vantagens	Desvantagens
Eletrólise	<ul style="list-style-type: none"> *Pode ser utilizado para recuperar e reciclar metais *Pode ser utilizado para tratar efluentes concentrados em um único estágio *Tecnologia mais disponível *Pode ser utilizado para tratar contaminantes orgânicos simultaneamente *Pode ser feito em batelada ou em fluxo contínuo 	<ul style="list-style-type: none"> *Níveis de poluentes abaixo de ppm são difíceis de alcançar *Células ineficientes têm alto custo para manter e operar *Altos potenciais elétricos são perigosos *Eletrólise não é seletiva *Necessita de constante monitoramento
Eletro diálise	<ul style="list-style-type: none"> *Pode ser utilizado para recuperar e reciclar metais *Pode ser seletiva *É capaz de atingir níveis de contaminantes de sub-ppm 	<ul style="list-style-type: none"> *Eletro diálise tem as mesmas desvantagens da osmose reversa *Membranas podem romper facilmente *Necessita de constante monitoramento
Carvão ativado	<ul style="list-style-type: none"> *Pode ser utilizado em uma gama ampla de aplicações *Pode ser colocado depois da coagulação e sedimentação como uma camada em filtros de areia 	<ul style="list-style-type: none"> *Carvão ativado tem um custo alto *Altas emissões de SO₂ no processo de fabricação do carvão ativado
Osmose reversa	<ul style="list-style-type: none"> *Praticamente zero de emissão *Tecnologia e equipamentos disponíveis comercialmente *Pode ser utilizado para reciclagem de materiais *Pode ser operado em modo contínuo ou em batelada *Pode ser utilizado com uma grande variedade de concentrações de metal *Pode ser utilizado para remover componentes orgânicos *Eficácia não depende muito da concentração de contaminantes não corrosivos 	<ul style="list-style-type: none"> *Fluxo e velocidade de filtração são limitados *Membranas podem se decompor rapidamente em efluentes corrosivos *Não separa metais *Membranas velhas podem se romper *Equipamento especializado possui alto custo *Utiliza altas pressões
Troca iônica	<ul style="list-style-type: none"> *Reagentes comercialmente disponíveis *Experimentado e testado em aplicações industriais (exemplos são as recuperações de rênio e selênio) *Capaz de atingir níveis de contaminação de ppb *Pode ser seletivo para metais pesados *Pode ser aplicado em fluxo contínuo ou batelada 	<ul style="list-style-type: none"> *Não pode ser utilizada com altas concentrações de metal *A troca iônica tradicional não é seletiva *Trocador gasto deve ser descartado como um resíduo tóxico *A matriz se decompõe com o tempo *Desempenho sensível ao pH *Trocadores iônicos seletivos ainda não têm utilização industrial *Pode ser necessário longo tempo de contato

Fonte: IPPC, 2001.

RECUPERAÇÃO DE ENERGIA

4 RECUPERAÇÃO DE ENERGIA

A produção de ligas de ferro é um processo que demanda elevada quantidade de energia, devido à necessidade de altas temperaturas para a redução do óxido do metal e para a fundição. A qualidade da matéria prima e seu pré-tratamento são fatores que afetam o consumo de energia.

Em fornos semi-fechados, a alta temperatura dos gases de saída do forno pode ser aproveitada para produzir vapor superaquecido em um trocador de calor, sendo que esse vapor pode ser vendido ou utilizado para produzir energia elétrica.

Os fornos fechados produzem grande quantidade de monóxido de carbono (CO), que é um gás combustível que pode ser utilizado para produção de energia elétrica. O calor dos gases quentes também pode ser aproveitado para pré-aquecer a matéria prima antes da entrada no forno, o que proporciona economia energética na operação do equipamento.

O processo de resfriamento do gás quente que sai do forno é uma técnica importante para proteger o sistema de filtros e, em muitos casos, a recuperação do calor dos gases do forno pode ser realizada nesta etapa.

A Tabela 4.1 mostra as possibilidades de recuperação de energia e o uso da energia recuperada.

Tabela 4.1 – Técnicas para recuperação de energia na indústria de ferroligas

Tipo de Liga de Ferro	Tipo de Forno	Fonte de Energia	Técnica de Recuperação de Energia
FeCr	Fechado	Gás CO	*Produção de energia elétrica *Utilização do CO como combustível em plantas vizinhas *Queima para secagem, sinterização, pré-aquecimento etc. *Uso em uma indústria integrada de FeCr e aço inox
	Semi-fechado	Calor	*Produção de energia elétrica *Produção de vapor a alta pressão para utilização em outro processo *Produção de água quente
FeSi e Silício Metálico	Semi-fechado	Calor	*Produção de energia elétrica *Utilização do CO como matéria-prima em plantas vizinhas *Produção de água quente
FeMn SiMn	Fechado	Gás CO	*Produção de energia elétrica *Utilização do CO como combustível em plantas vizinhas *Queima para secagem, sinterização, pré-aquecimento etc.
FeMn SiMn	Semi-fechado	Calor	*Produção de energia elétrica *Produção de vapor a alta pressão para utilização em outro processo *Produção de água quente
FeNi	Semi-fechado	Calor	*Produção de energia elétrica *Produção de vapor a alta pressão para utilização em outro processo *Produção de água quente
FeV FeMo FeW FeTi FeB FeNb	Ligas especiais são normalmente produzidas em pequenas quantidades quando comparadas as outras ligas. O processo de fundição é feito em batelada em um cadinho com revestimento refratário. A reação metalotérmica é exotérmica e o calor é utilizado como fonte de energia para o processo que, em alguns casos, necessita de apenas alguns minutos. A recuperação do excesso de energia do processo é difícil e não justifica o alto investimento.		

Fonte: IPPC, 2001

DIAGNÓSTICO DO SETOR

5 DIAGNÓSTICO DO SETOR

Neste estudo, a metodologia utilizada para realizar o diagnóstico do setor de produção de ferroligas no Estado de Minas Gerais, foi o desenvolvimento de um questionário padronizado especificamente para essa tipologia industrial, cujo modelo se encontra no Anexo I. Durante as visitas técnicas realizadas pela equipe da FEAM, em todos os empreendimentos existentes no Estado, este questionário foi aplicado.

Os dados obtidos foram compilados em planilhas do programa *Excel*. Os resultados consolidados serão apresentados ao longo deste capítulo.

Todas as informações presentes neste capítulo foram obtidas da aplicação do questionário, e foram fornecidas pelos empreendimentos, no ano de 2010.

5.1 Produção

Os empreendimentos do setor de ferroligas estão distribuídos no Estado de Minas Gerais conforme é apresentado no mapa da Figura 5.1, onde estão discriminados por tipo de ferroliga produzida. O setor é composto por 22 empreendimentos. A distribuição do número de empreendimentos por tipo de liga produzida é apresentada na Tabela 5.1, enquanto que na Tabela 5.2 é apresentada a capacidade mensal de produção dos empreendimentos.

Tabela 5.1 – Distribuição do número de empreendimentos por tipo de liga produzida

Tipo de Liga	Número de empreendimentos
Si	6
Fe-Si	7
Ca-Si	3
CaC ₂	1
Fe-P	1
Fe-Nb	1
Fe-Mn	4
Fe-Si-Mn	5
Mg	2

Tabela 5.2 – Capacidade mensal instalada do setor de ferroligas em toneladas por tipo de liga

Empresa	Número de fornos	Liga								
		Si	Fe-Si	Ca-Si	CaC2	Fe-P	Fe-Nb	Fe-Mn	Fe-Si-Mn	Mg
1	2								1.455	
2	3								4.881	
3	1							210		
4	6	2.117,52		1.265,22						525
5	1		1.560							
6	2	2.400								
7	1				6.000					
8	6	1.620	4.920							
9	5	5.220								
10	3			2.610						
11	4	1.035	1.380	1.035						450
12	1								540	
13	1							210		
14	1							180		
15	1		810							
16	3		3.750							
17	2						14.400			
18	2		1.020							
19	7							1.500	4.230	
20	2								1.299,9	
21	2					120				
22	4	3.270	3.582							
TOTAL	60	15.662,52	17.022	4.910,22	6.000	120	14.400	2.100	12.405,9	975

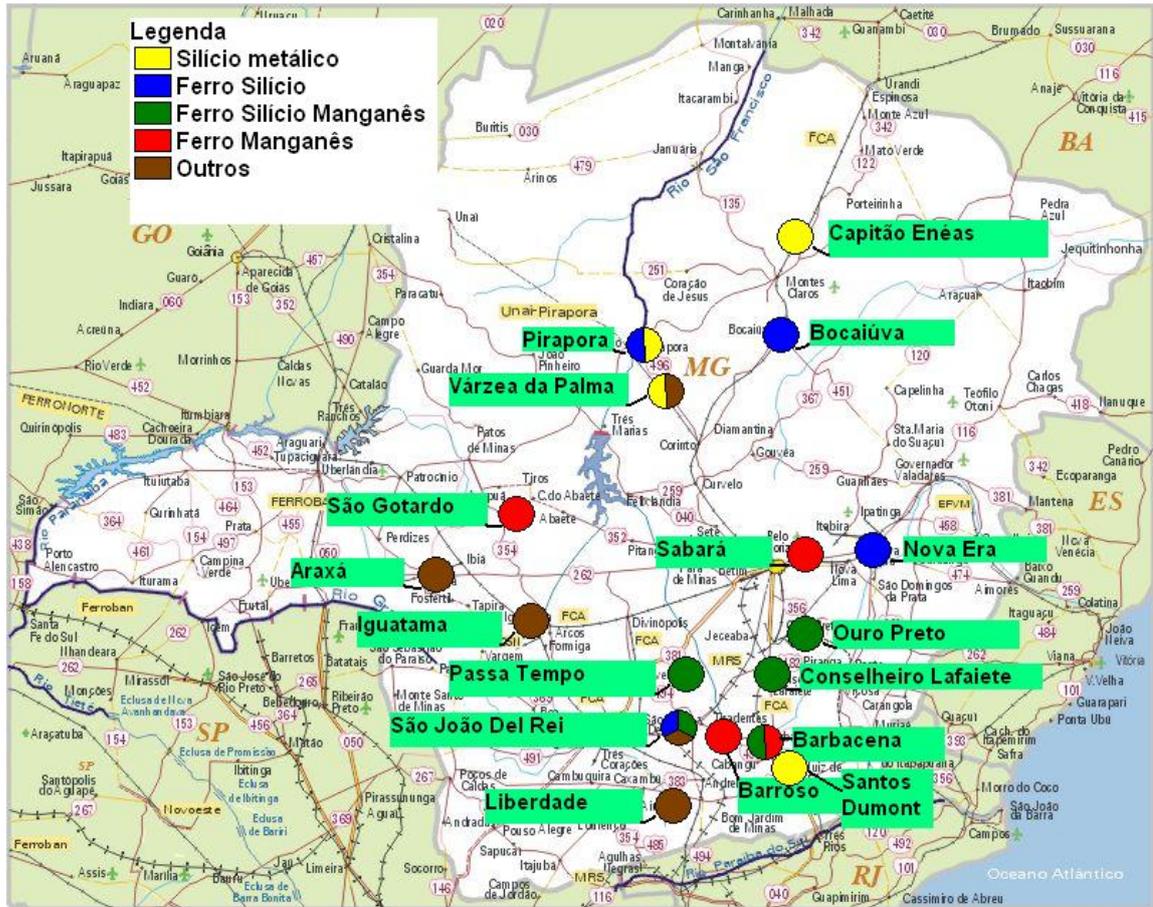


Figura 5.1: Distribuição geográfica dos empreendimentos do setor de ferroligas e silício metálico em Minas Gerais

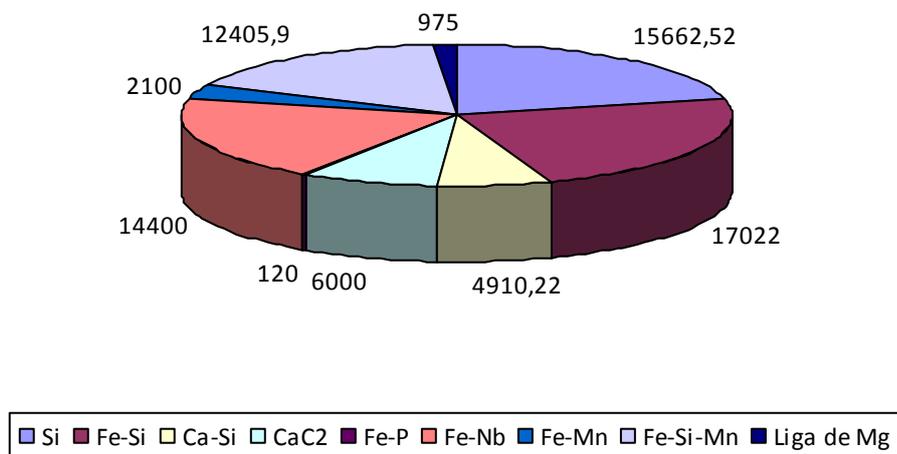


Figura 5.2: Capacidade mensal instalada (t/mês) do setor de ferroligas

Observa-se que a maior capacidade instalada é a do setor de ferro-silício, seguida pelos setores de silício metálico e ferro-nióbio. A Figura 5.3 demonstra esses resultados, expondo o número de fornos por liga produzida. O número de fornos produtores de ferro-nióbio é reduzido, posto que apenas uma empresa atua no setor.

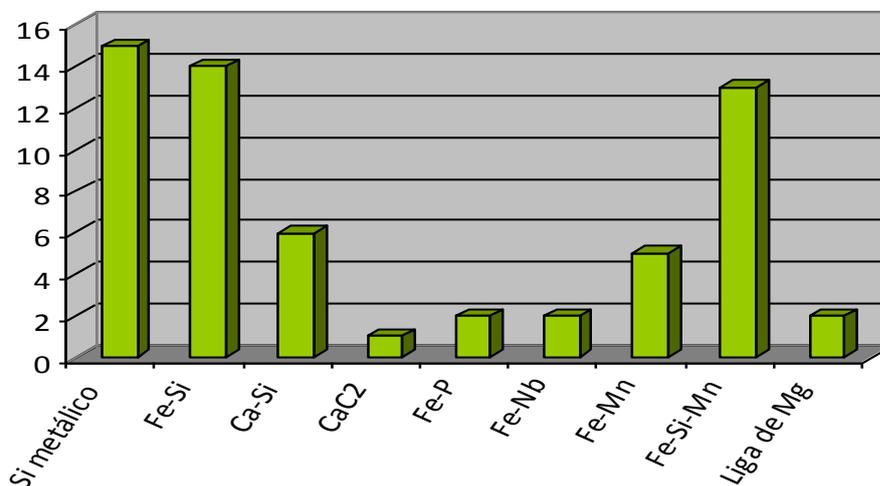


Figura 5.3: Número de fornos por liga produzida

O produto ferroligas é destinado tanto ao mercado interno quanto ao externo. Nas Figuras 5.4 a 5.9 são apresentados os gráficos relativos ao percentual de ferroligas destinados a esses mercados, conforme os dados obtidos nos questionários preenchidos pelos empreendimentos.

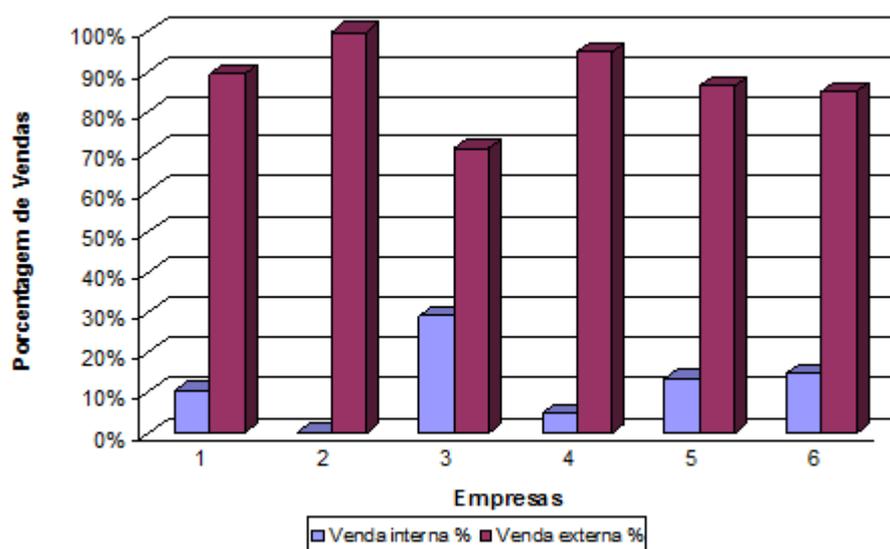


Figura 5.4: Distribuição de vendas no mercado interno e externo de silício metálico

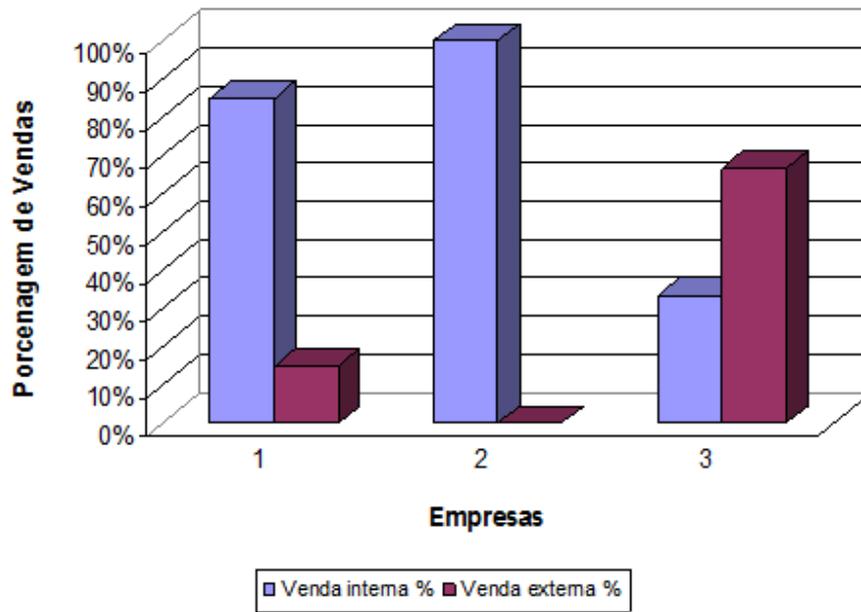


Figura 5.5: Distribuição de vendas no mercado interno e externo de ligas de magnésio

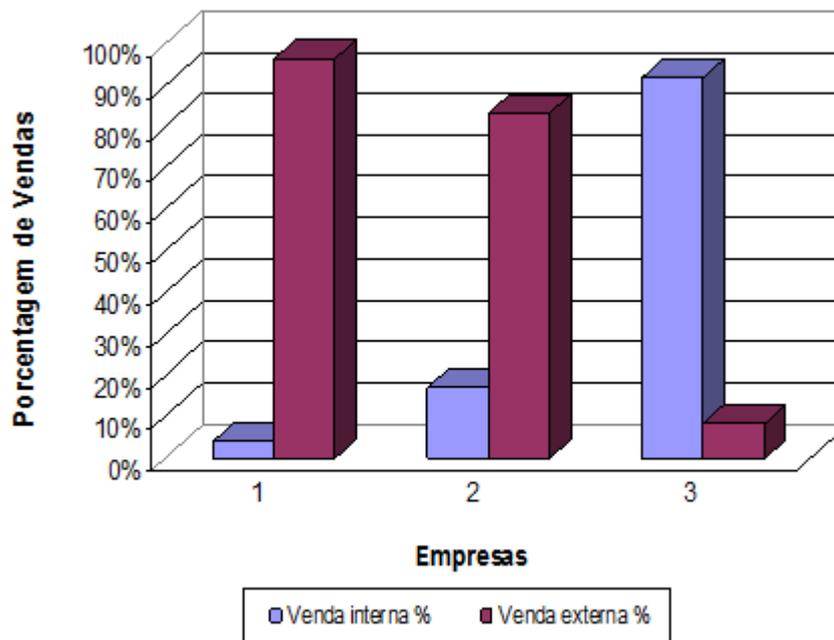


Figura 5.6: Distribuição de vendas no mercado interno e externo de cálcio silício

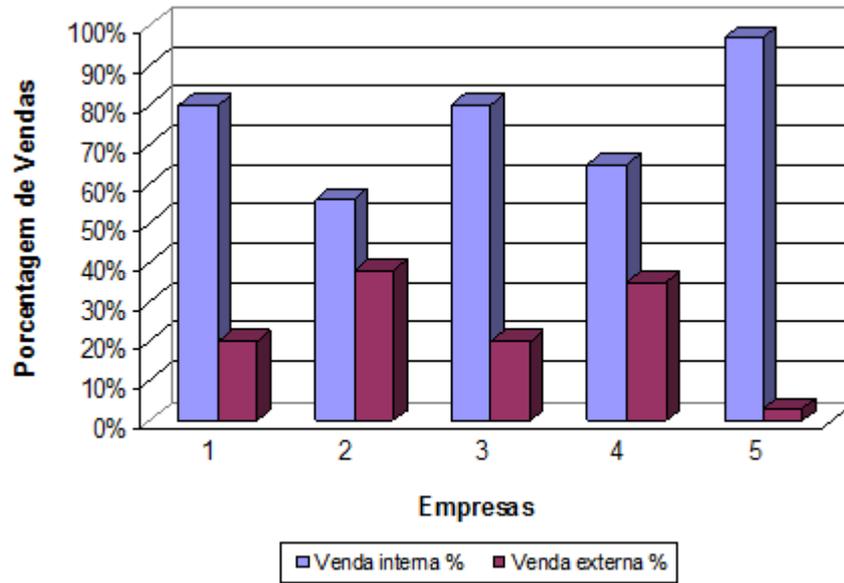


Figura 5.7: Distribuição de vendas no mercado interno e externo de ferro-silício-manganês

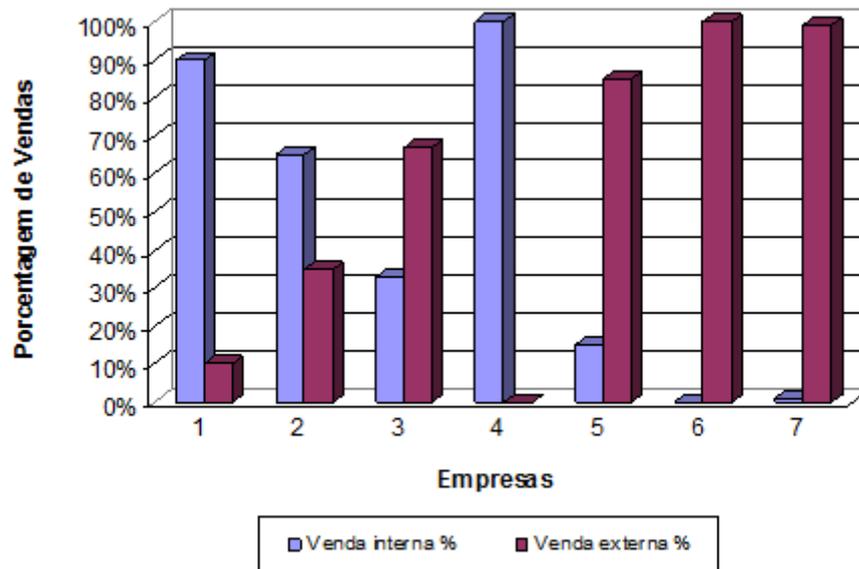


Figura 5.8: Distribuição de vendas no mercado interno e externo de ferro-silício

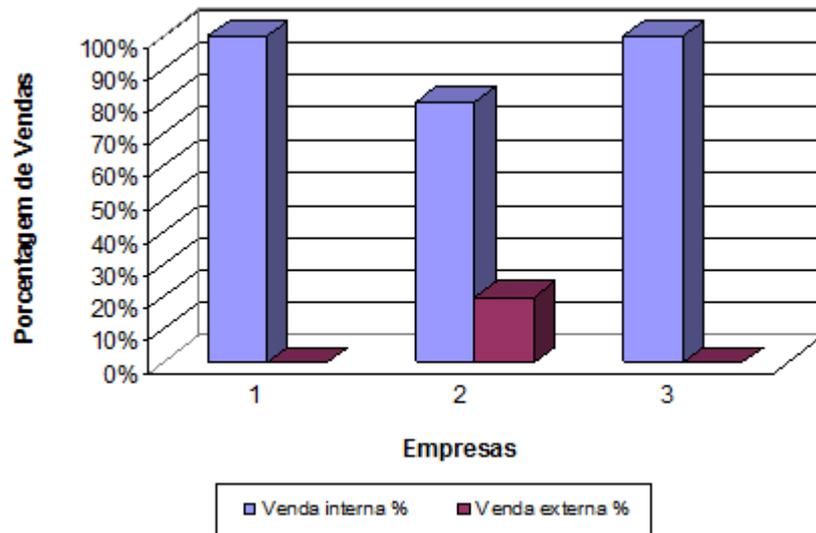


Figura 5.9: Distribuição de vendas no mercado interno e externo de ferro-manganês

Essas figuras demonstram que os empreendimentos produtores de silício metálico enviam quase a totalidade da sua produção para o mercado externo, enquanto aqueles que produzem ferro-manganês e ferro-silício-manganês têm sua produção quase totalmente absorvida pela demanda do mercado interno. Por outro lado, as empresas produtoras de ferro-silício e cálcio-silício dividem a sua produção entre os mercados interno e externo.

Em relação aos tipos de fornos do setor de ferro ligas existentes no Estado de Minas Gerais, do total de 60 fornos, 58 são do tipo aberto, demonstrado nas fotos 5.1 e 5.2, sendo que dos dois restantes, existe um forno fechado para produção de ferro-silício-manganês e outro do tipo forno semi-fechado para produção de ferro-nióbio.



Foto 5.1: Forno do tipo aberto.



Foto 5. 2: Forno aberto com cortina

5.2 Matérias Primas

O consumo específico de carvão vegetal por produção de liga, está demonstrado na Figura 5.10, enquanto que o consumo específico de matéria prima por tipo de ferroliga produzida está demonstrado nas Figuras de 5.11 a 5.17.

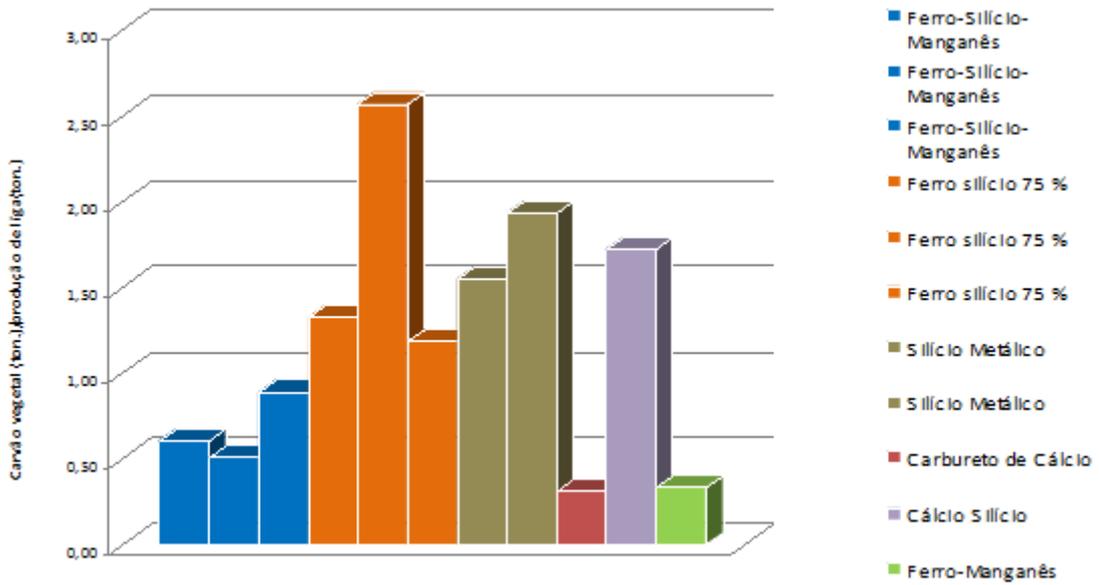


Figura 5.10: Consumo específico de carvão vegetal por liga produzida

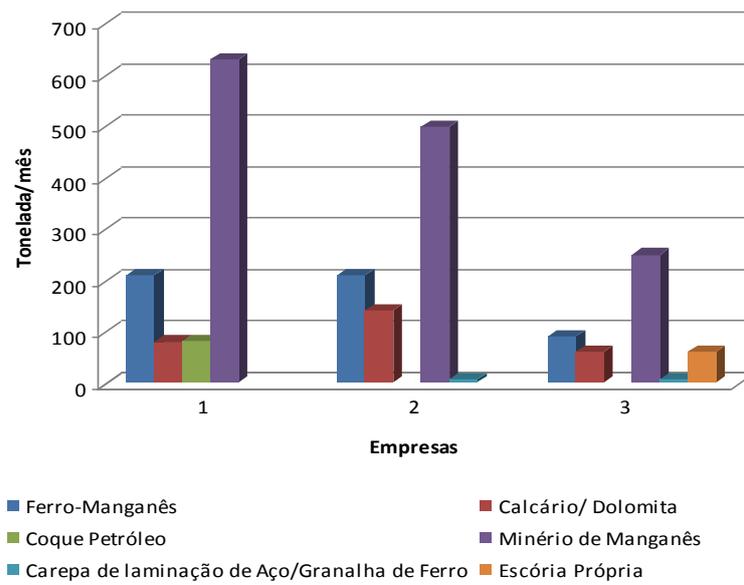


Figura 5.11: Consumo mensal de matéria prima para produção de Ferro-Manganês

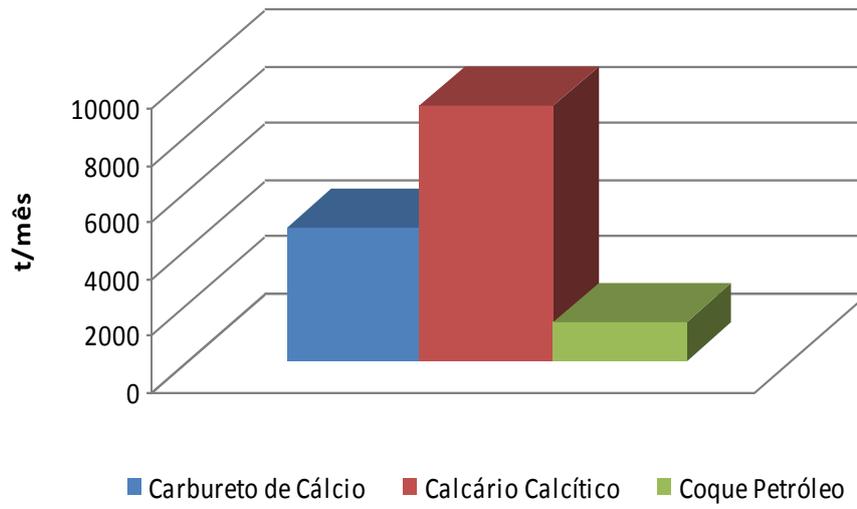


Figura 5.12: Consumo mensal de matéria prima para produção de Carbureto de Cálcio

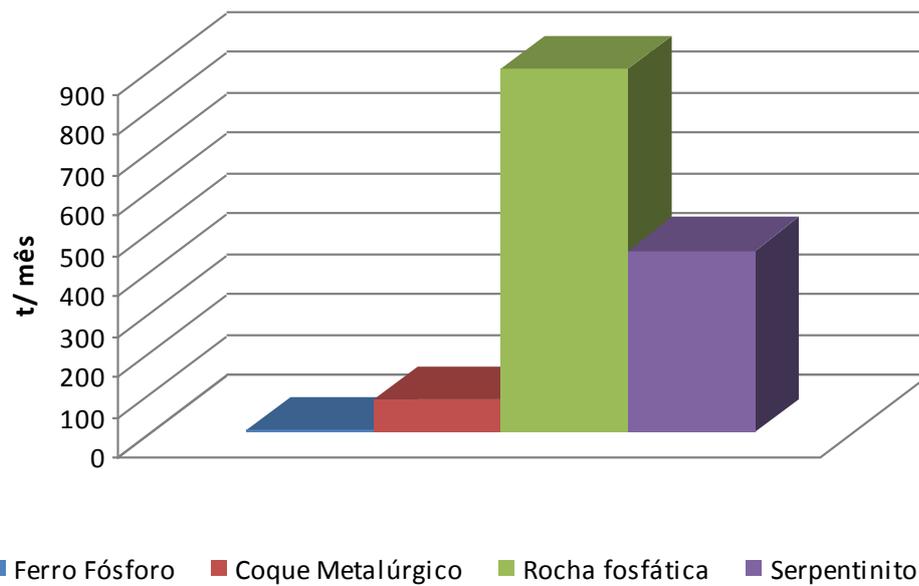


Figura 5.13: Consumo mensal de matéria prima para produção de Ferro-Fósforo

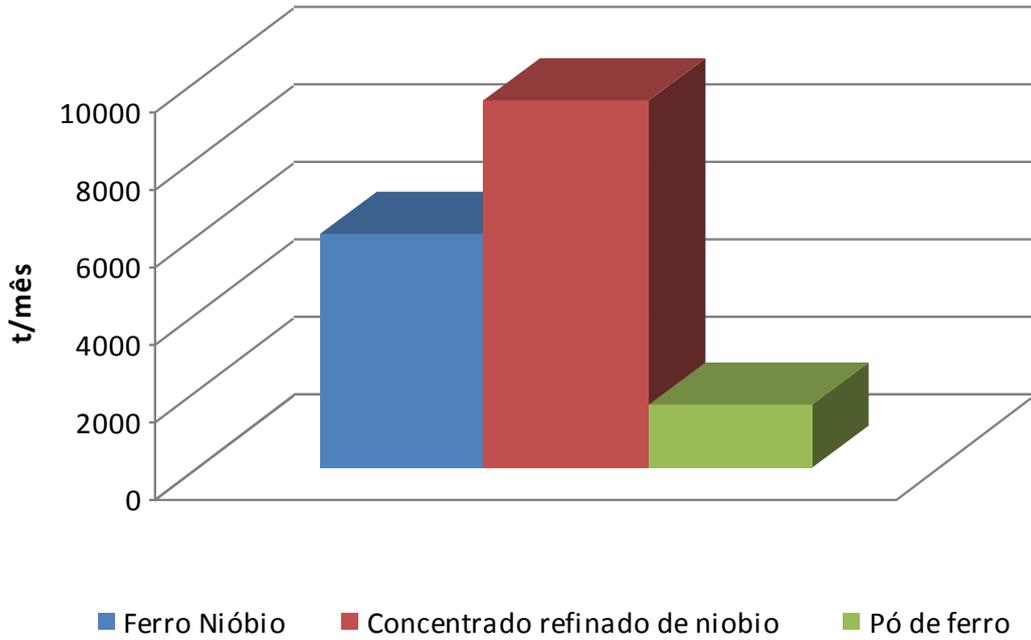


Figura 5.14: Consumo mensal de matéria prima para produção de Ferro-Nióbio

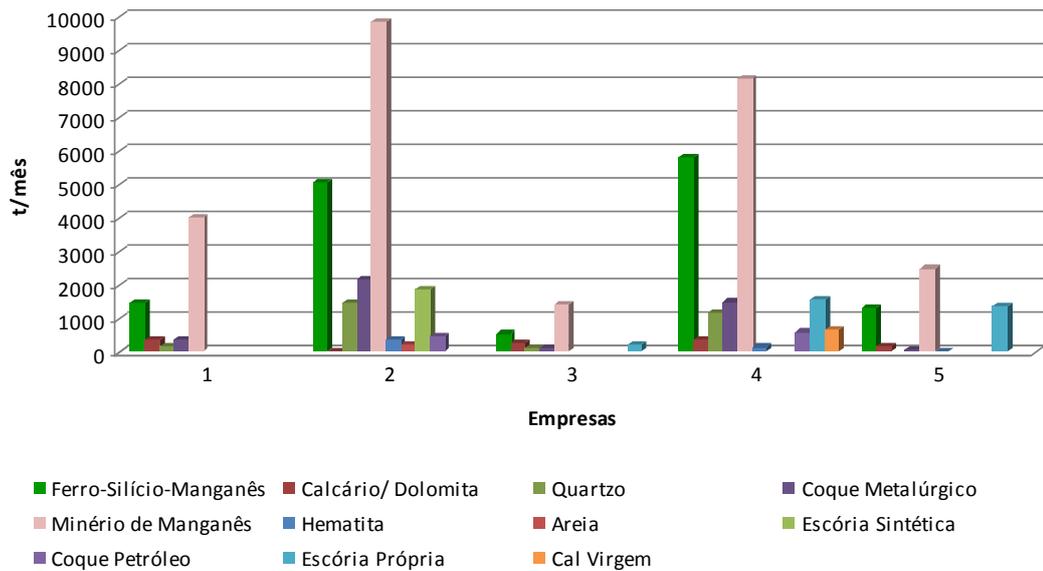


Figura 5.15: Consumo mensal de matéria prima para produção de Ferro-Silício-Manganês

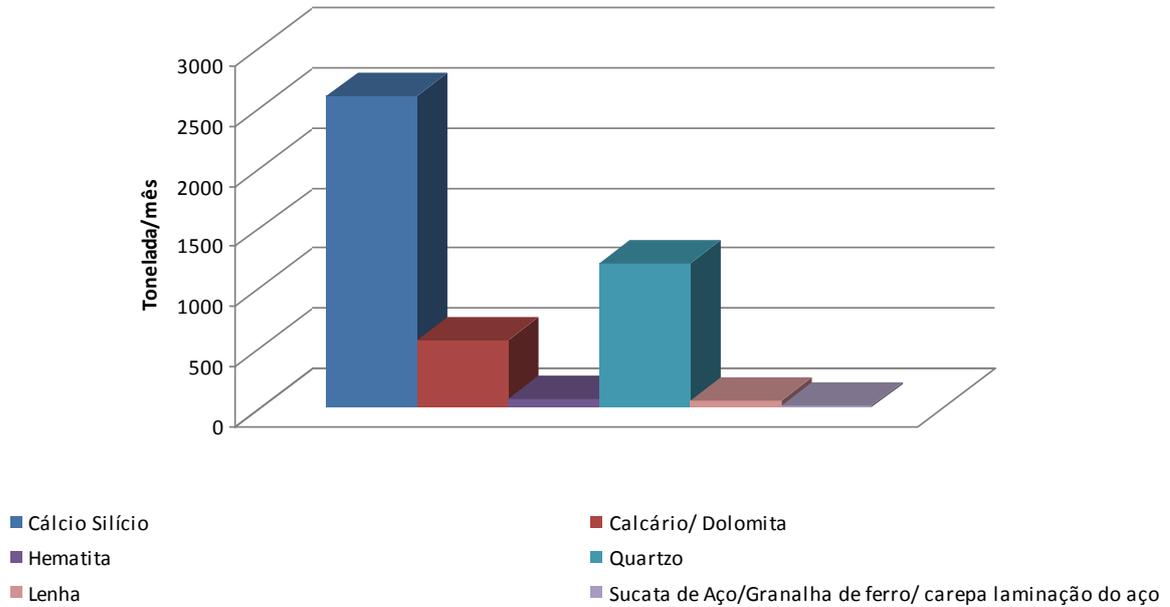


Figura 5.16: Consumo mensal de matéria prima para produção de Cálcio-Silício

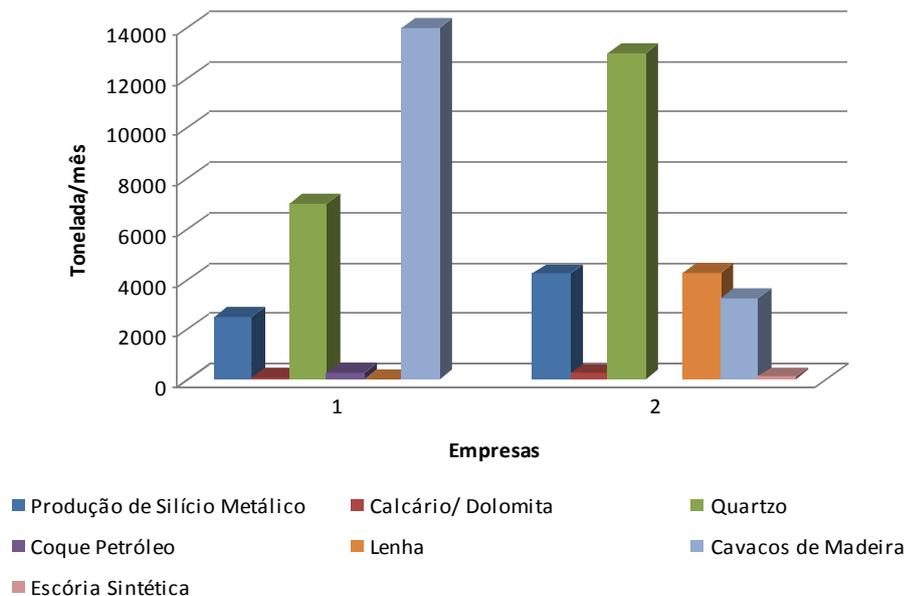


Figura 5.17: Consumo mensal de matéria prima para produção de Silício Metálico

Destaca-se que neste estudo foi, também, possível obter informações sobre a origem do carvão vegetal utilizado, sendo que praticamente todas as empresas consultadas informaram que o carvão vegetal é proveniente de floresta plantada própria ou de terceiros. Na Figura 5.18, é apresentado, em termos percentuais, a origem do carvão utilizado por tipo de ferroliga produzida.

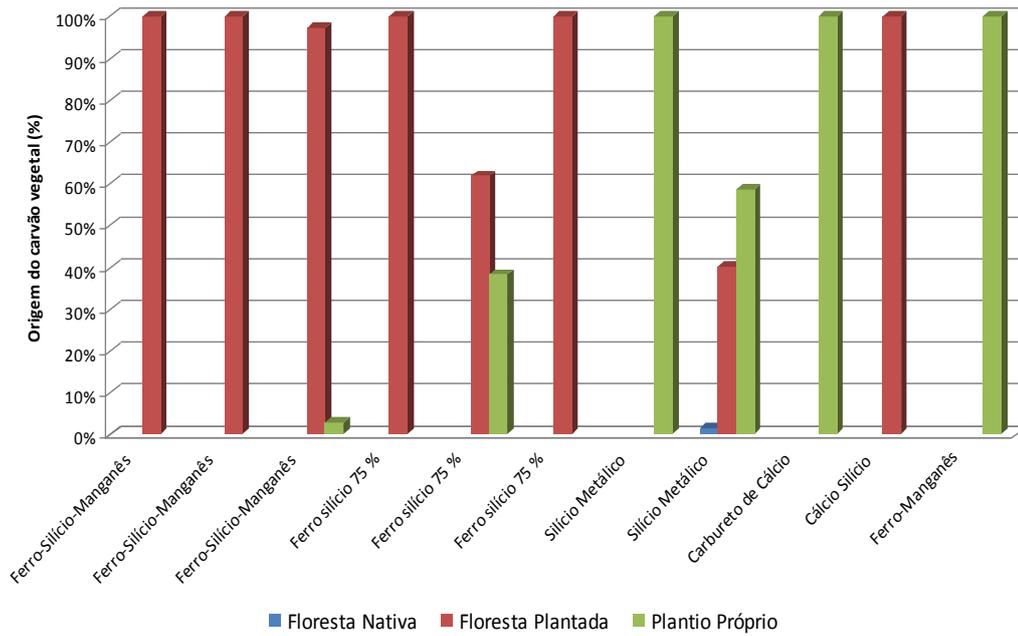


Figura 5.18: Origem, em termos percentuais, do carvão vegetal utilizado por tipo de ferroliga produzida

5.3 Insumos

O consumo de água, é apresentado na Figura 5.19, para cada tipo de liga, em m³/t.

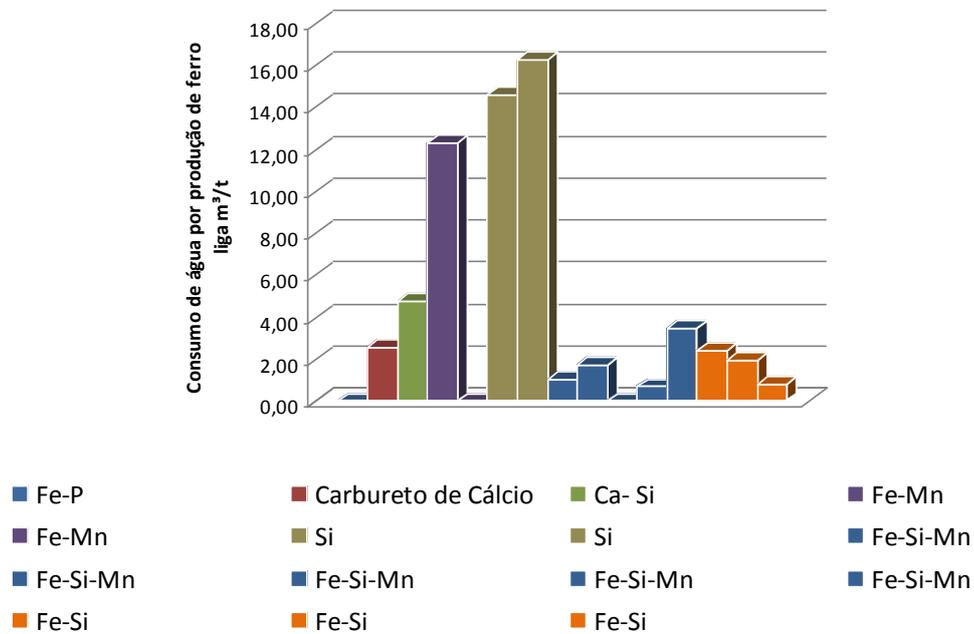


Figura 5.19: Consumo específico de água por tipo de ferroliga produzida

O consumo específico de eletrodos de grafite e Soderberg por tipo liga produzida, está representado nas Figuras 5.20, 5.21 e 5.22.

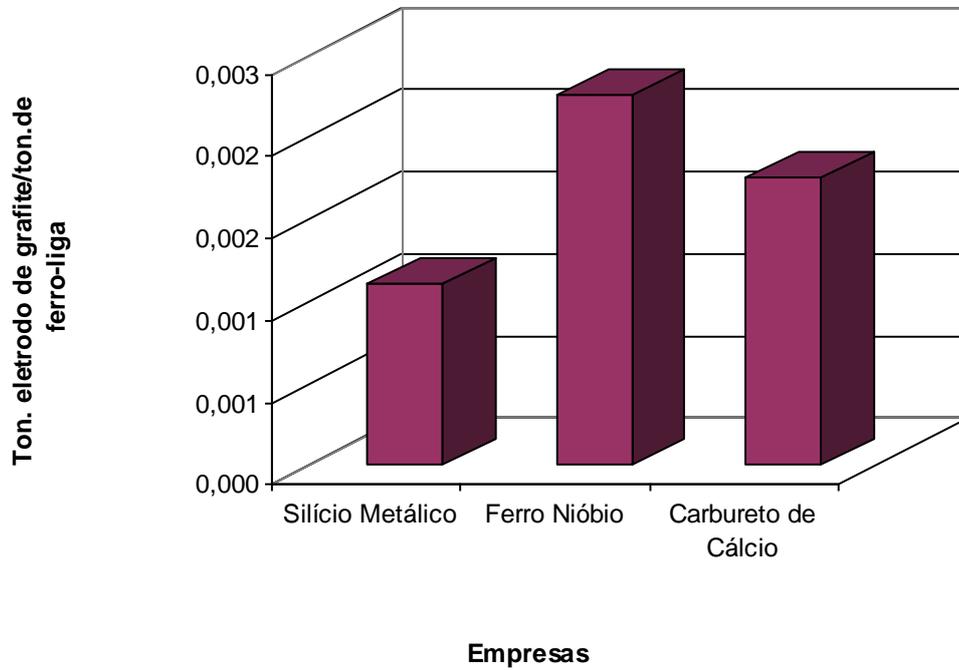


Figura 5.20: Consumo específico de eletrodo de grafite por tipo de ferro-liga produzida

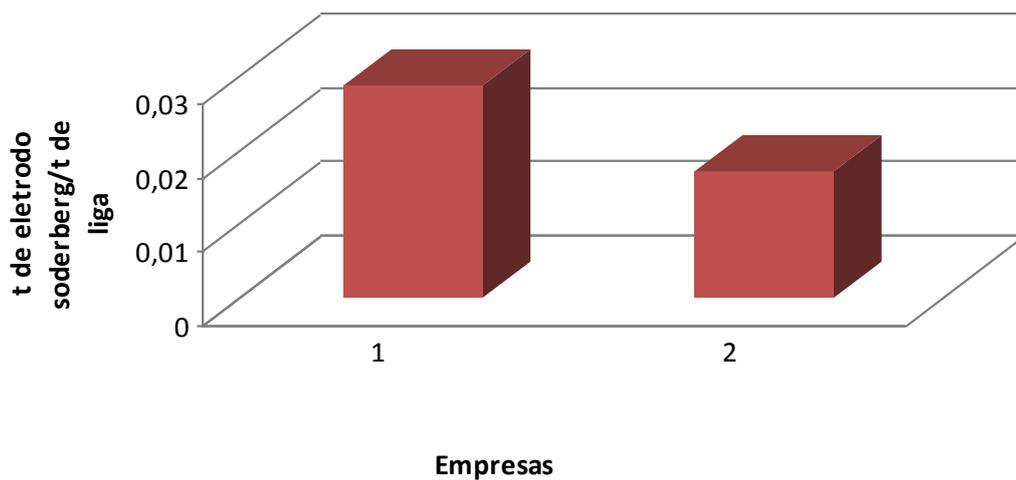


Figura 5.21: Consumo específico de eletrodo Soderberg para produção de Ferro-Manganês

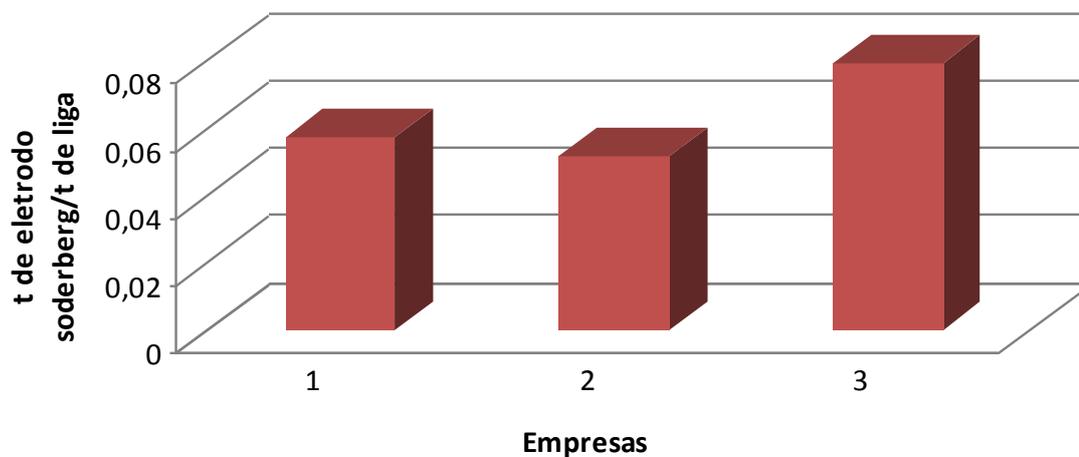


Figura 5.22: Consumo específico de eletrodo Soderberg para produção de Ferro-Silício

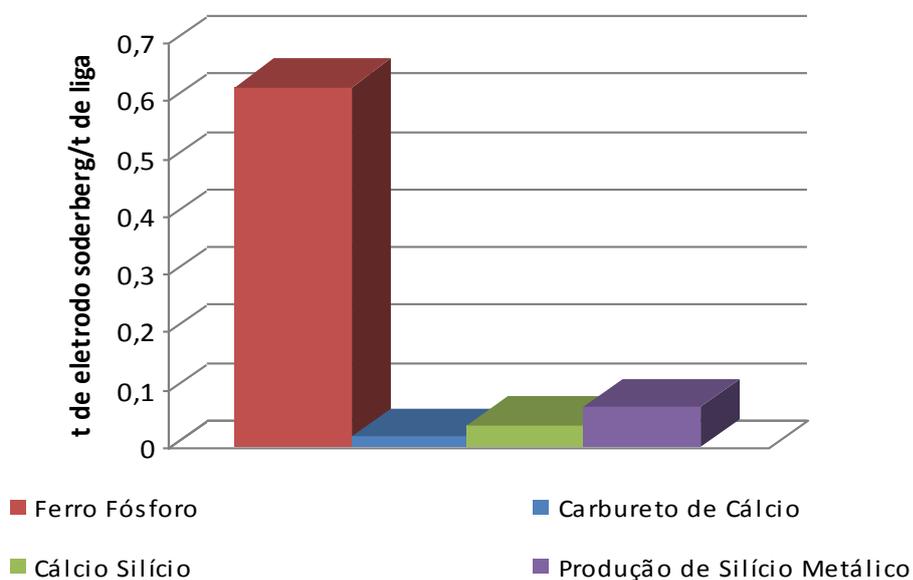


Figura 5.23: Consumo específico de eletrodo Soderberg para produção de ferroligas diversas

O consumo específico de pastas para revestimento de panela, tubos trefilados, vergalhões e tubos porosos por tonelada produzida de ferroliga, é demonstrado nas Figuras 5.24 a 5.27.

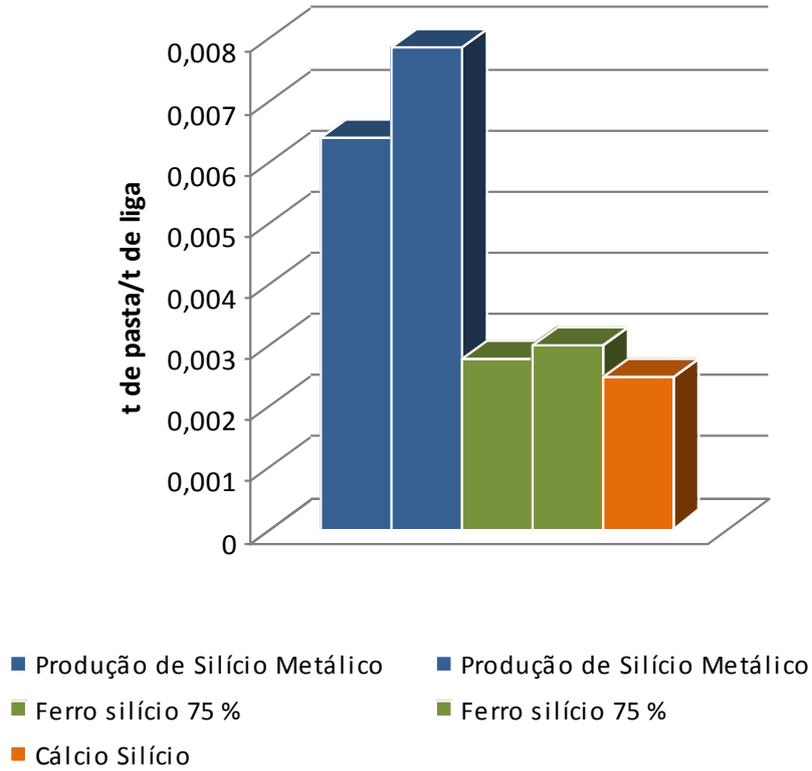


Figura 5.24: Consumo específico de pasta para revestimento da panela por ferroliga produzida

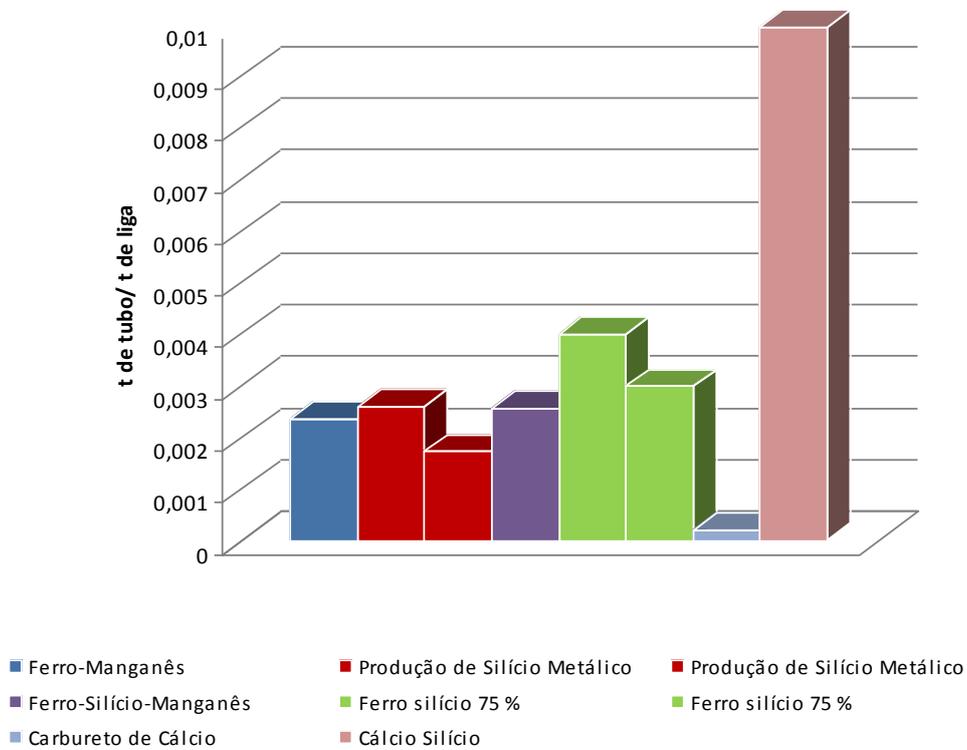


Figura 5.25: Consumo específico de tubo trefilado por ferroliga produzida

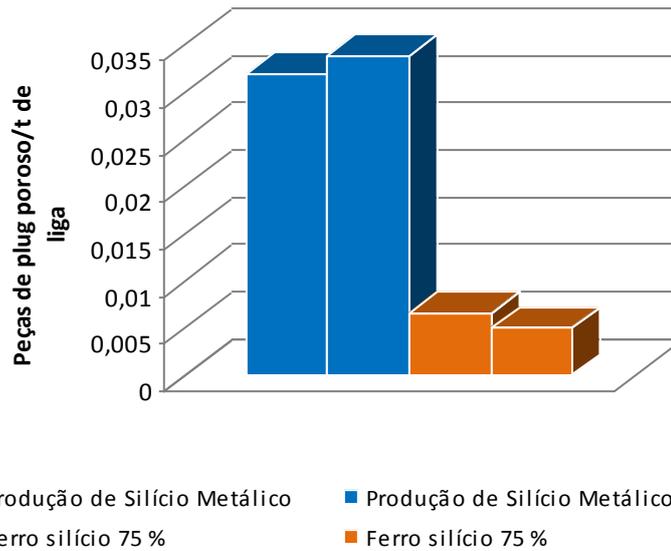


Figura 5.26: Consumo específico de plug poroso por produção de liga

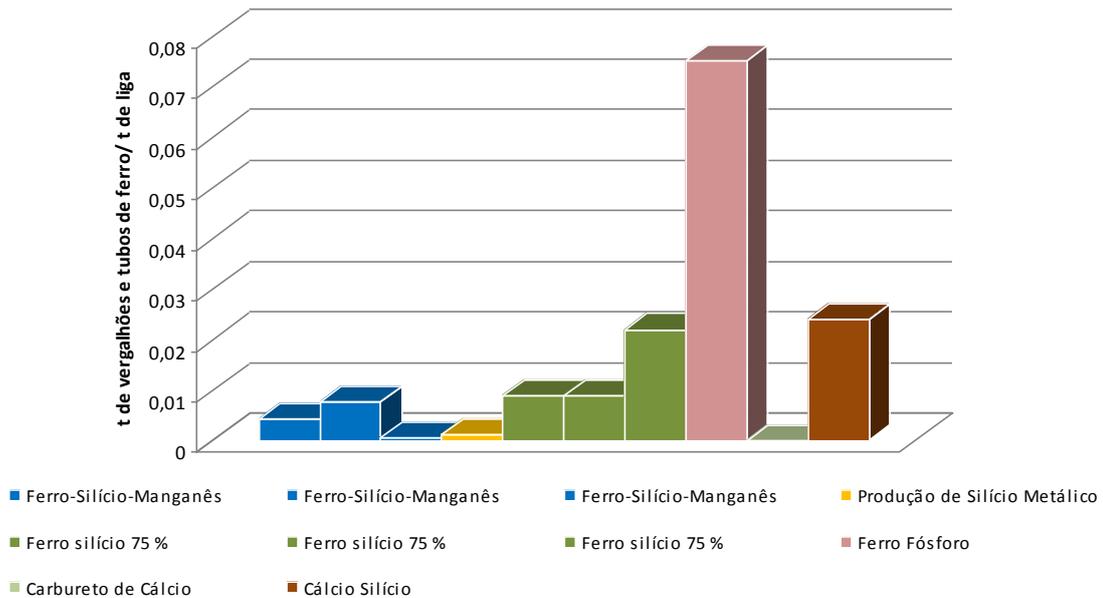


Figura 5.27: Consumo de vergalhões e tubos de ferro por ferroliga produzida

5.4 Consumo de Energia

A Tabela 5.3, cujos dados compilados foram obtidos no desenvolvimento deste estudo junto aos empreendimentos, demonstra o consumo de energia elétrica do setor de ferroligas no Estado de Minas Gerais, bem como a geração própria de energia por alguns desses empreendimentos por meio de hidroelétricas.

Tabela 5.3 – Consumo e geração própria de energia elétrica do setor de ferroligas em Minas Gerais

Empresa	Energia elétrica			
	Produção própria		Comprada	
	Produção mensal (MWh)	Consumo mensal (MWh)	Concessionária	Consumo mensal (MWh)
1			CEMIG	6.000,00
2			CEMIG	21.764,81
3	684,00	684,00	CEMIG	6,11
4			CEMIG	26.657,71
5			CEMIG	19.813,25
6			CEMIG	14.575,58
7			CEMIG	16.738,00
8			CEMIG	61.500,00
9			CEMIG	53.210,00
10			CEMIG	8.777,62
11			CEMIG	35.680,00
12			CEMIG	2.700,00
13	0,25	0,25	CEMIG	0,45
14	0,60	0,60	CEMIG	0,03 a 1
15			CEMIG	3.567,00
16			CEMIG	30.421,50
17			CEMIG	2.520,00
18			CEMIG	8.200,00
19			CEMIG	20.544,18
20	0,86	0,86	CEMIG	6,19
21	500,00	500,00	CEMIG	416,67
22			CEMIG	62.000,00
Total	1.185,71	1.185,71	Total	395.099,06

Nessa tabela, se observa que é limitado o número de empreendimentos do setor de ferroligas, no Estado de Minas Gerais, que produz a própria energia elétrica, apenas cinco empreendimentos.

Entretanto, parte dessas empresas ainda necessita complementar sua demanda comprando energia da concessionária local, Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). Quanto ao restante dos empreendimentos, toda sua demanda de energia elétrica é proveniente de concessionária.

O consumo mensal médio de energia elétrica do setor de ferroligas no Estado de Minas Gerais, correspondeu a cerca de 396.285 MWh (equivalente a 396 GWh) levando-se em conta o somatório da produção própria e contratada, enquanto a produção mensal dos empreendimentos que geram sua própria energia elétrica, em média, correspondeu apenas a 1,2 GWh, no período pesquisado.

A Tabela 5.4 e a Figura 5.28 reúnem o consumo de energia elétrica por ferroliga produzida. Deve-se atentar ao fato de que, no presente estudo, as empresas não especificaram quanto de seu consumo energético era destinado a cada ferroliga produzida por elas que, não raro, era de mais de um tipo. Por essa razão, a quantidade total exposta na Tabela 5.4 supera os 395,1 GWh da tabela 5.3.

Tabela 5.4 – Consumo de energia elétrica por tipo de ferroliga produzida

Liga	Consumo mensal de energia elétrica (GWh)
Si	253,62
Fe-Si	221,18
Ca-Si	71,12
CaC ₂	16,74
Fe-P	0,92
Fe-Nb	2,52
Fe-Mn	20,55
Fe-Si-Mn	51,02
Mg	62,34
Total	700,00

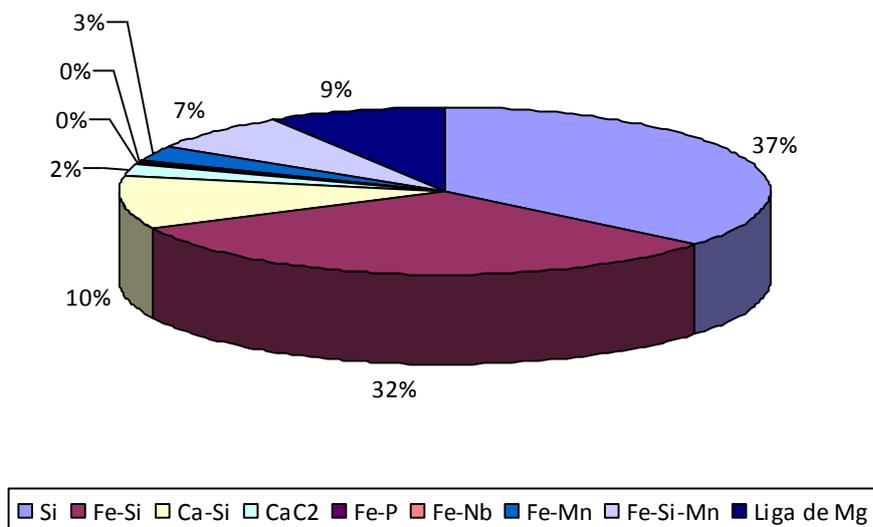


Figura 5.28: Consumo de energia por tipo de ferroliga produzida

A produção de silício metálico é uma atividade que consome uma significativa quantidade de energia elétrica em relação aos outros tipos de ferroligas, conforme se conclui a partir dos dados da Tabela 5.4 e Figura 5.28. Seu consumo de energia é de cerca de 253,6 GWh/mês, ou seja, 64% do total de energia elétrica demandada pelo setor de ferroligas em Minas Gerais, expostos na Tabela 5.3.

A totalidade dessa energia é comprada da CEMIG. Destaca-se que, como a produção mensal desse metal girou em torno de 15.320 t/mês, o consumo específico de energia elétrica para sua produção correspondeu a 16,6 MWh/t de silício metálico.

Em termos percentuais, cerca de 90% de toda a produção deste metal é voltada para o mercado externo.

Outra liga cuja produção demanda elevado consumo de energia elétrica é de ferro-silício. O consumo correspondeu a 221,2 GWh/mês, também 100% adquirida da CEMIG. Considerando a produção mensal desse metal, que girou em torno de 17.022 t/mês, foi estimado um consumo específico de energia elétrica de cerca de 13,0 MWh/t de ferro-silício produzido. Os dados fornecidos pelas empresas no presente estudo permitiram estimar que 10.553,11 t/mês de ferro-silício são exportadas, equivalente a 62% da produção mensal.

5.5 Dados dos fornos elétricos

5.5.1 Fornos de Silício Metálico

Nas Figuras 5.29 a 5.37, são demonstradas as informações referentes a capacidade, volume útil, rendimento do forno, fator de potência, consumo de energia por tonelada produzida, consumo de carvão vegetal, índice de funcionamento e consumo de cavacos para os fornos de produção de silício metálico.

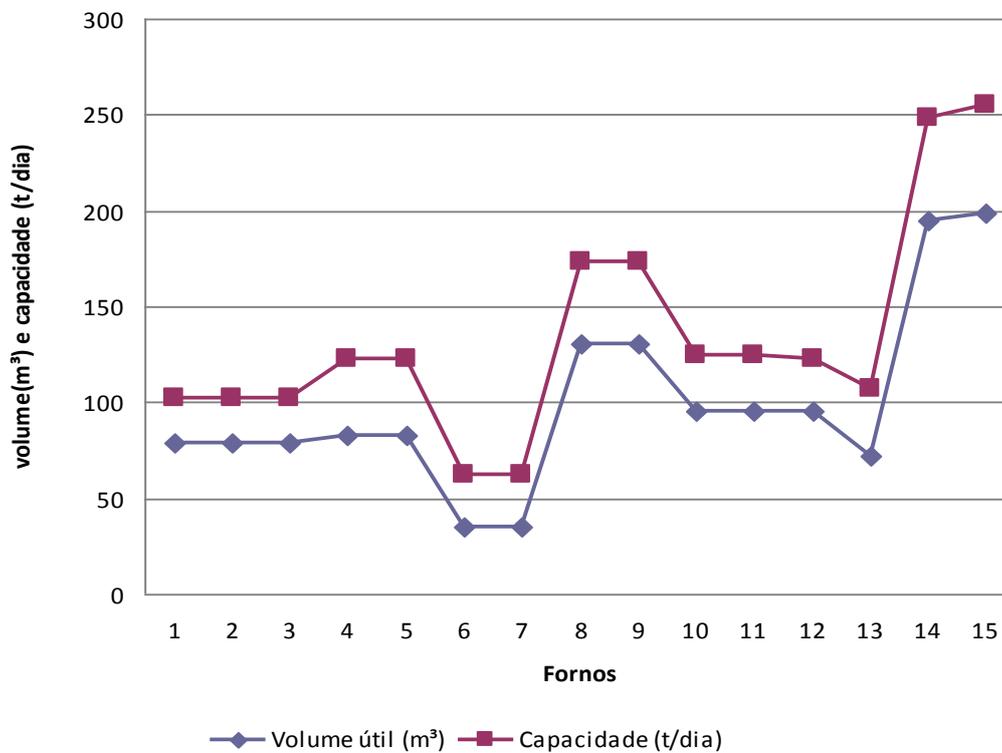


Figura 5.29: Relação entre capacidade e o volume útil de fornos para a produção de silício metálico

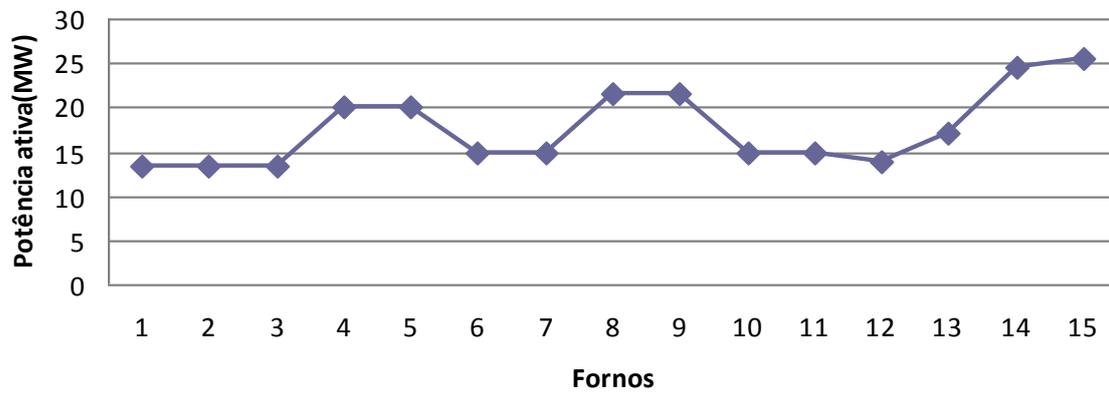


Figura 5.30: Potência dos fornos de produção de silício metálico

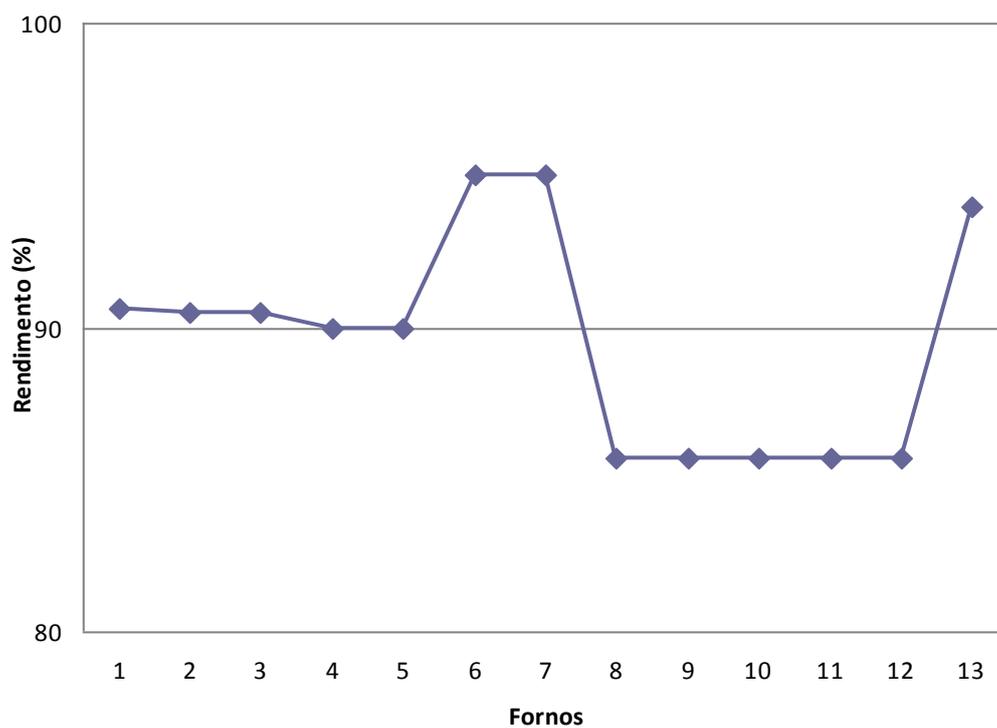


Figura 5.31: Rendimento dos fornos de silício metálico

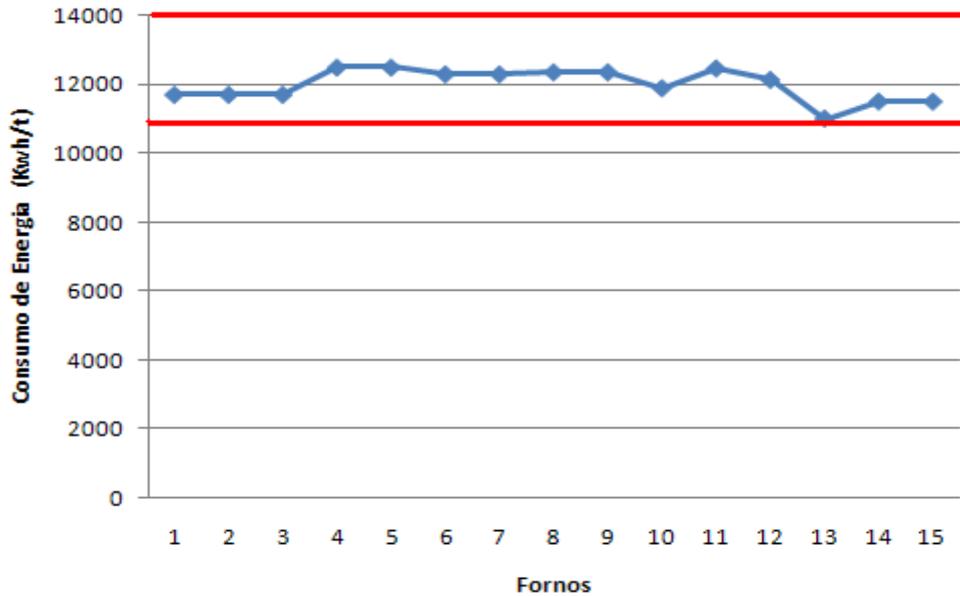


Figura 5.32: Consumo de energia dos fornos de silício metálico

Comparando-se com os dados da literatura para o consumo de energia para o silício metálico, presente na Tabela 2.2, que corresponde a faixa de 11.000 a 14.000 kWh/t, se observa que todos os fornos identificados mostraram um consumo dentro do previsto na literatura.

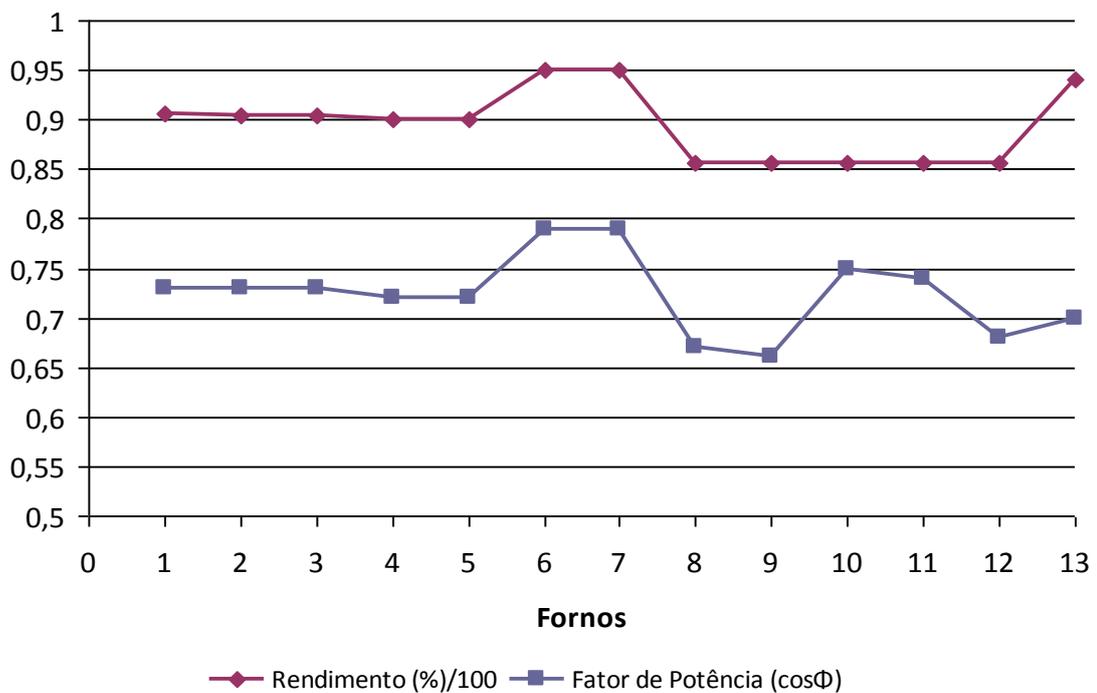


Figura 5.33: Relação rendimento versus fator de potência de fornos de silício metálico

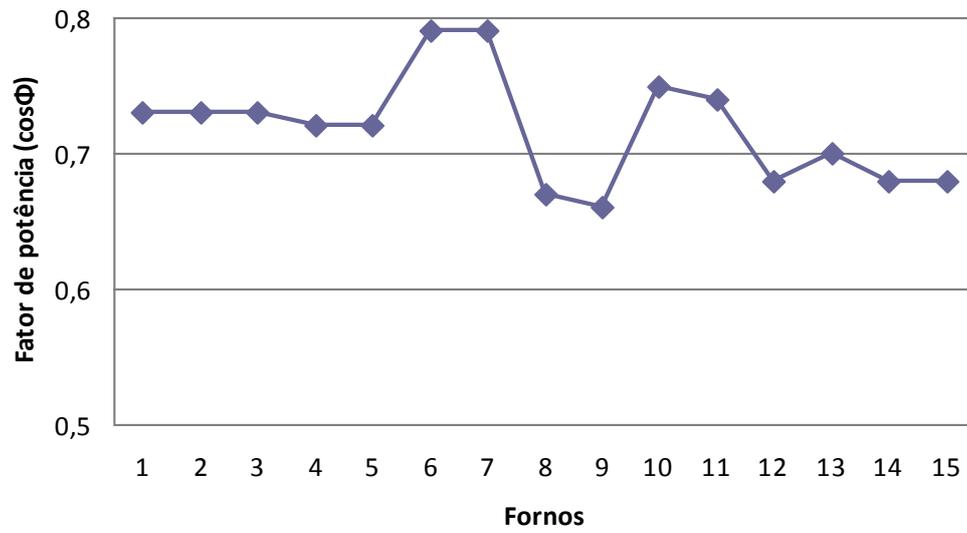


Figura 5.34: Fator de potência dos fornos de silício metálico

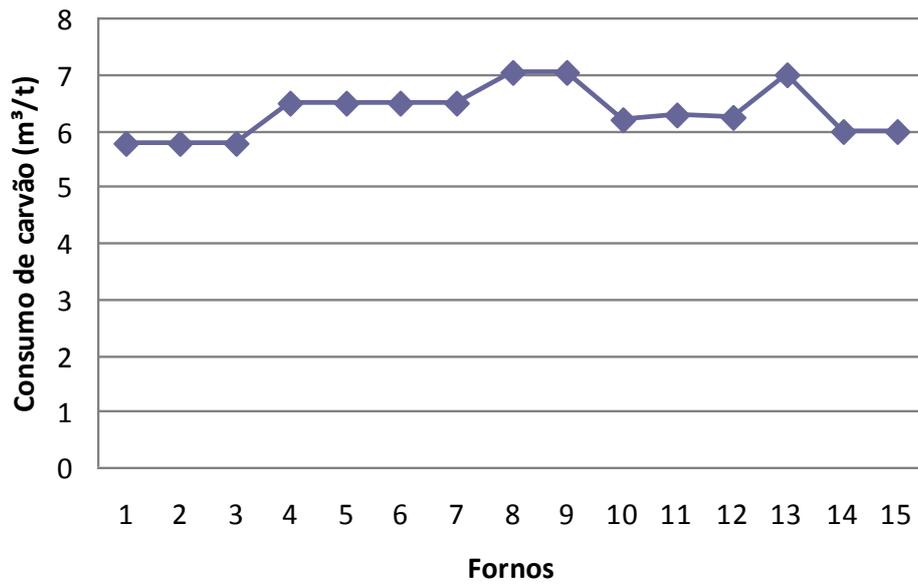


Figura 5.35: Consumo de carvão vegetal dos fornos de silício metálico

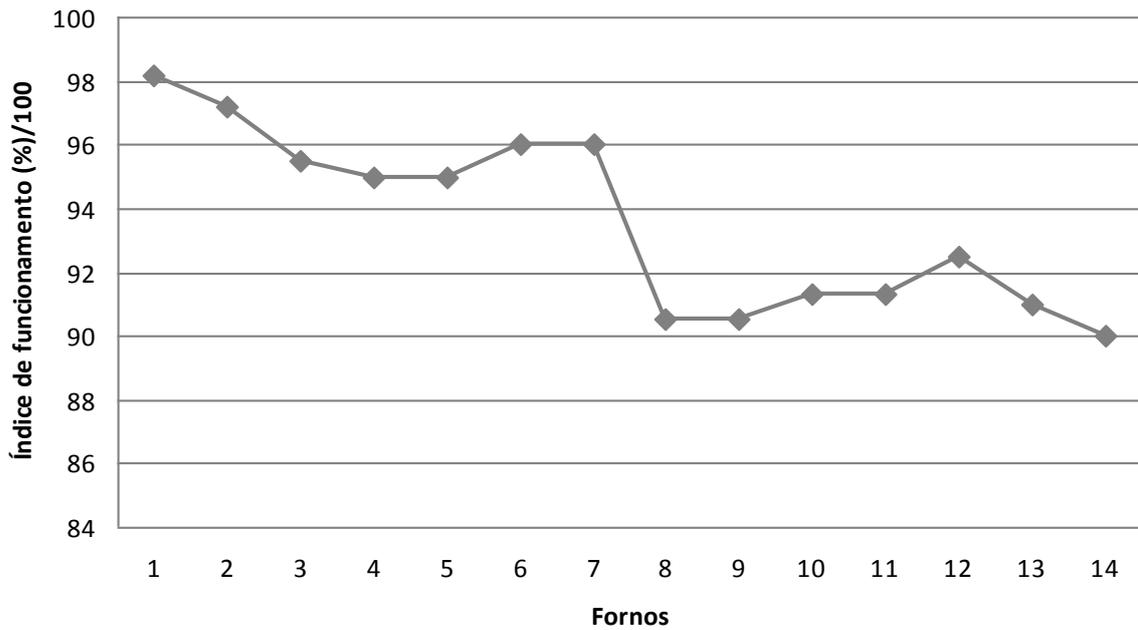


Figura 5.36: Índice de funcionamento dos fornos de silício metálico

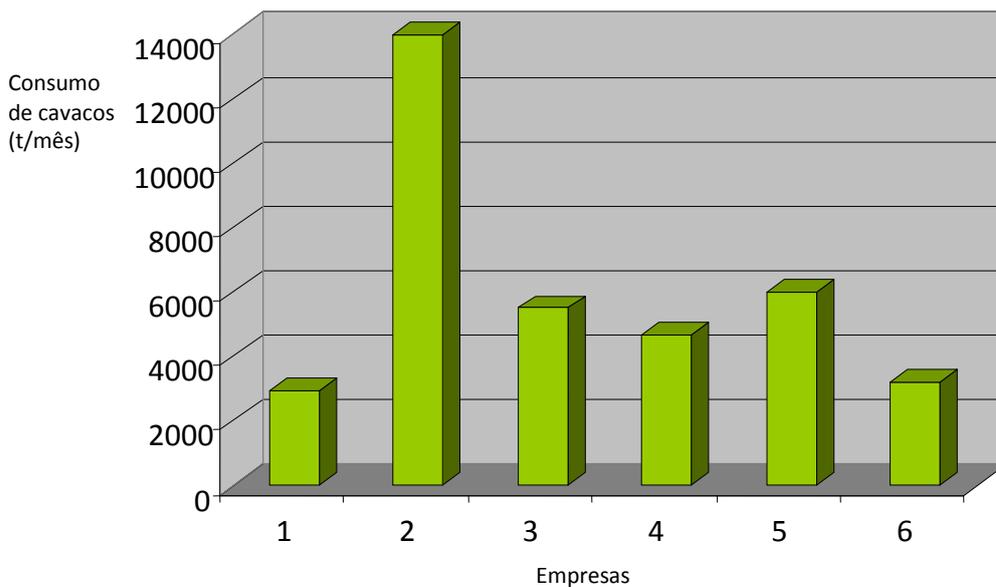


Figura 5.37: Consumo mensal de cavacos na produção de silício metálico

5.5.2 Fornos de cálcio-silício

Para os fornos de cálcio-silício, foram elaborados os gráficos referentes à produção, ao fator de potência, ao consumo de carvão vegetal, ao consumo de cavacos, ao índice de funcionamento, à relação capacidade/volume útil, ao rendimento do forno,

ao consumo de energia por tonelada produzida e à relação fator de potência/rendimento.

Esses gráficos são apresentados nas Figuras 5.38 a 5.46.

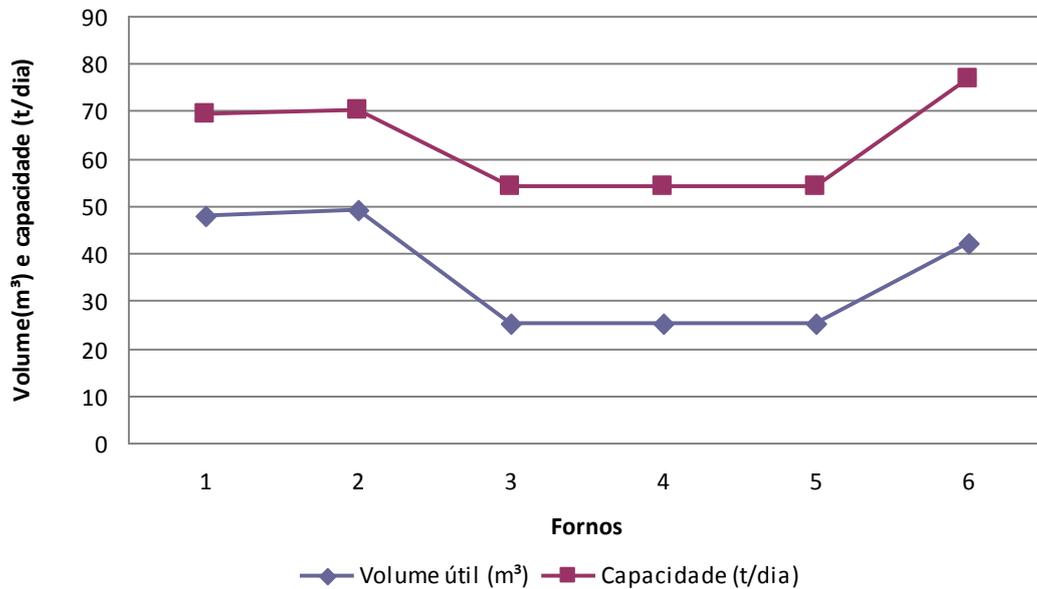


Figura 5.38: Relação capacidade volume útil do forno para produção de cálcio-silício

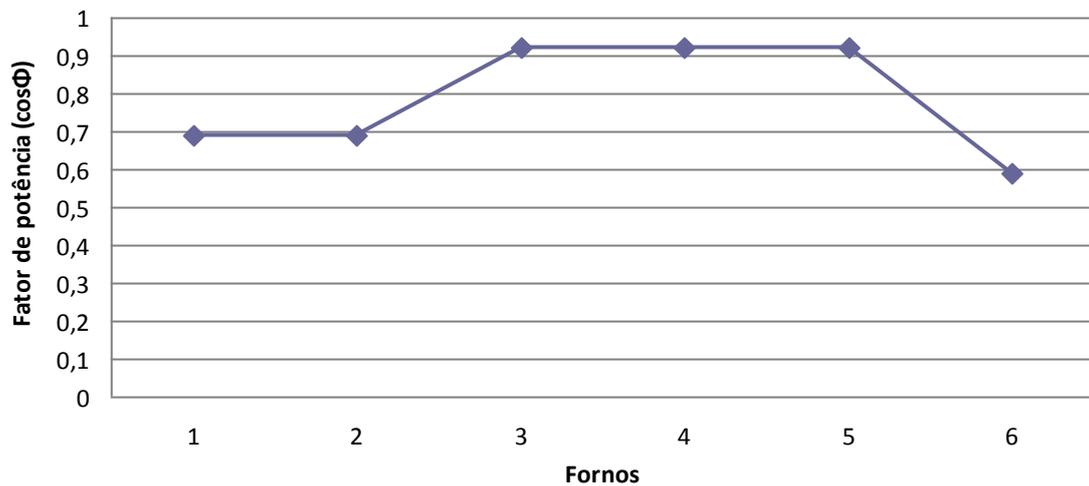


Figura 5.39: Fator de potência (cosΦ) dos fornos de cálcio-silício

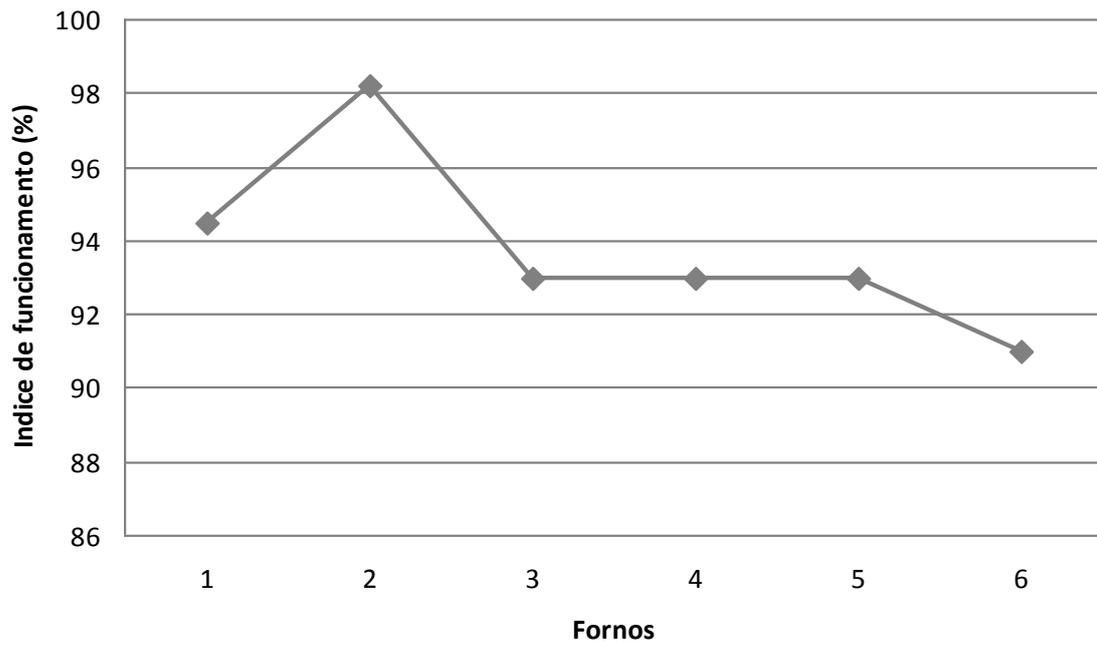


Figura 5.40: Índice de funcionamento dos fornos de cálcio-silício

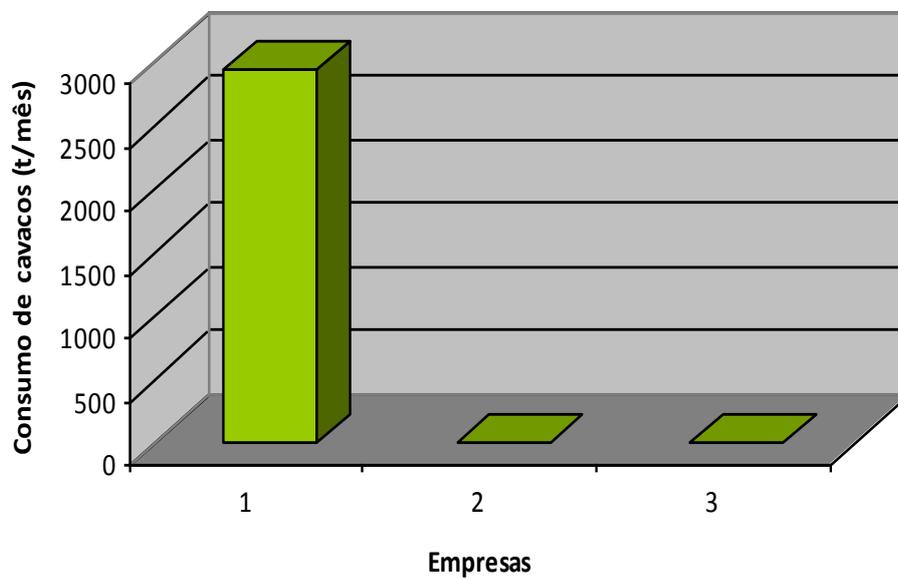


Figura 5.41: Consumo mensal de cavacos na produção de cálcio-silício

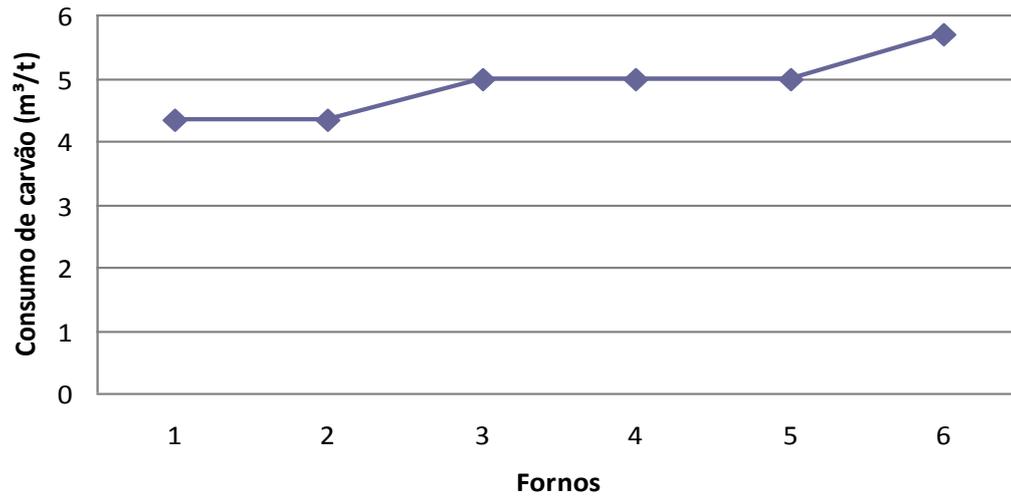


Figura 5.42: Consumo de carvão vegetal dos fornos de cálcio-silício

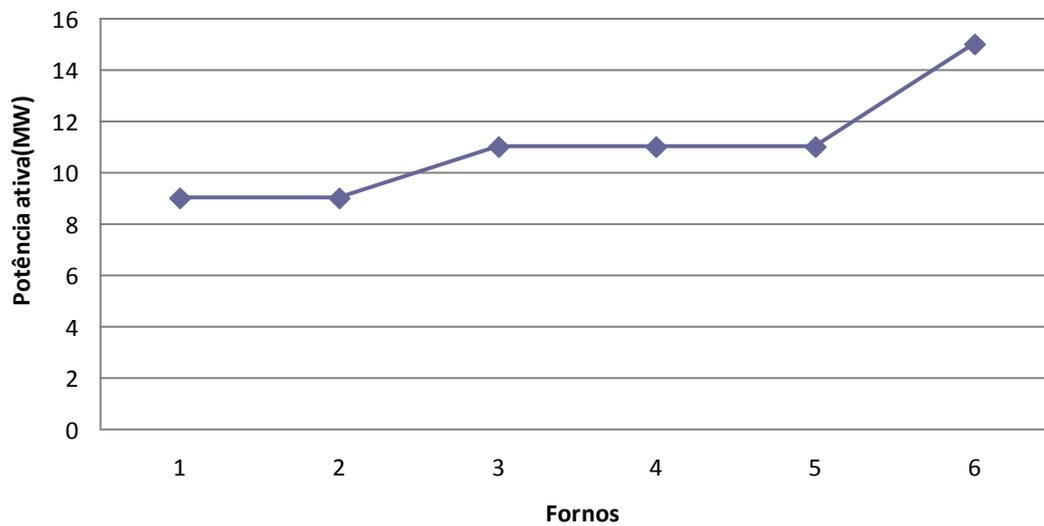


Figura 5.43: Potência dos fornos de cálcio-silício

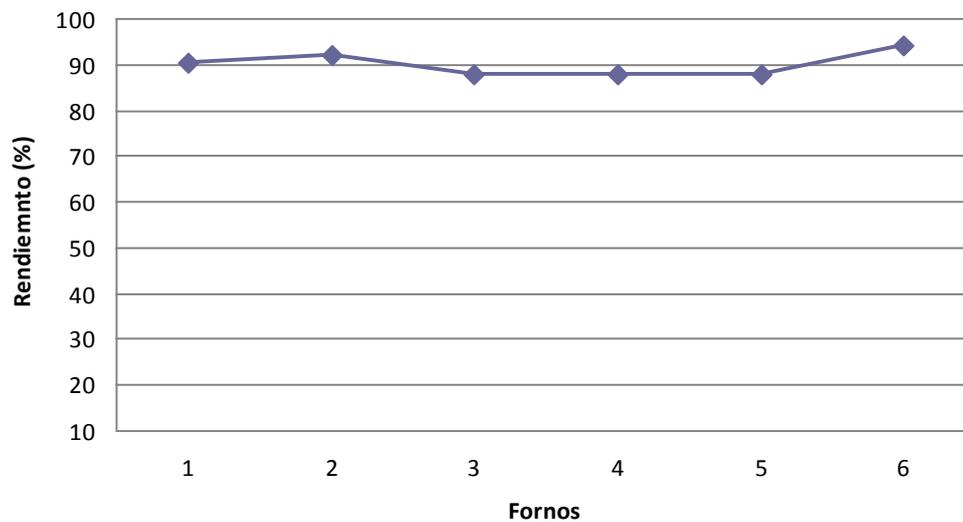


Figura 5.44: Rendimento dos fornos de cálcio-silício

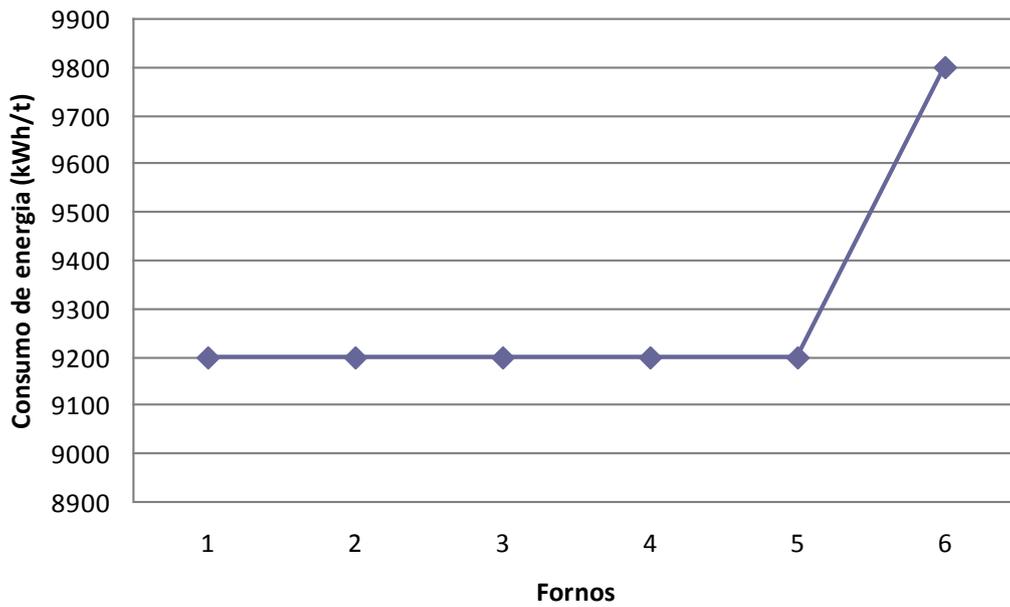


Figura 5.45: Consumo de energia dos fornos de cálcio-silício

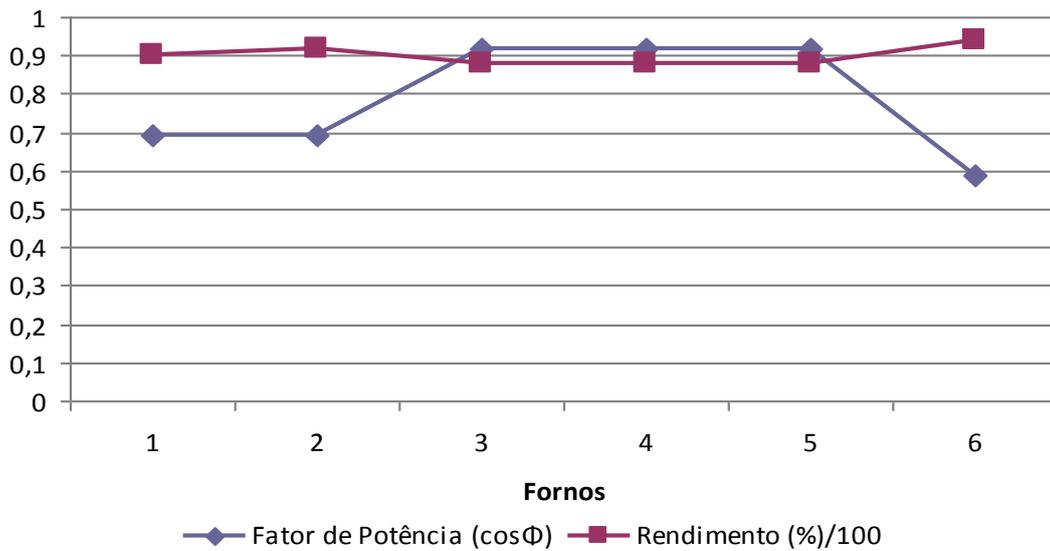


Figura 5.46: Relação rendimento versus fator de potência de fornos produtores de cálcio-silício

5.5.3 Fornos de ferro-silício

Com relação aos fornos de ferro-silício, foram levantados os dados referentes à relação volume útil/capacidade, ao fator de potência, à potência, ao índice de funcionamento, ao rendimento, ao consumo de carvão vegetal, ao consumo de

cavaco e ao consumo de energia por tonelada produzida, apresentados nos gráficos das Figuras 5.47 a 5.55.

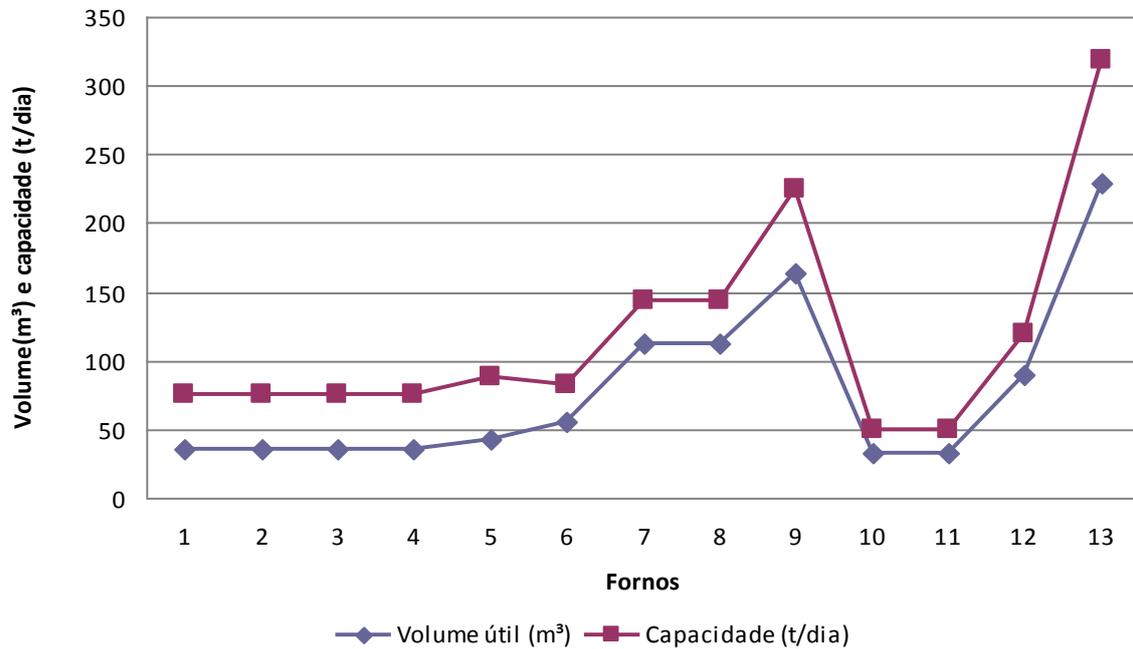


Figura 5.47: Relação capacidade volume útil do forno para produção de ferro-silício

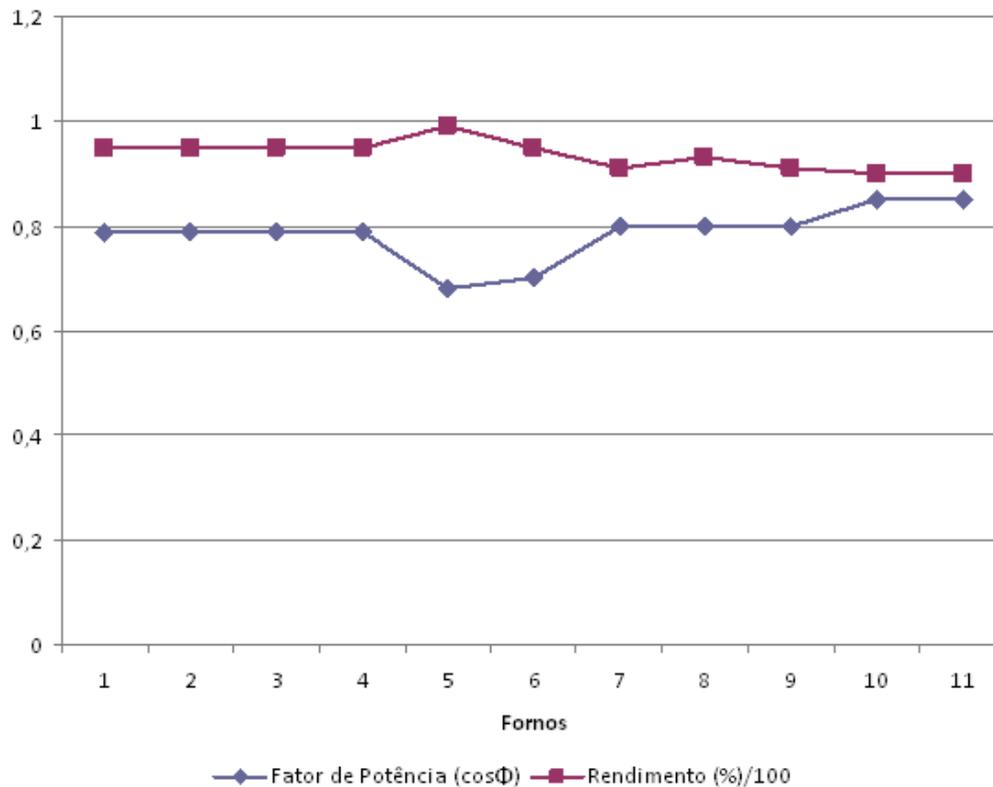


Figura 5.48: Relação rendimento versus fator de potência de fornos de ferro-silício

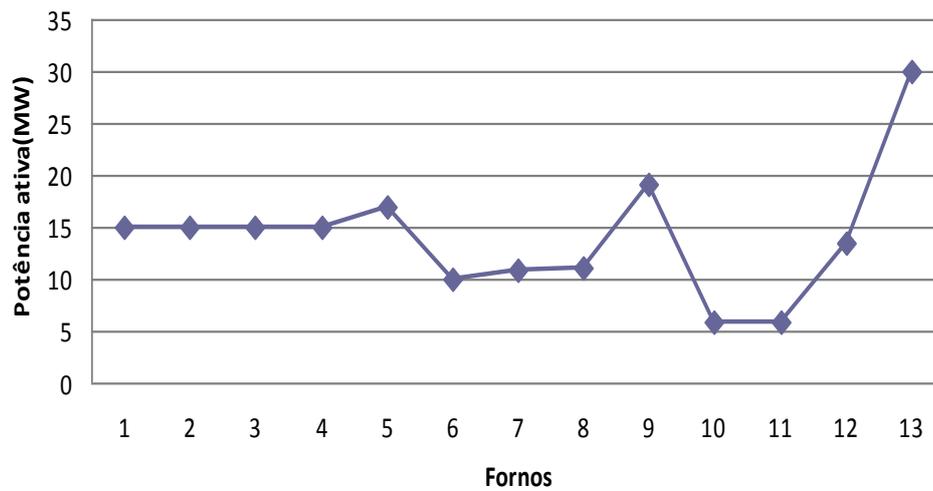


Figura 5.49: Potência dos fornos de ferro-silício

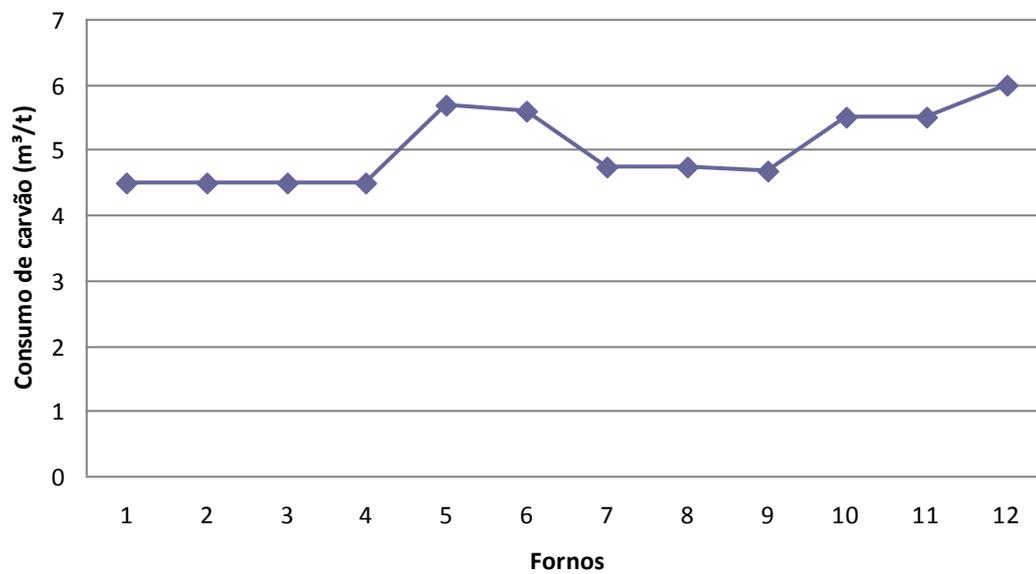


Figura 5.50: Consumo de carvão vegetal dos fornos de ferro-silício

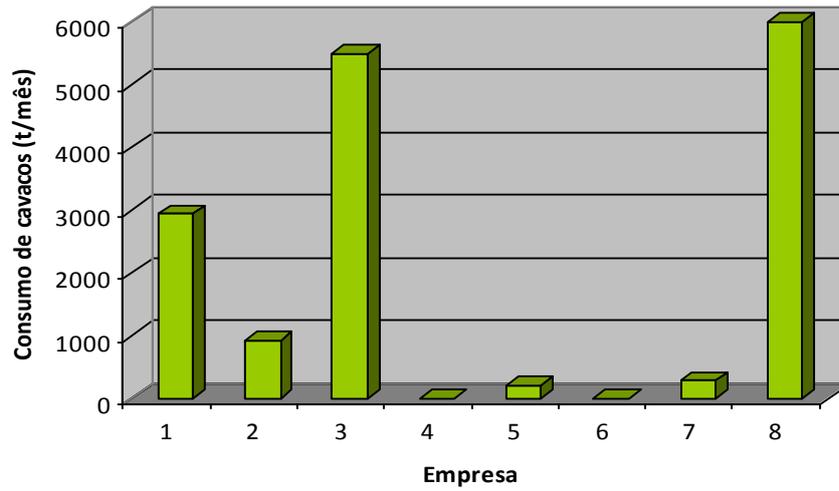


Figura 5.51: Consumo mensal de cavacos na produção de ferro-silício

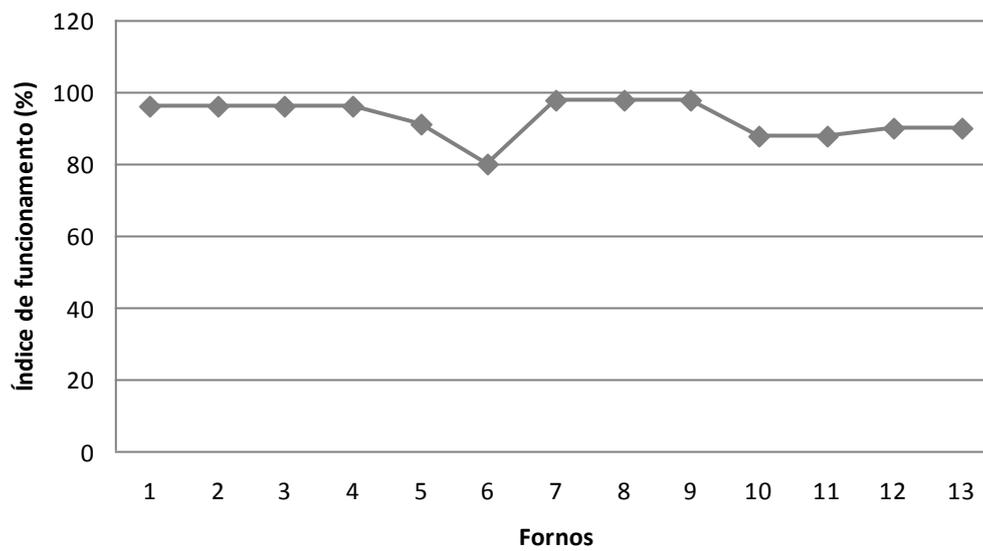


Figura 5.52: Índice de funcionamento dos fornos de ferro-silício

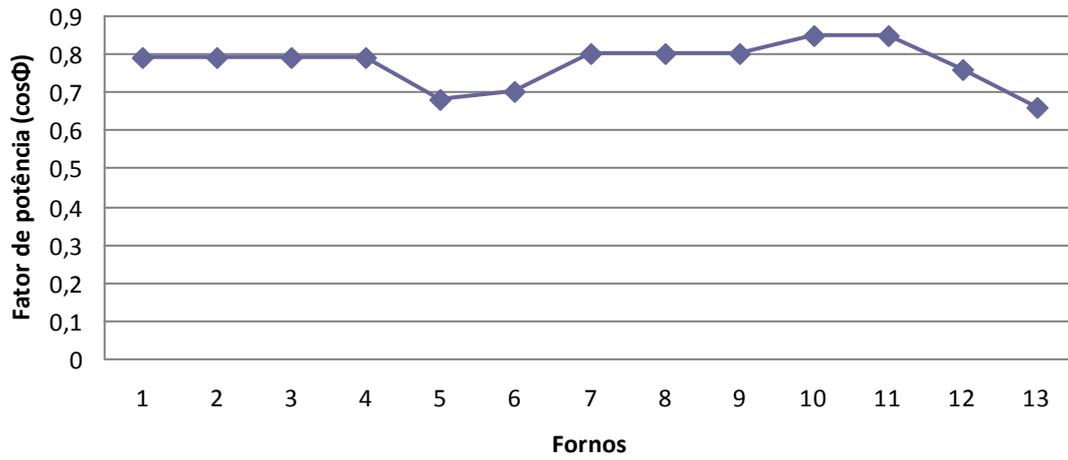


Figura 5.53: Fator de potência (cosΦ) dos fornos de ferro-silício

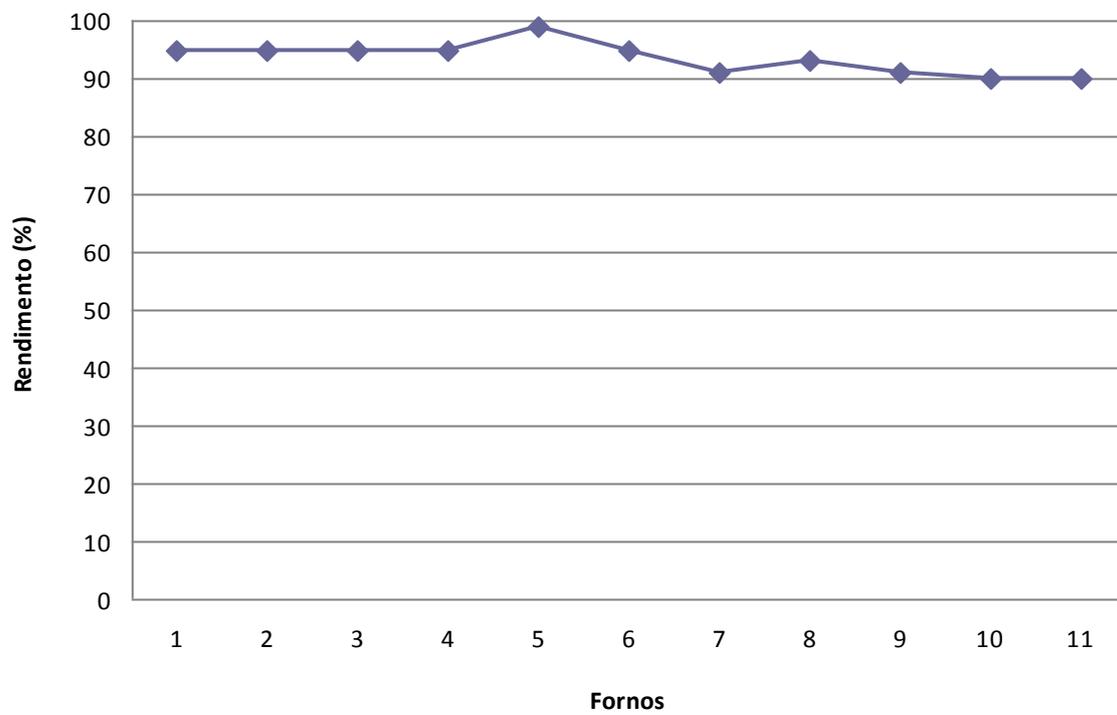


Figura 5.54: Rendimento dos fornos de ferro-silício

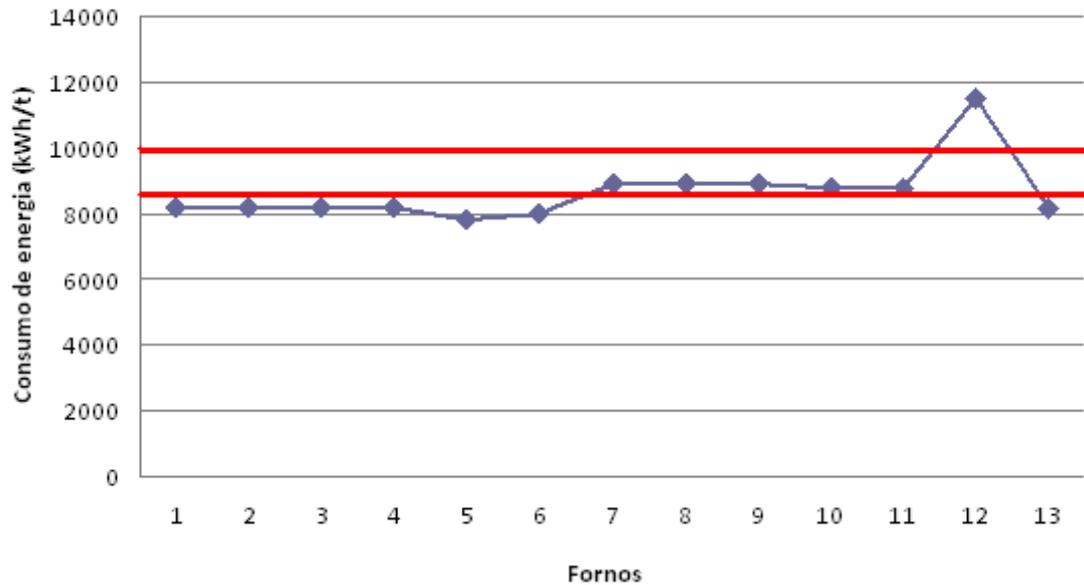


Figura 5.55: Consumo de energia dos fornos de ferro-silício

Comparando-se com os dados da literatura para consumo de energia para fornos a arco submerso presentes na Tabela 2.2, que para a liga de ferro-silício corresponde à faixa de 8500 a 10000 kWh/t, percebe-se que alguns fornos estão em desconformidade com a faixa verificada na literatura consultada.

5.5.4 Fornos de ligas de magnésio

Com relação à produção de ligas de magnésio, foram construídos os gráficos das figuras 5.56 a 5.61 para somente dois fornos que produzem esta liga no estado.

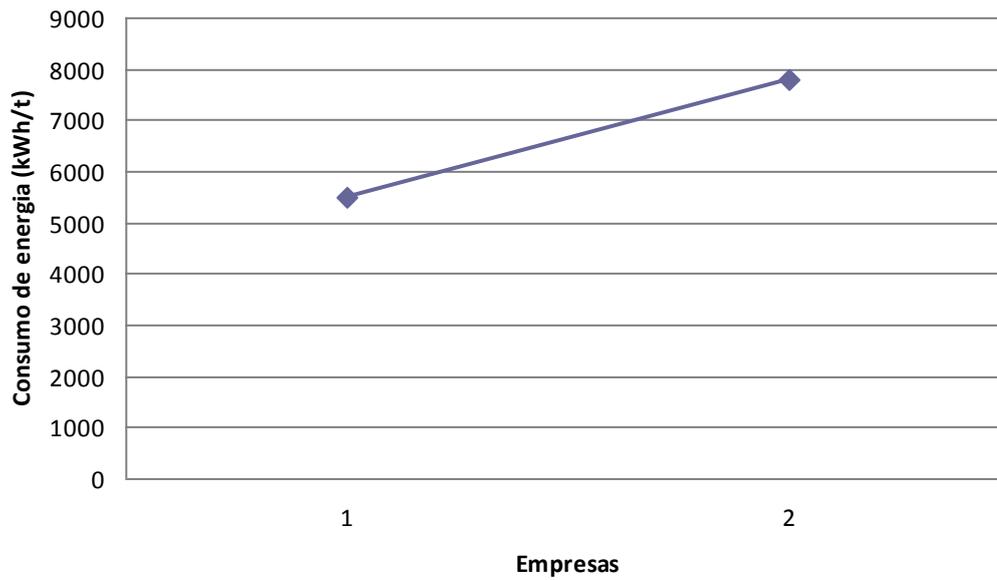


Figura 5.56: Consumo de energia dos fornos de ligas de magnésio

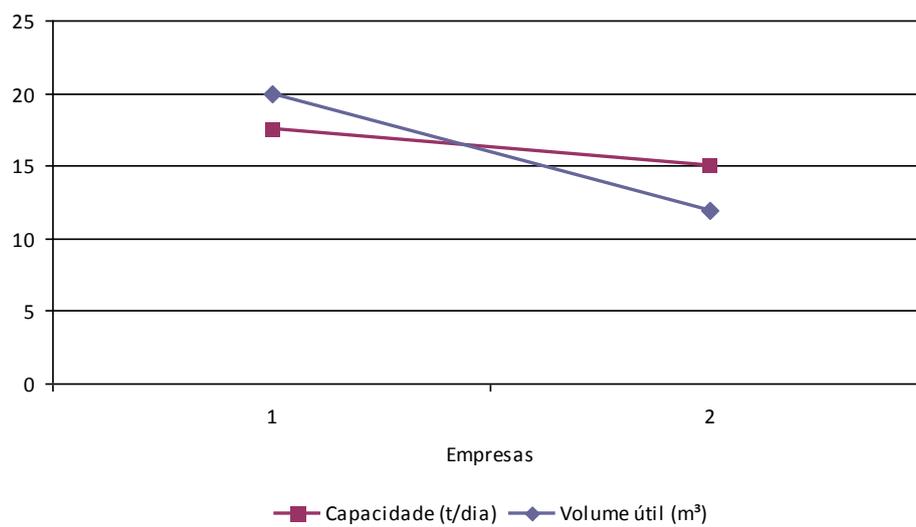


Figura 5.57: Relação capacidade volume útil do forno para produção de ligas de magnésio

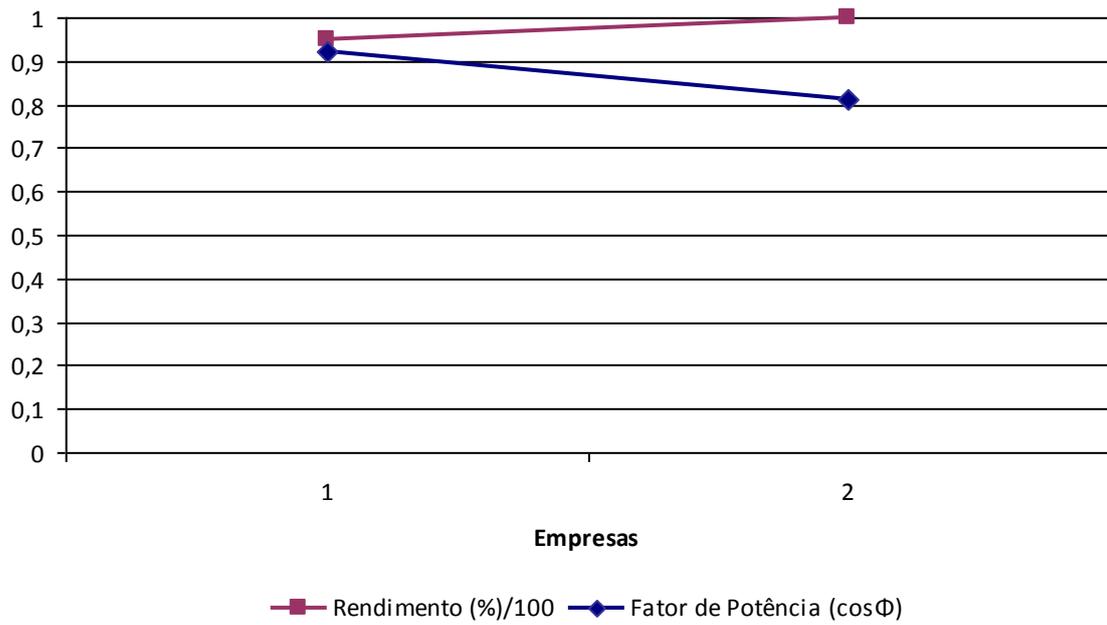


Figura 5.58: Relação rendimento versus fator de potência de fornos de ligas de magnésio

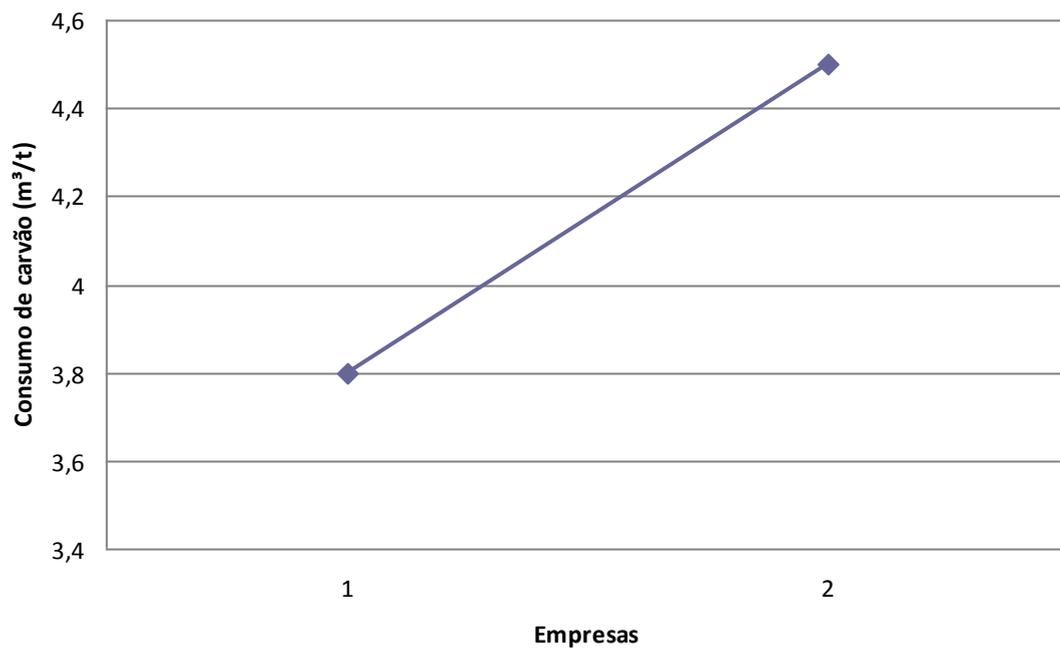


Figura 5.59: Consumo de carvão vegetal dos fornos de ligas de magnésio

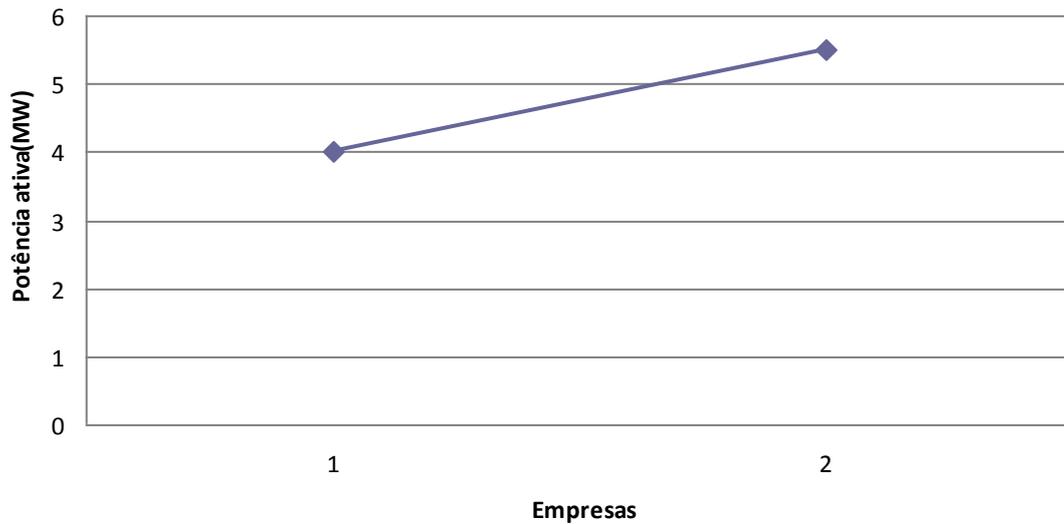


Figura 5.60: Potência dos fornos de ligas de magnésio

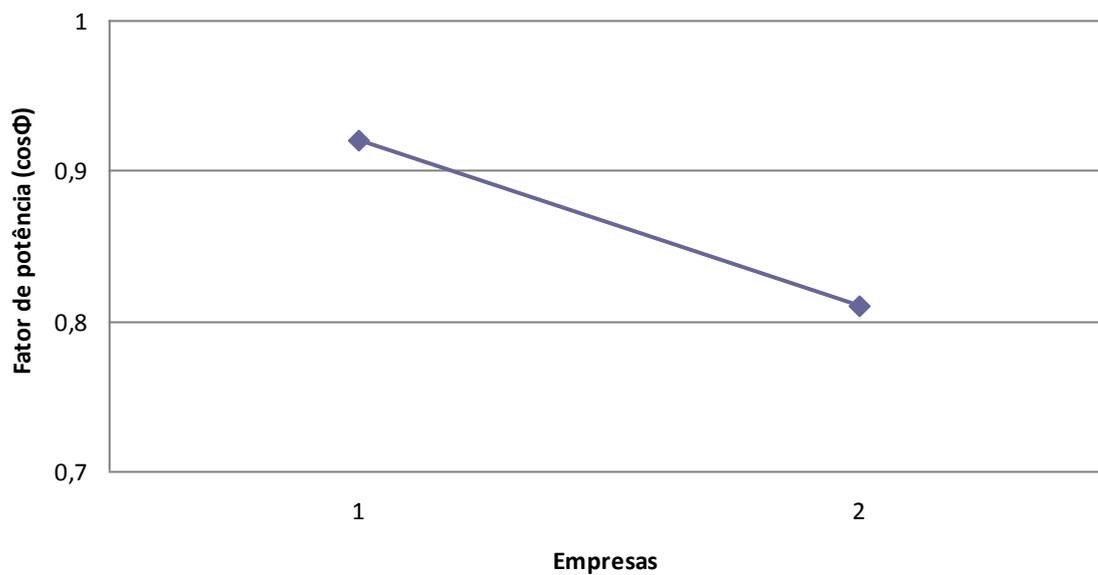


Figura 5.61: Fator de potência (cosΦ) dos fornos de ligas de magnésio

5.5.5 Fornos de ferro-silício-manganês

Para os fornos que produzem ferro-silício-manganês, as principais características estão demonstradas nas figuras 5.62 a 5.68.

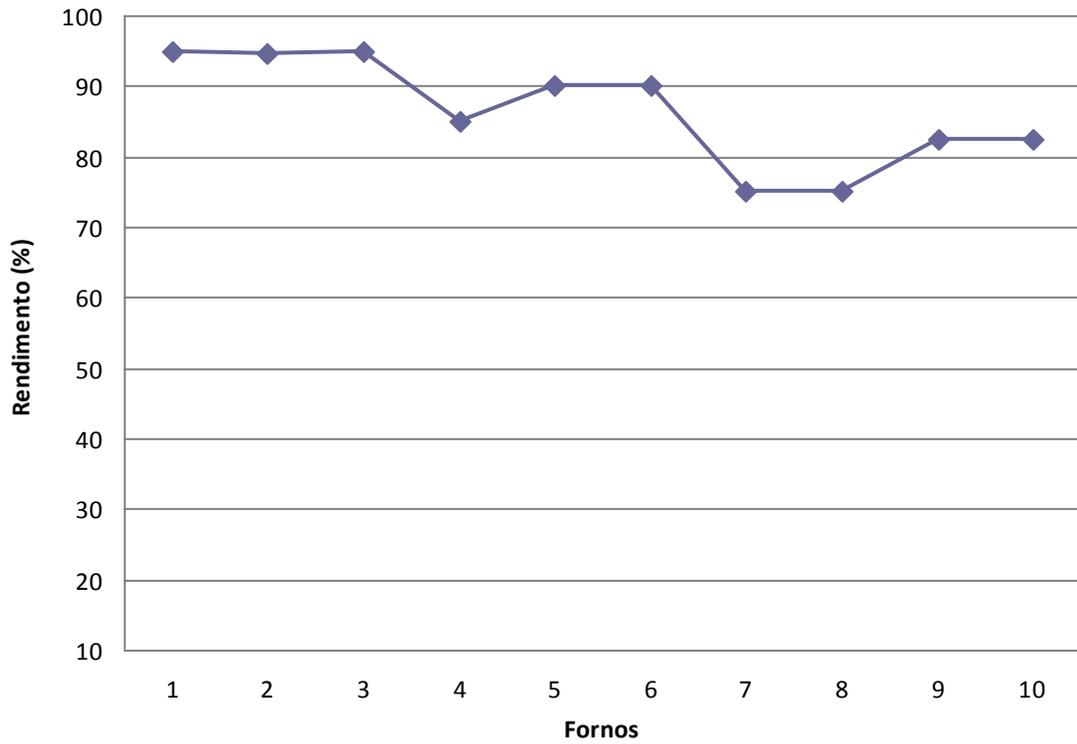


Figura 5.62: Rendimento dos fornos de ligas de ferro-silício-manganês

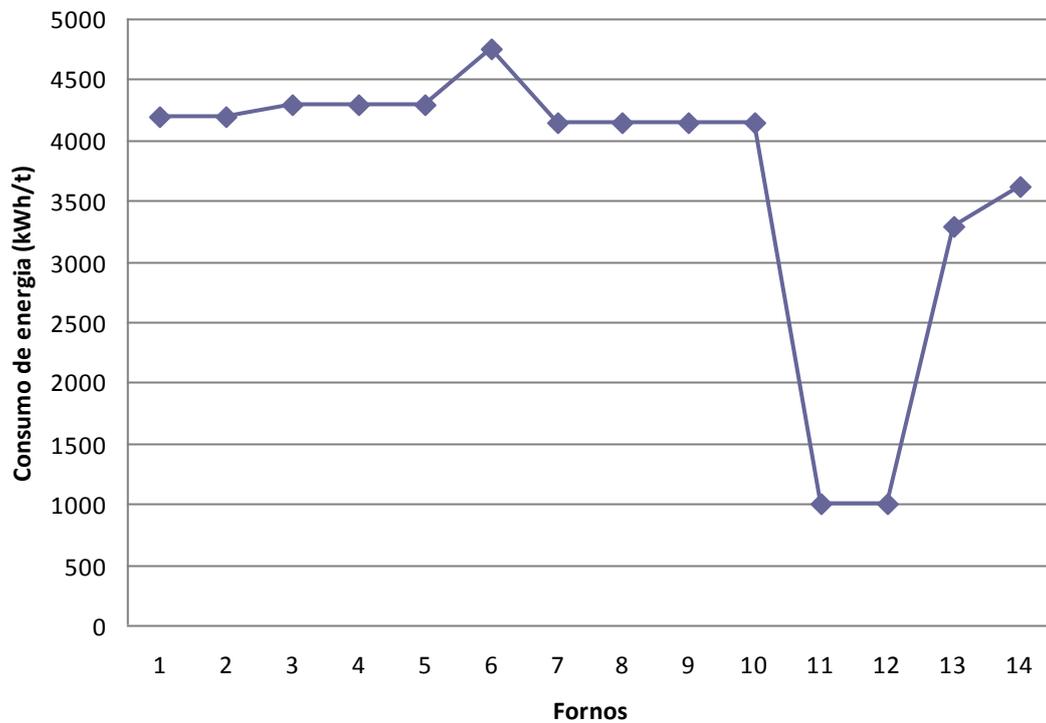


Figura 5.63: Consumo de energia dos fornos de ligas de ferro-silício-manganês

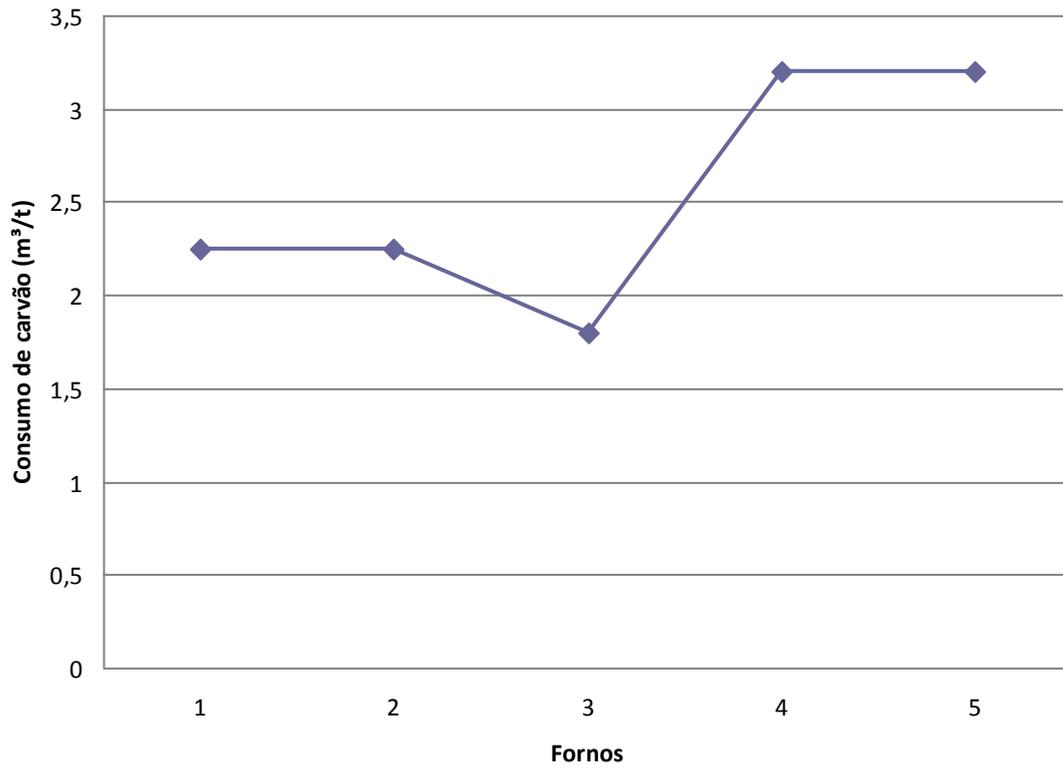


Figura 5.64: Consumo de carvão vegetal dos fornos de ligas de ferro-silício-manganês

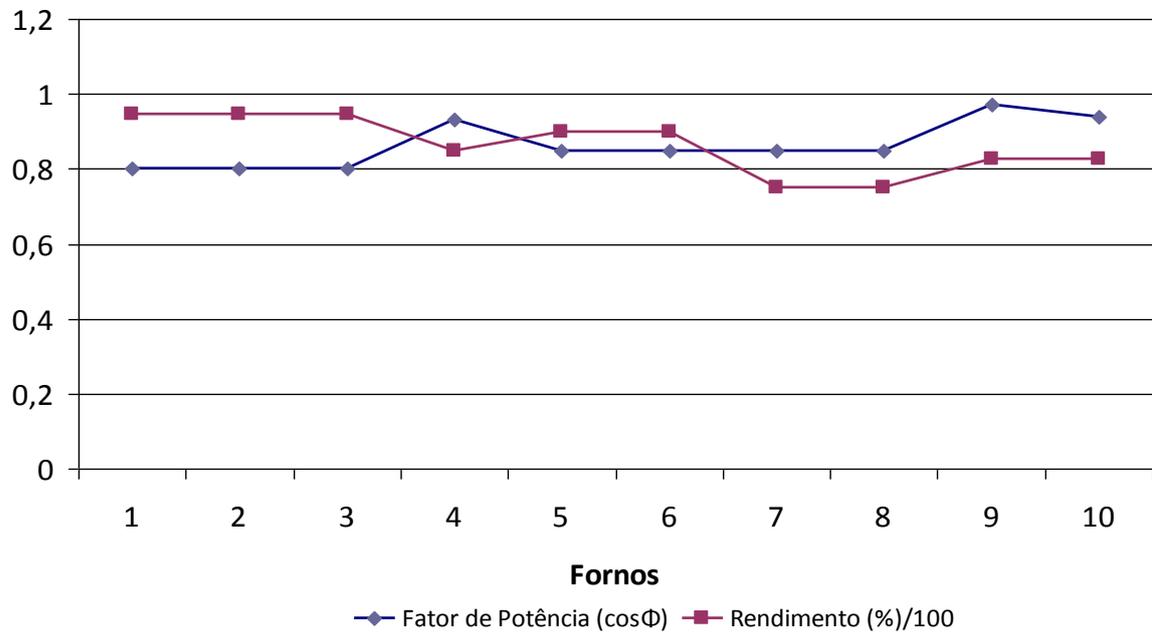


Figura 5.65: Relação rendimento versus fator de potência de fornos de ferro-silício-manganês

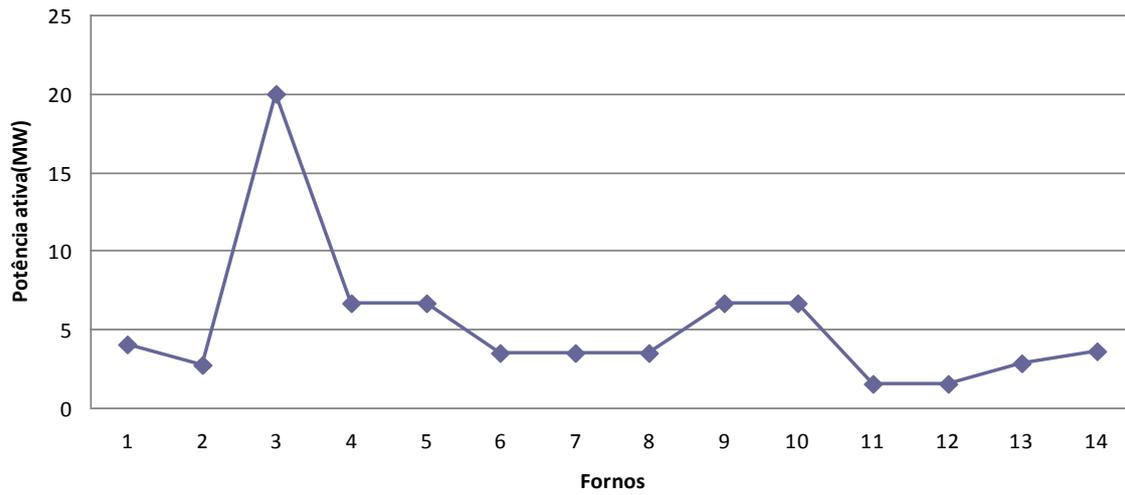


Figura 5.66: Potência dos fornos de ligas ferro-silício-manganês

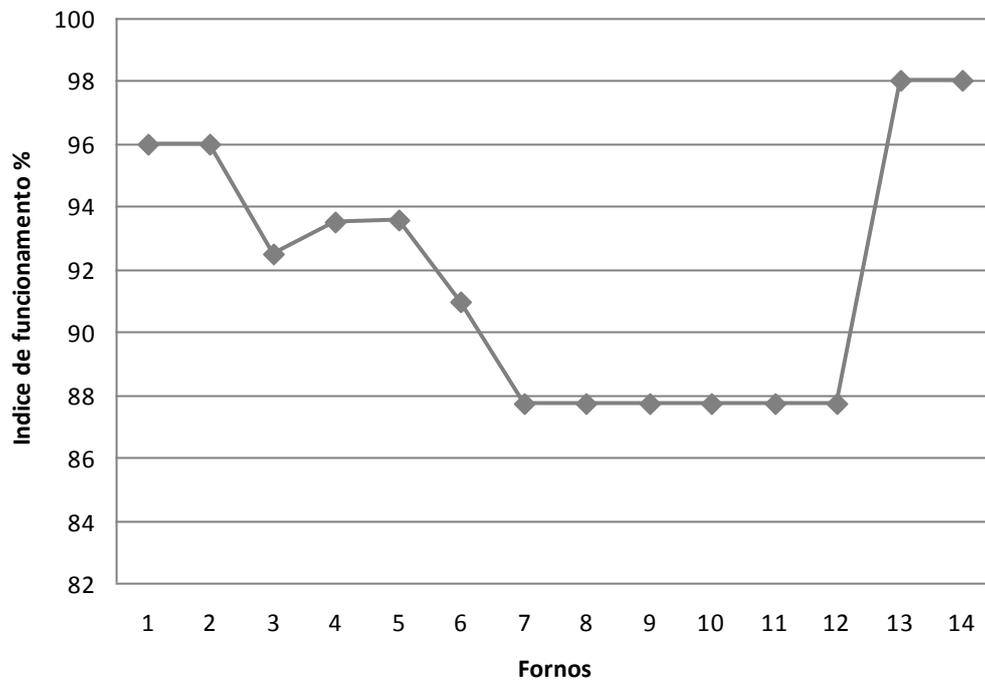


Figura 5.67: Índice de funcionamento dos fornos de ligas de ferro-silício-manganês

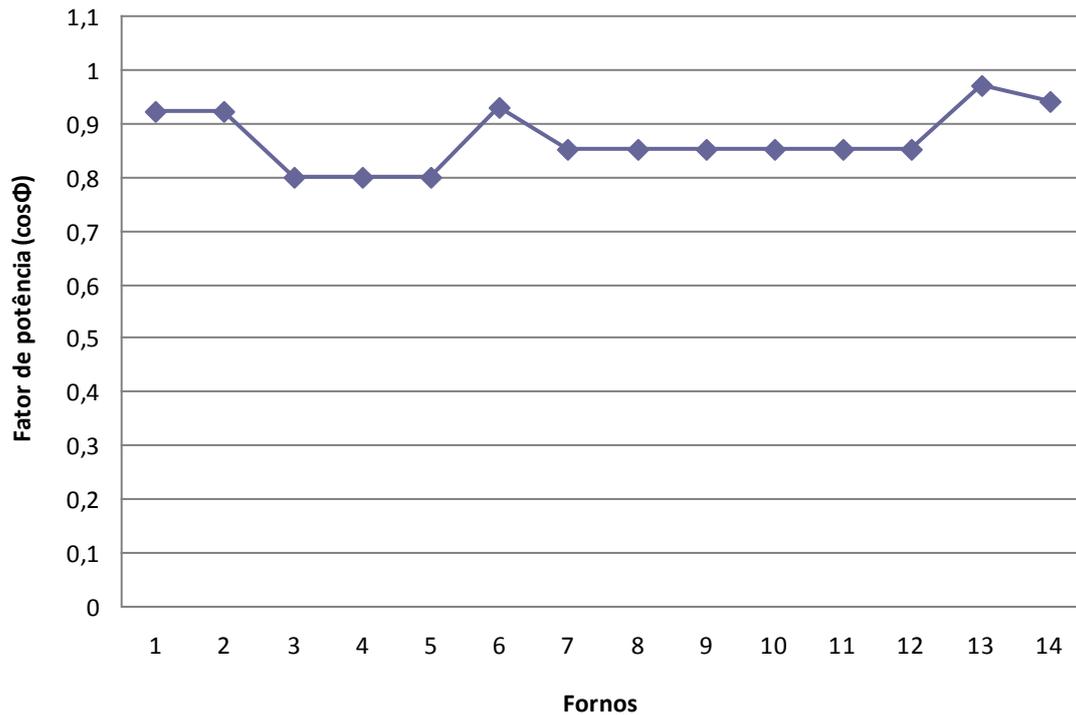


Figura 5.68: Fator de potência dos fornos de ferro-silício-manganês

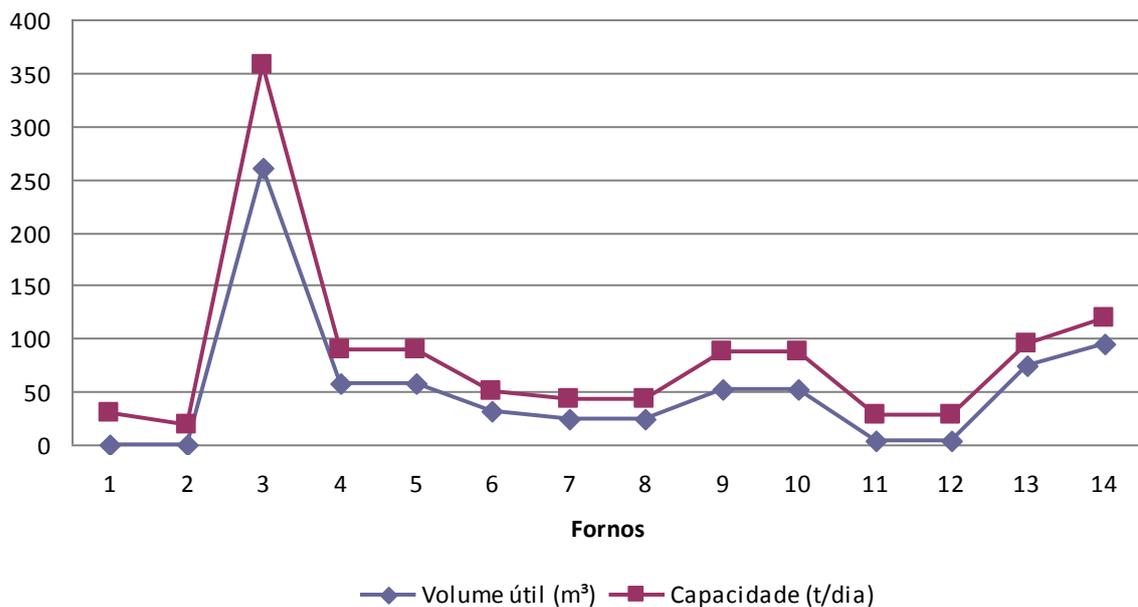


Figura 5.69: Relação capacidade volume útil para fornos produtores de ferro-silício-manganês

5.5.6 Fornos de ferro-manganês

Para os fornos que produzem ligas de ferro-manganês, as características centrais são apresentadas nos gráficos dispostos nas figuras 5.70 a 5.77. Nem todas as

empresas utilizavam carvão vegetal, e houve dados que não foram informados por elas.

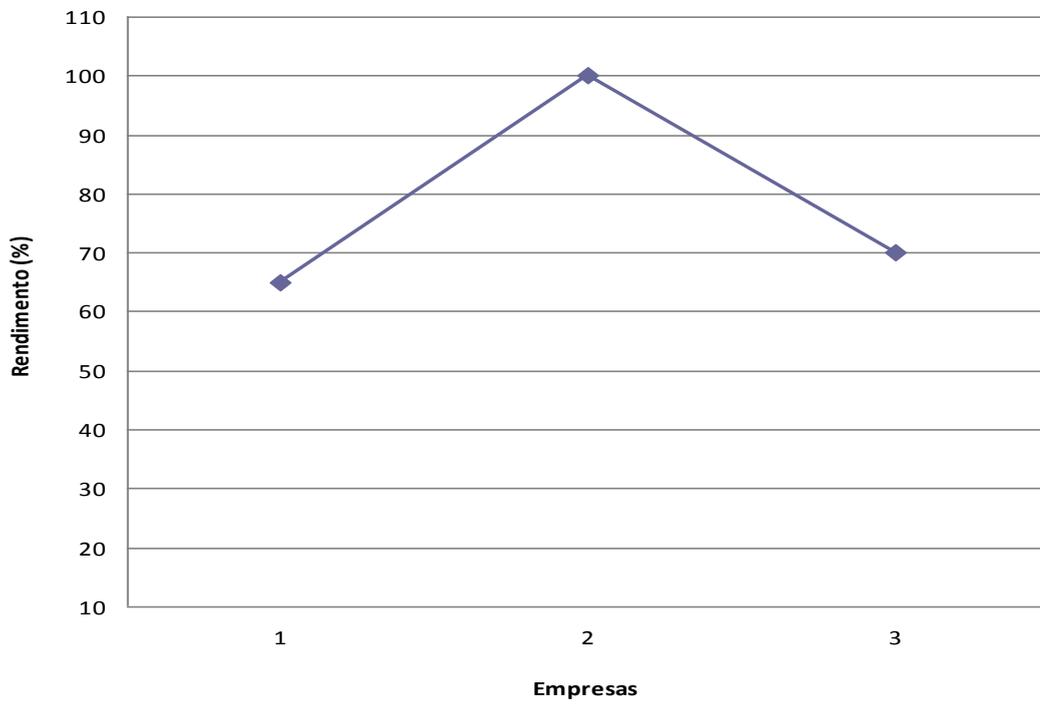


Figura 5.70: Rendimento dos fornos de ligas de ferro-manganês

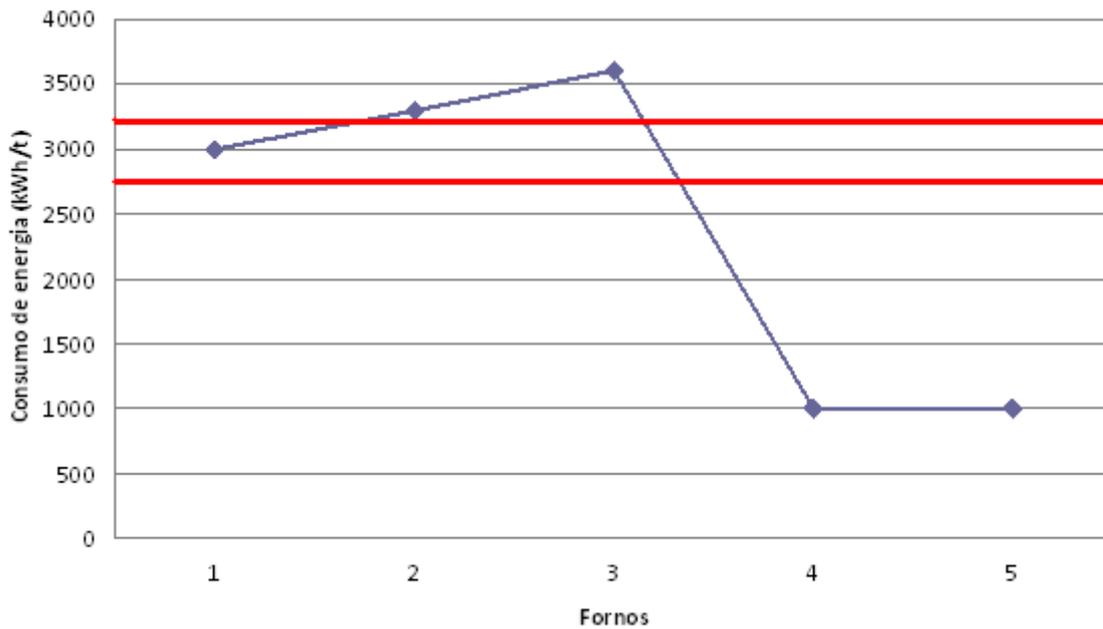


Figura 5.71: Consumo de energia dos fornos de ligas de ferro-manganês

Comparando-se com os dados da literatura para consumo de energia para fornos a arco submerso presentes na Tabela 2.2, sendo que para a liga de ferro-manganês corresponde à faixa de 2.800 a 3.200 kWh/t, percebe-se que alguns fornos estão em desconformidade com essa faixa de valores.

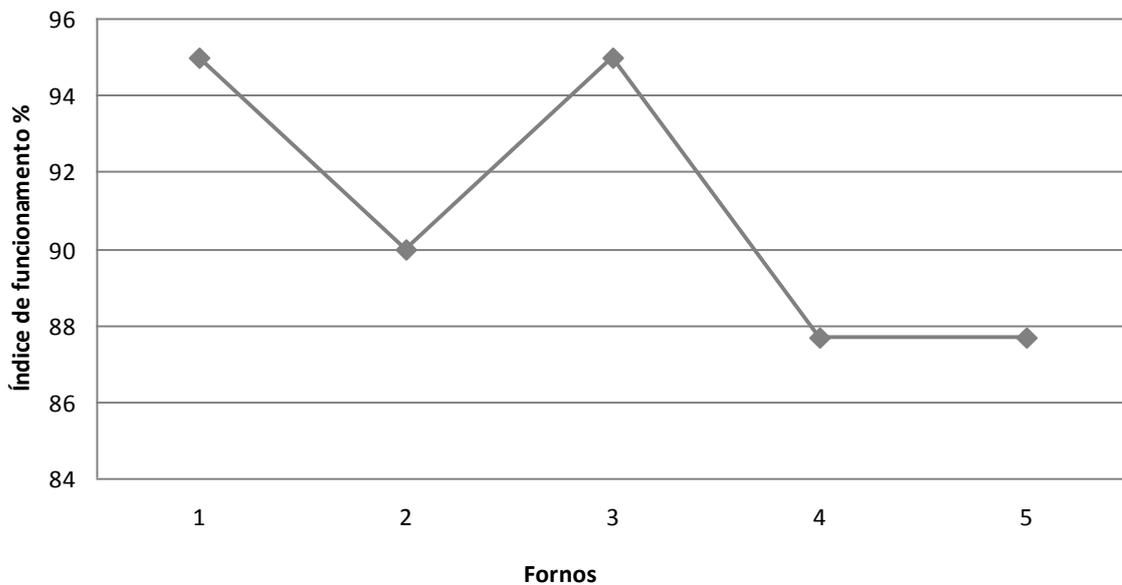


Figura 5.72: Índice de funcionamento dos fornos de ligas de ferro-manganês

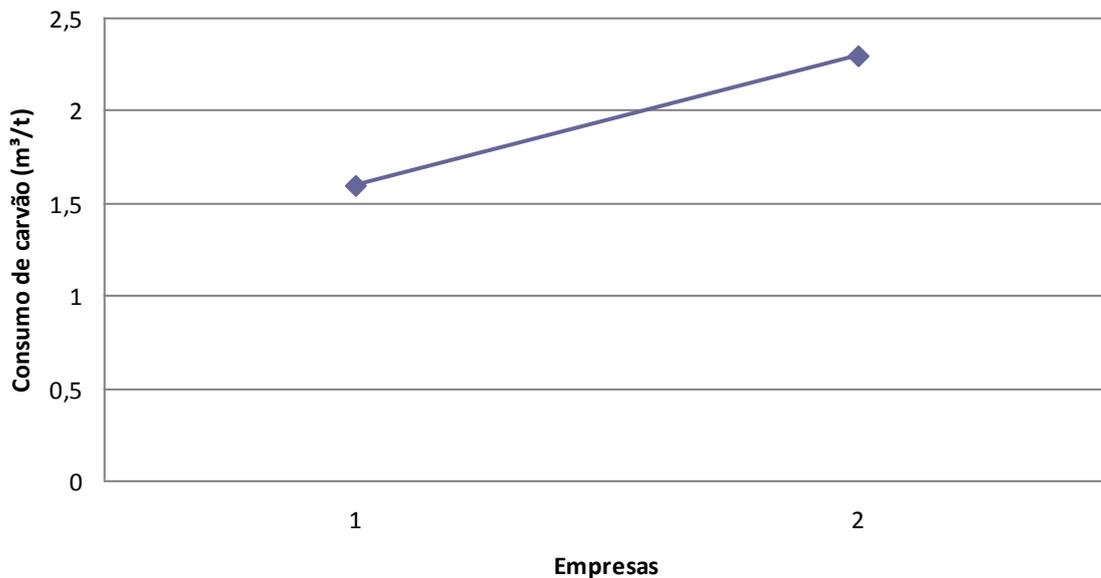


Figura 5.73: Consumo de carvão vegetal dos fornos de ligas de ferro-manganês

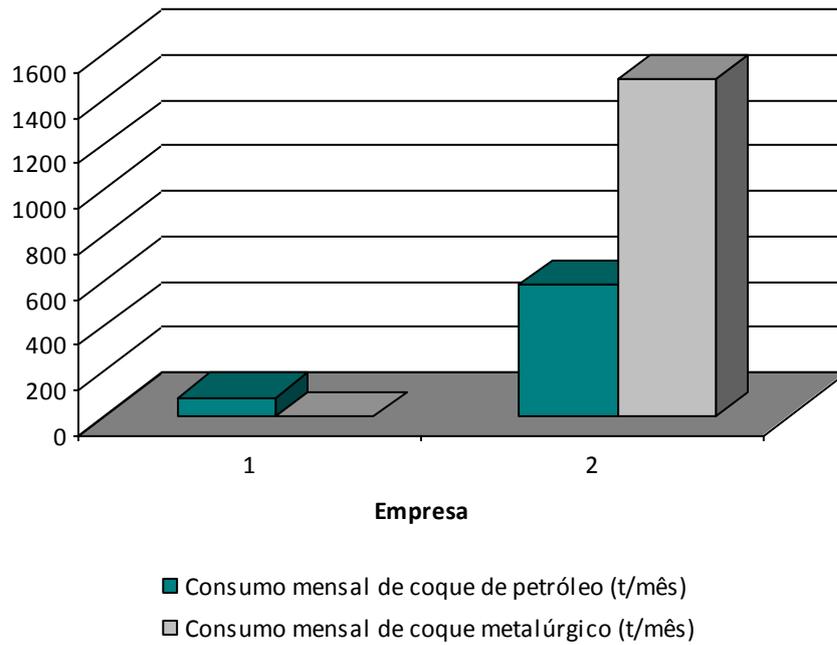


Figura 5.74: Consumo mensal de coque na produção de ligas de ferro-manganês

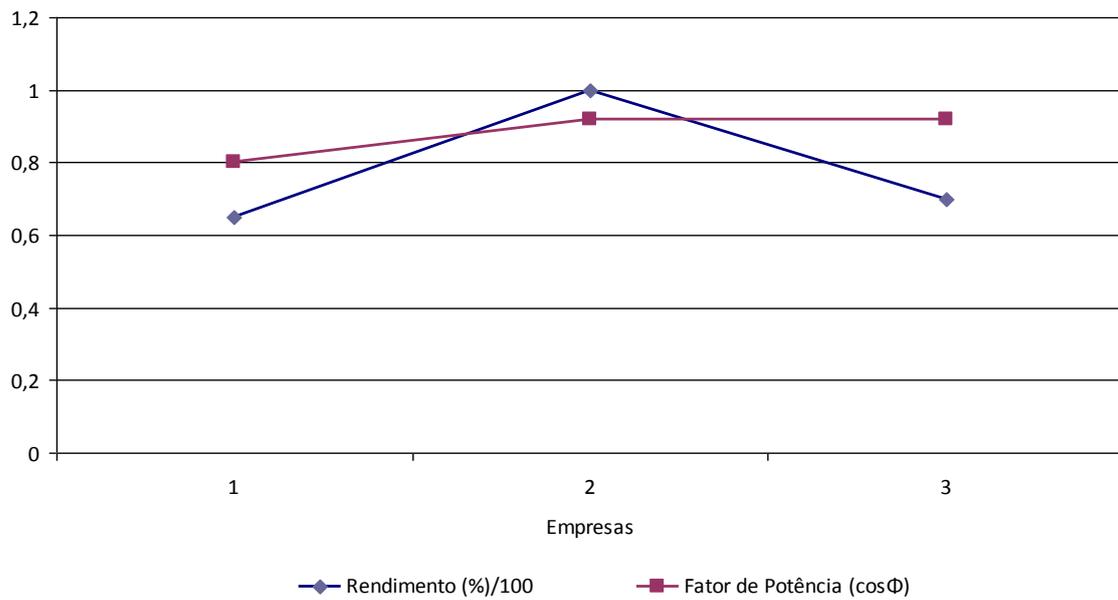


Figura 5.75: Relação rendimento versus fator de potência de fornos de ferro-manganês

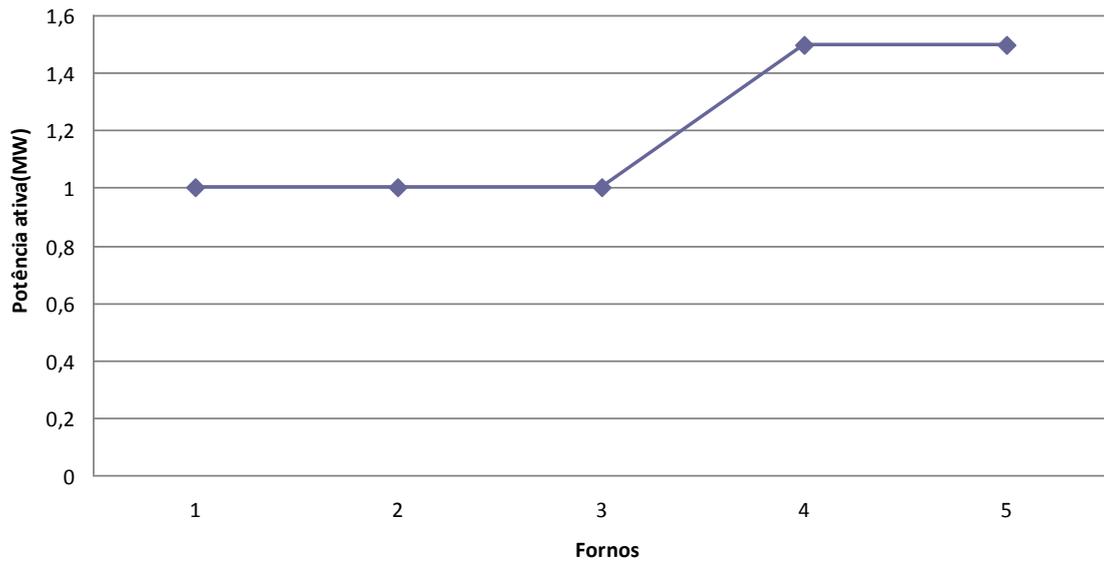


Figura 5.76: Potência dos fornos de ligas ferro-manganês

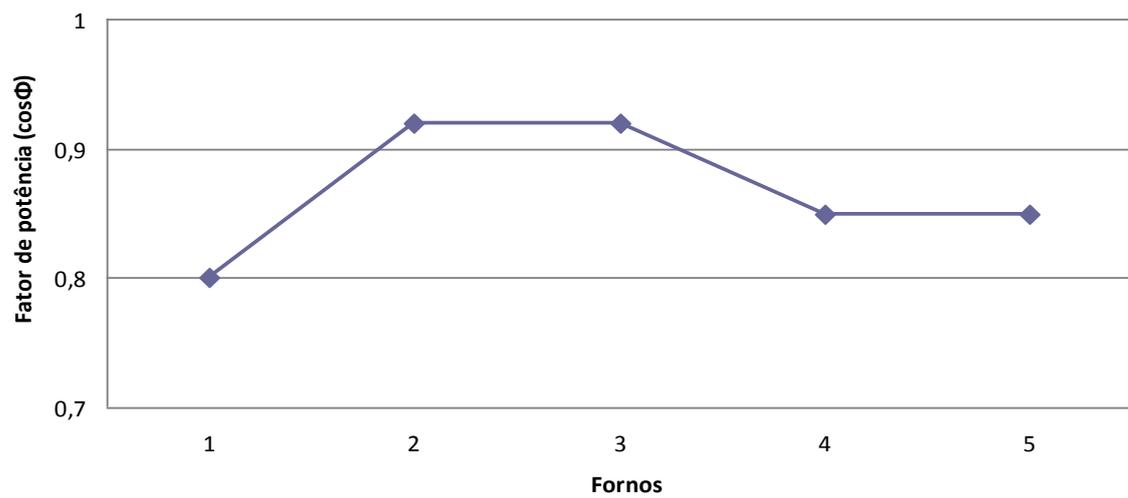


Figura 5.77: Fator de potência (cosΦ) dos fornos de ligas de ferro-manganês

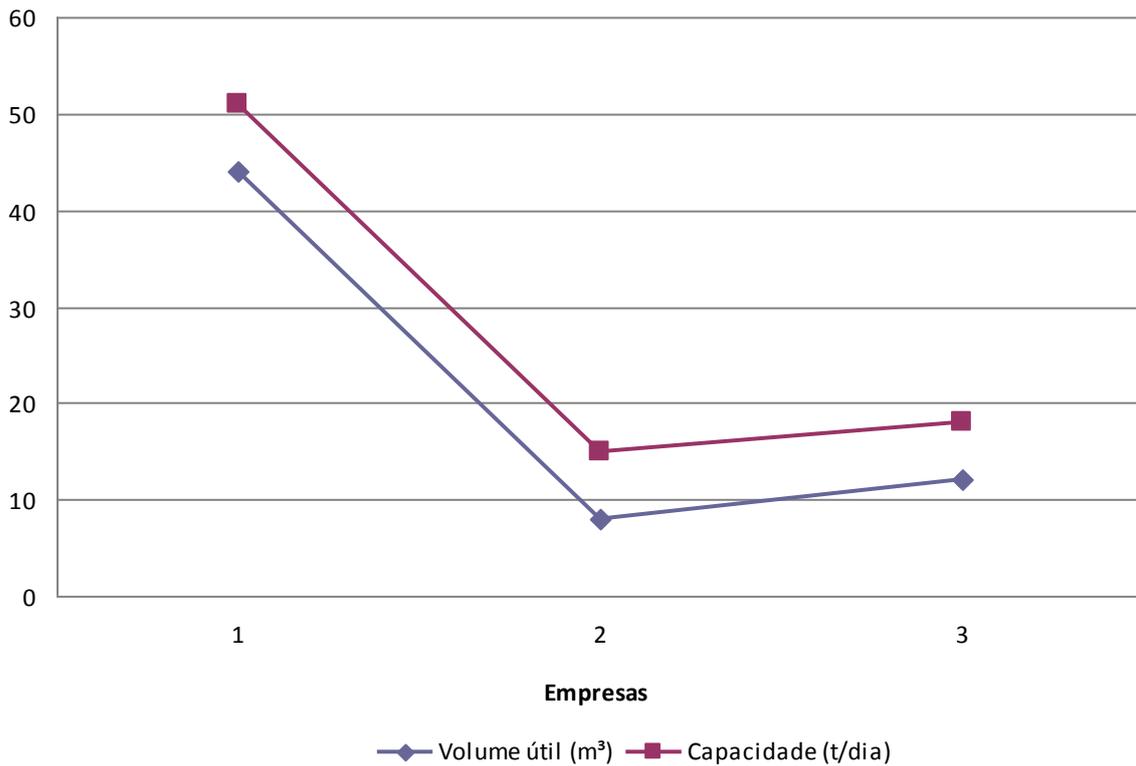


Figura 5.78: Relação capacidade volume útil para fornos produtores de ferro-manganês

5.5.7 Fornos de carbureto de cálcio, ferro-nióbio e ferro-fósforo

Para a produção das ligas carbureto de cálcio, ferro-nióbio e ferro-fósforo, as principais características da produção são dispostas nos gráficos das Figuras 5.79 a 5.82.

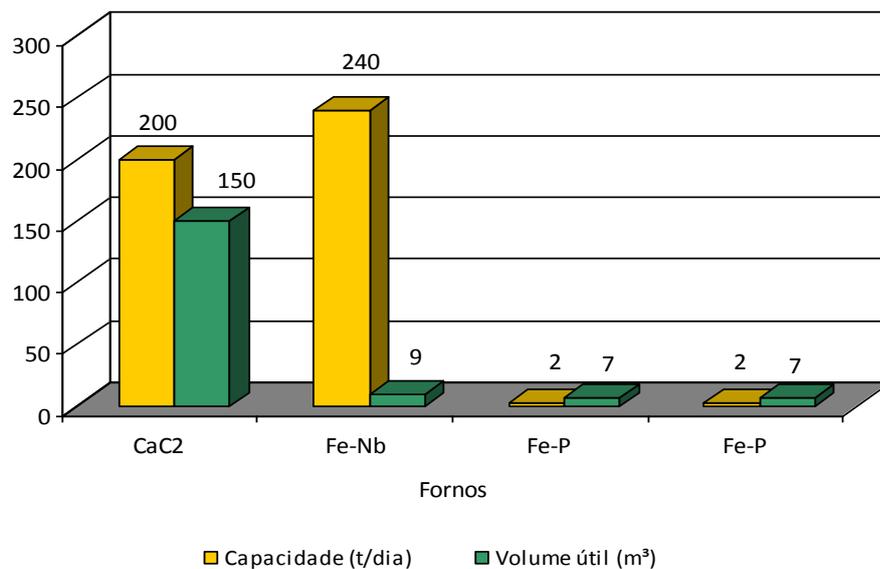


Figura 5.79: Relação capacidade volume útil para fornos produtores de ligas

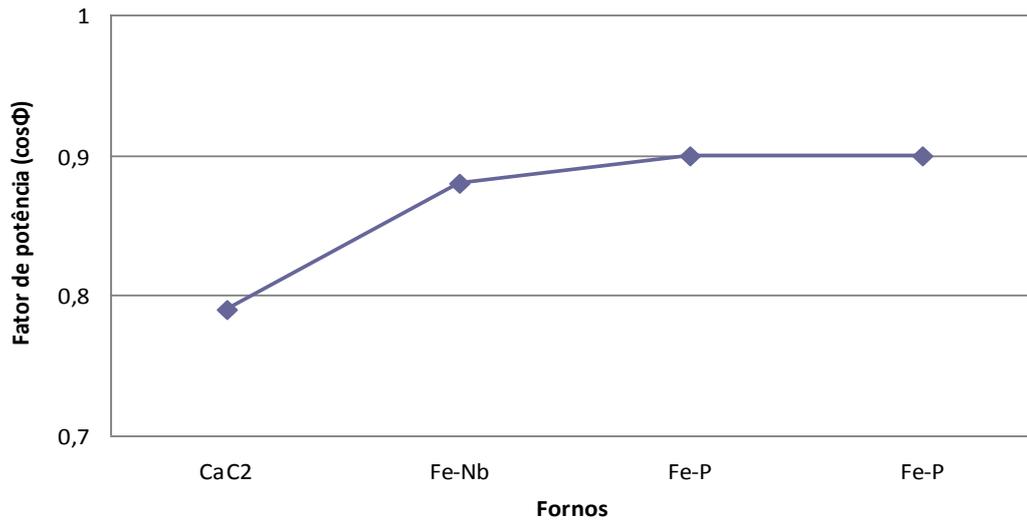


Figura 5.80: Fator de potência ($\cos\Phi$) dos fornos de liga

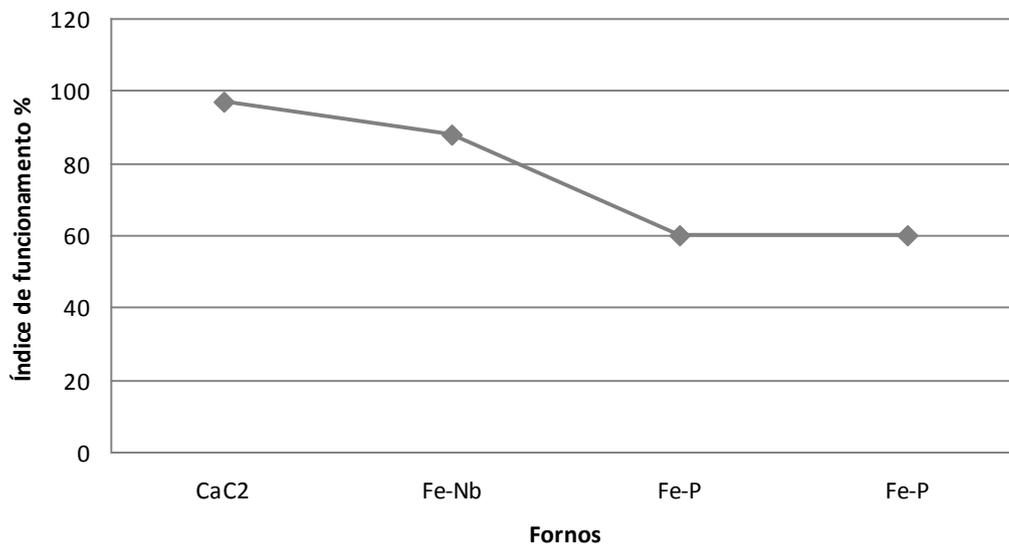


Figura 5.81: Índice de funcionamento dos fornos de liga

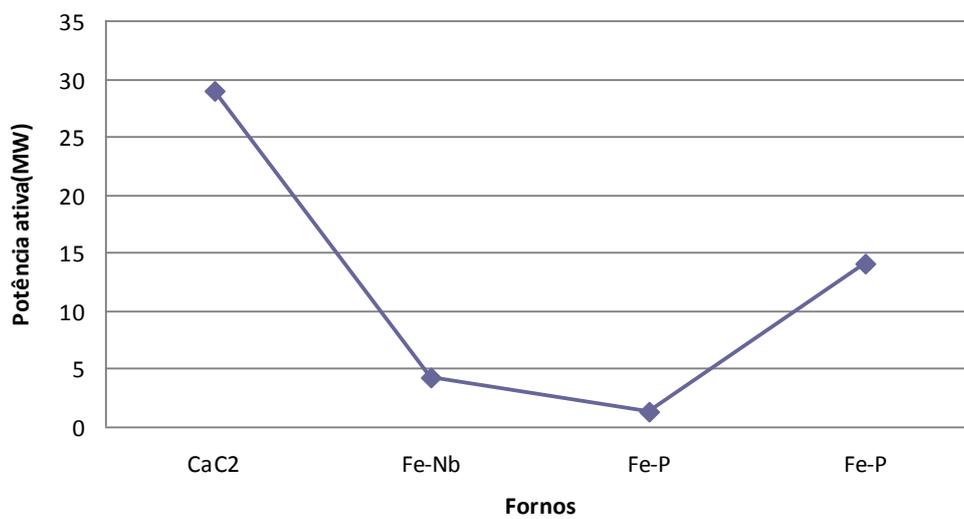


Figura 5.82: Potência dos fornos de ligas

5.5.8 Comparações gerais para as diferentes ligas

Para efeito de comparação, para as várias ligas produzidas, as propriedades dos fornos elétricos foram reunidas em gráficos específicos, apresentados nas Figuras 5.83 a 5.89.

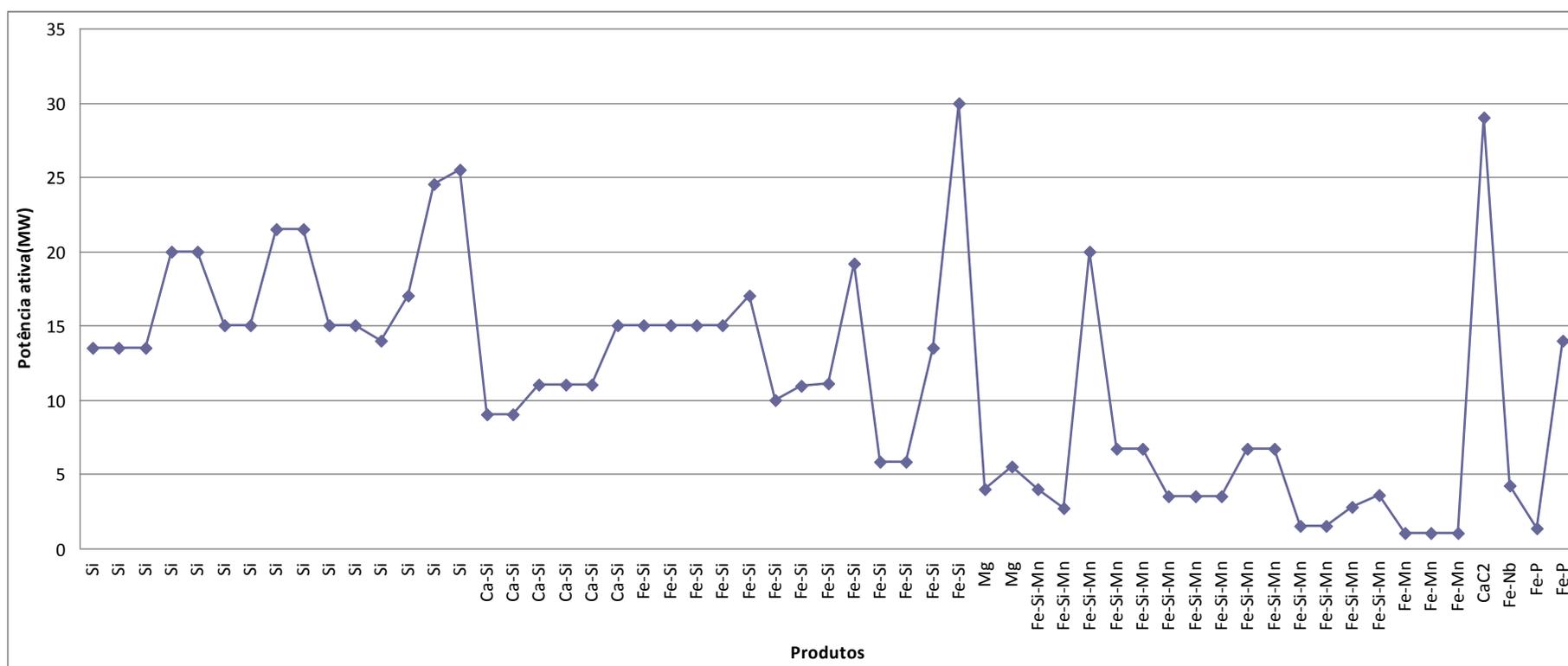


Figura 5.83: Potência dos fornos de ligas

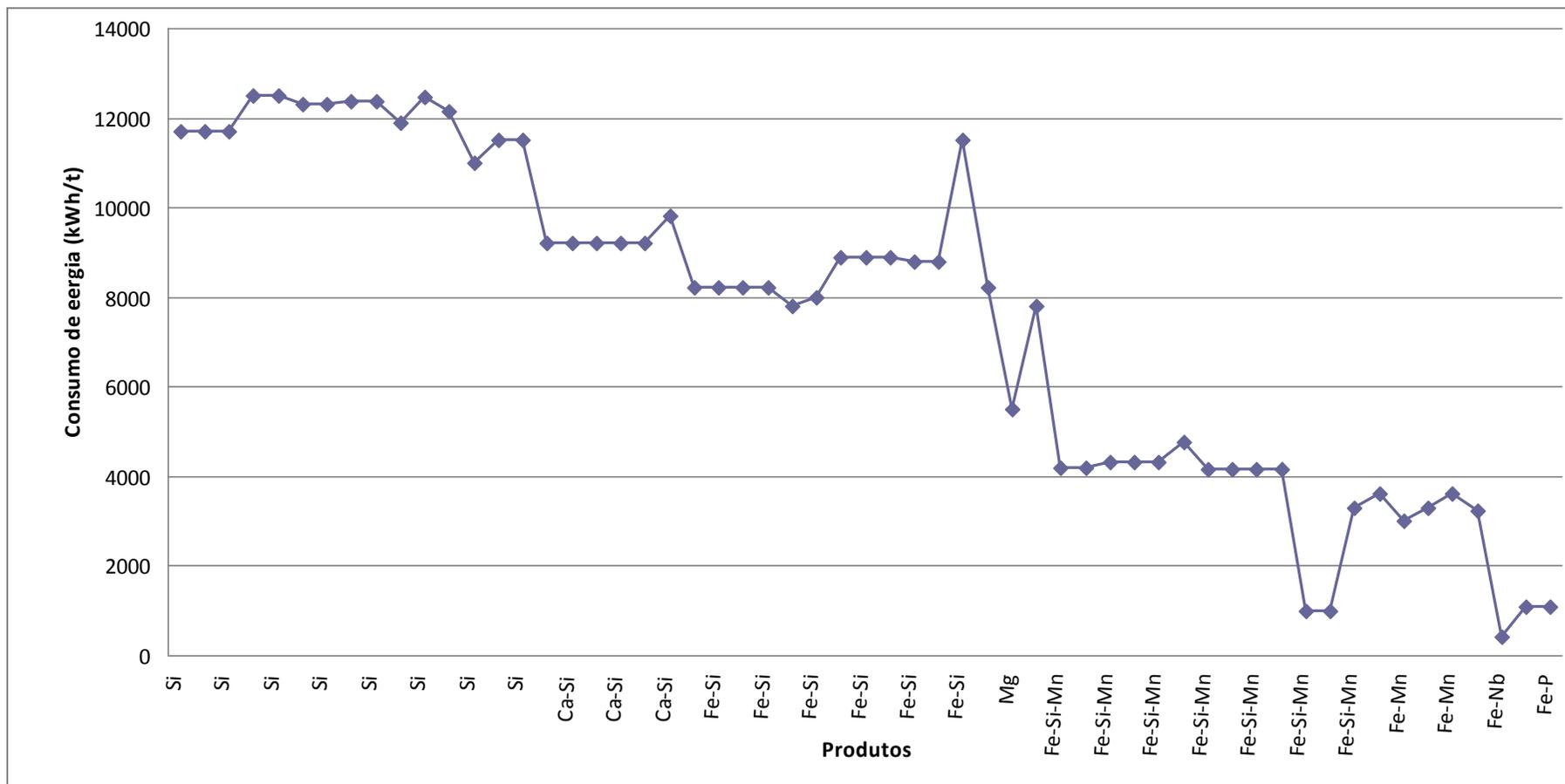


Figura 5.84: Consumo de energia dos fornos de ligas

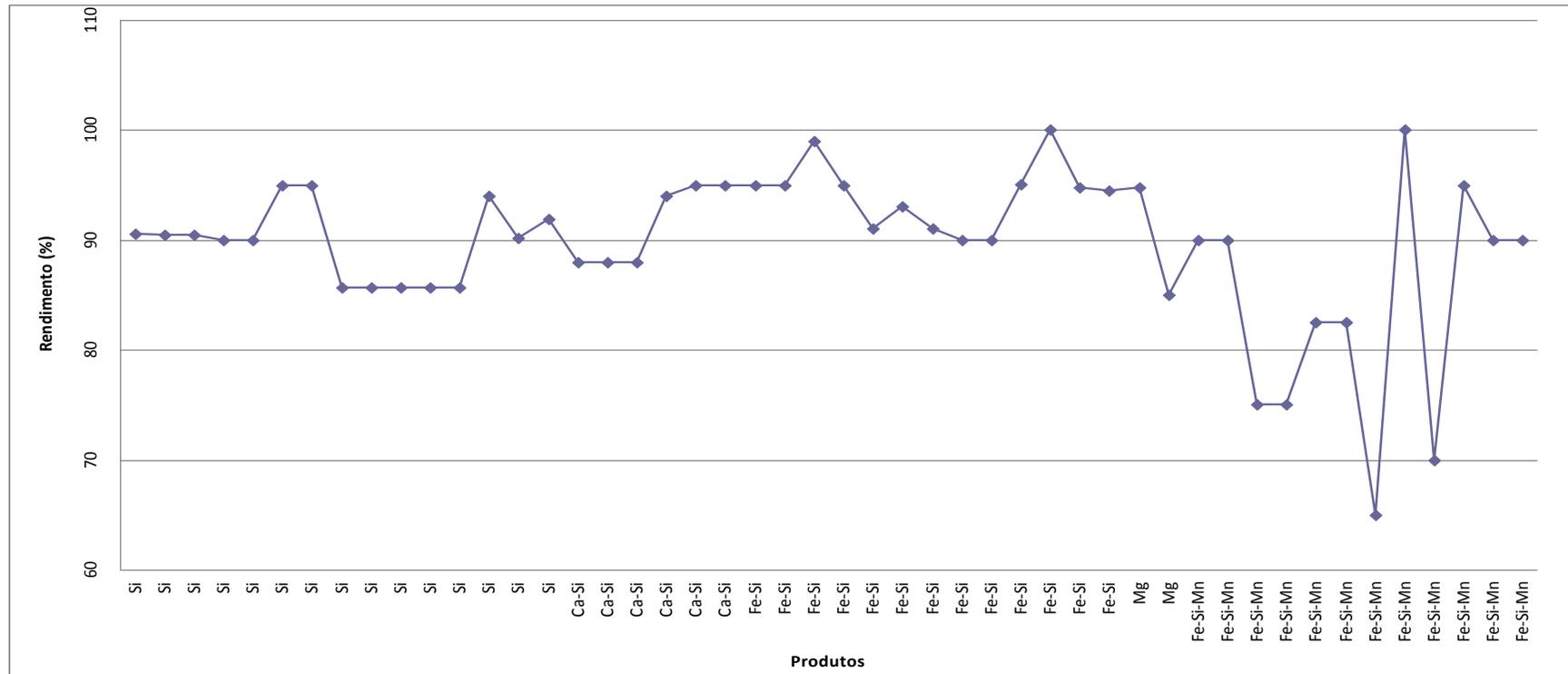


Figura 5.85: Rendimento dos fornos de ligas

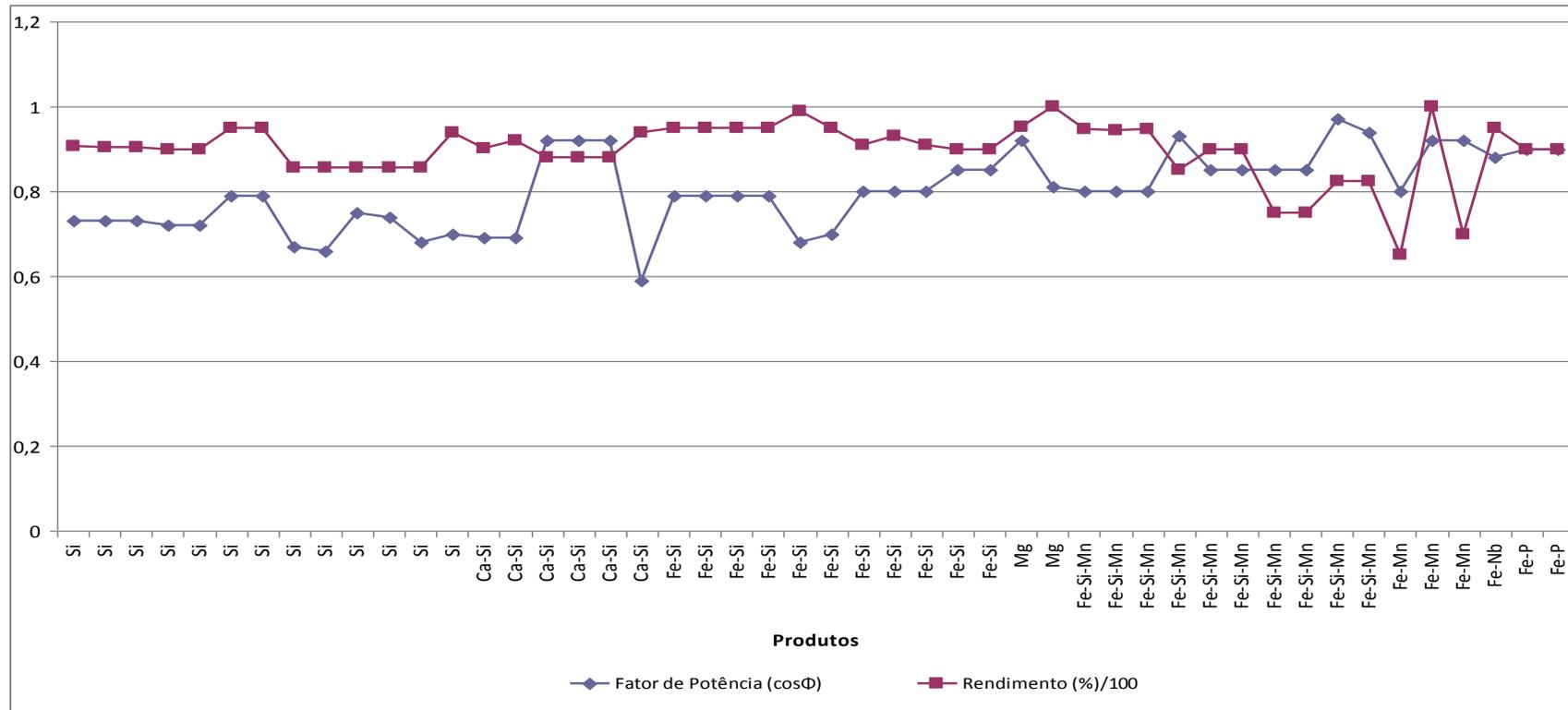


Figura 5.86: Relação rendimento versus fator de potência de fornos de ligas

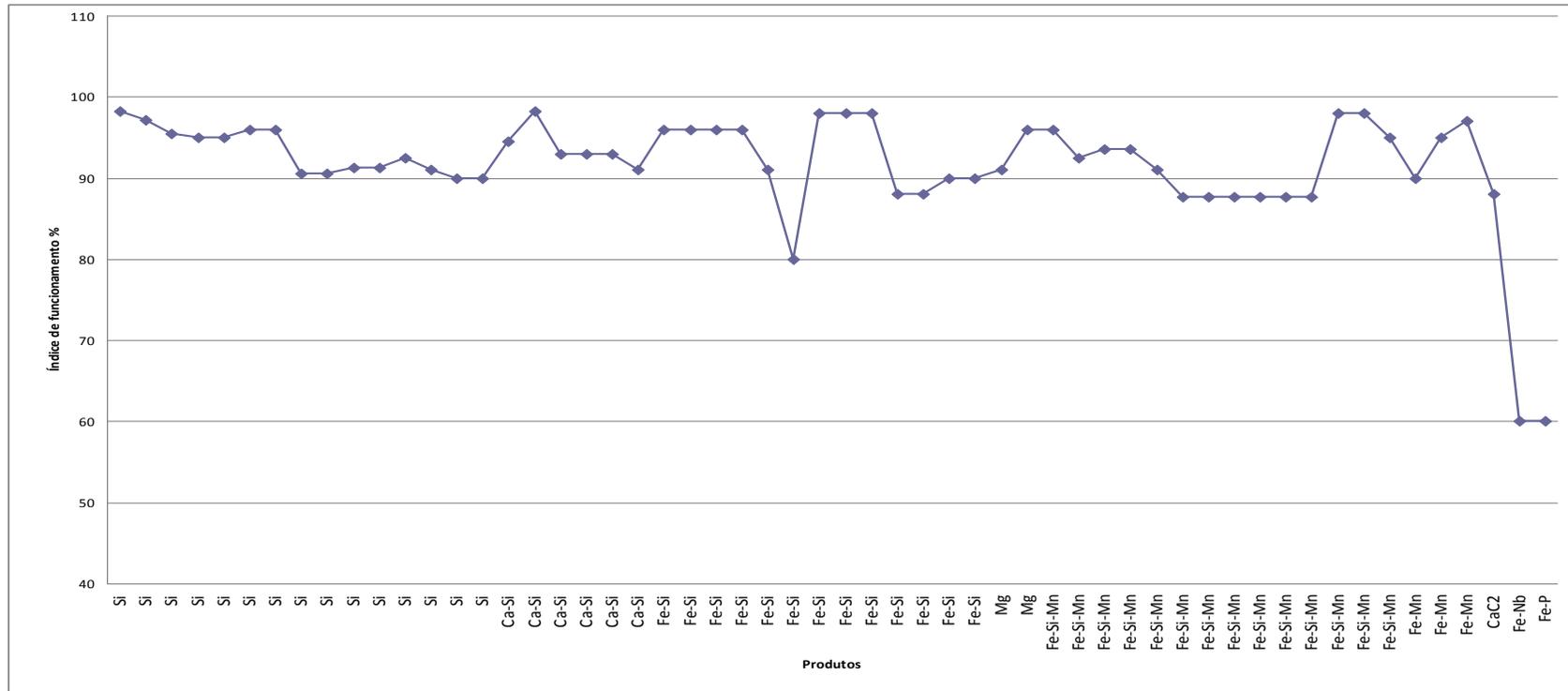


Figura 5.87: Índice de funcionamento dos fornos de liga

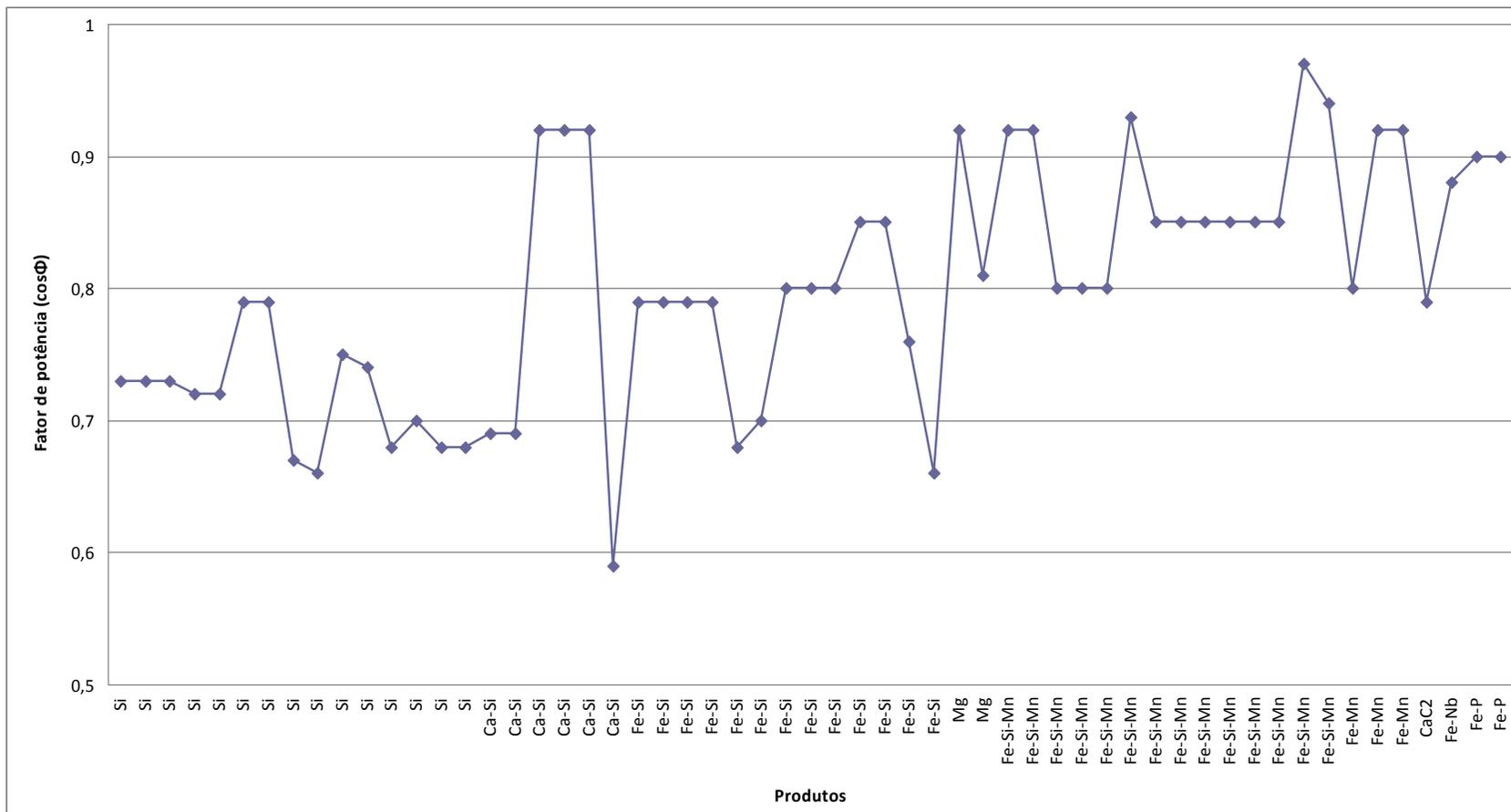


Figura 5.88: Fator de potência (cosΦ) dos fornos de ligas

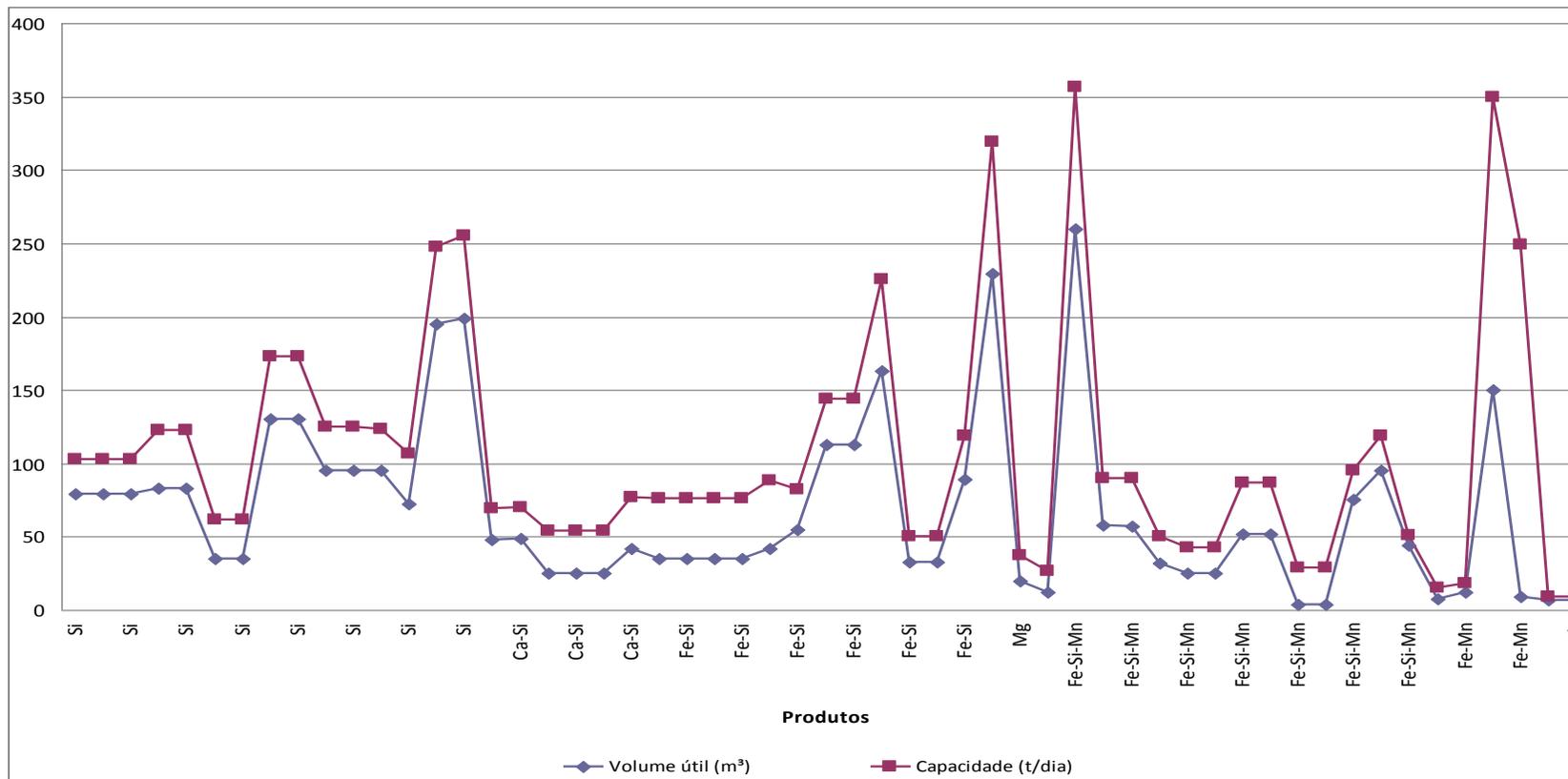


Figura 5.89: Capacidade e volume útil do forno para produção de ligas

5.6 Avaliação Ambiental e Energética

5.6.1 Controle de emissões atmosféricas

As vazões de gases dos fornos estão representadas nas figuras 5.91 a 5.96 sendo que estão demonstradas as vazões em relação à produção da liga.

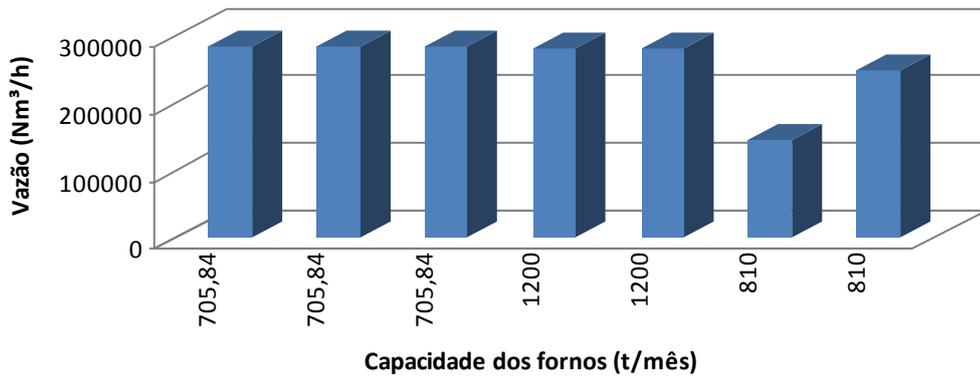


Figura 5.91: Vazão de gás do forno de produção de silício metálico

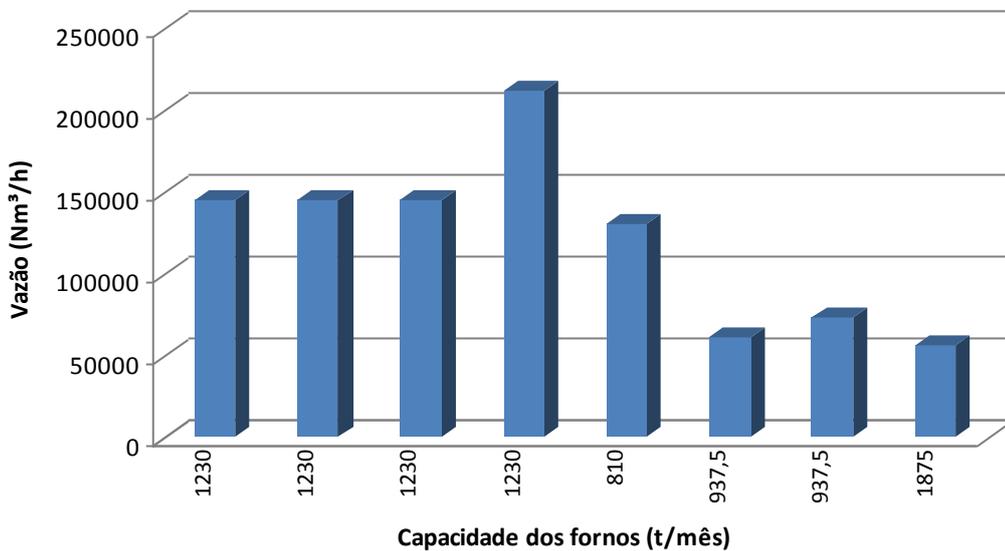


Figura 5.92: Vazão de gás do forno de produção de ferro-silício

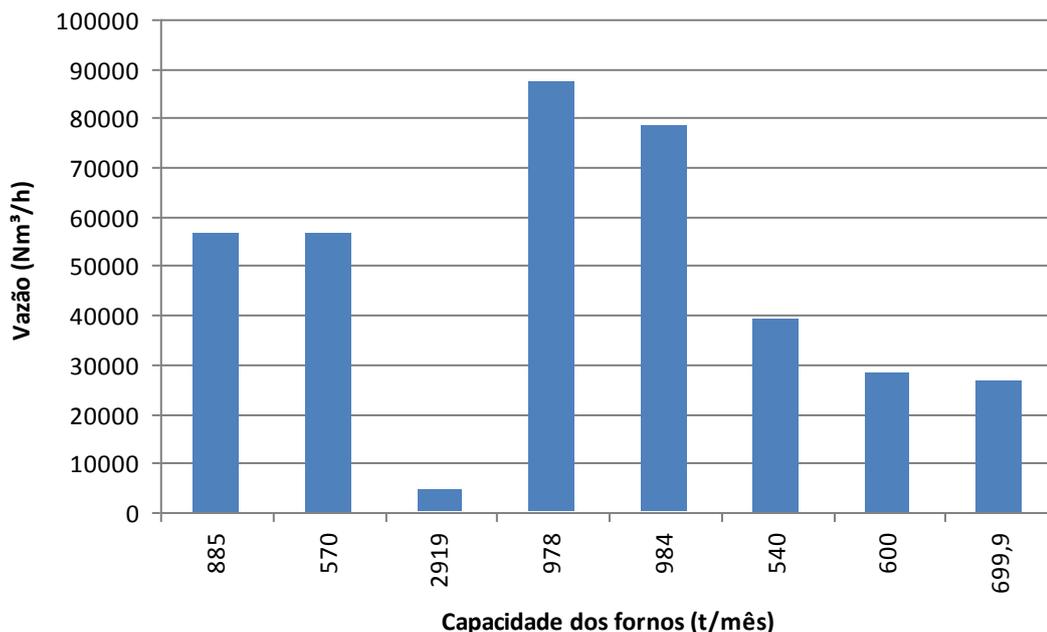


Figura 5.93: Vazão de gás do forno de produção de ferro-silício-manganês

Com relação ao gráfico da figura 5.93, é possível verificar-se que a vazão é notavelmente menor para o forno de produção 2.919 t/mês. Isso se deve ao fato de ele ser fechado.

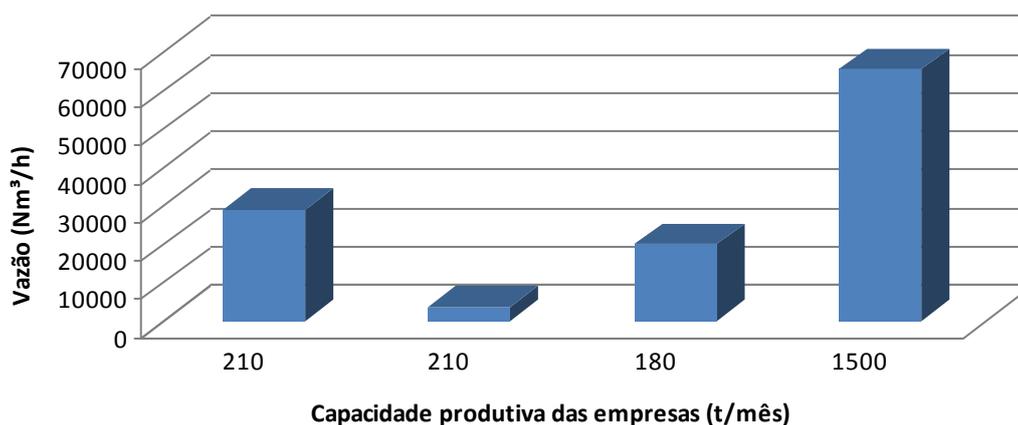


Figura 5.94: Vazão de gás do forno de produção de ferro-manganês

Com relação à figura 5.94, vale observar que se tratou da capacidade produtiva das empresas, ao invés de dados individuais de fornos, dado que uma delas possuía um sistema de exaustão que canalizava os efluentes de vários fornos. Dessa forma, sua

vazão de gás não diz respeito apenas a um forno, e sim a dois. Assim sendo, preferiu-se tomar a vazão de gás conjunta e a produção total de liga da empresa.

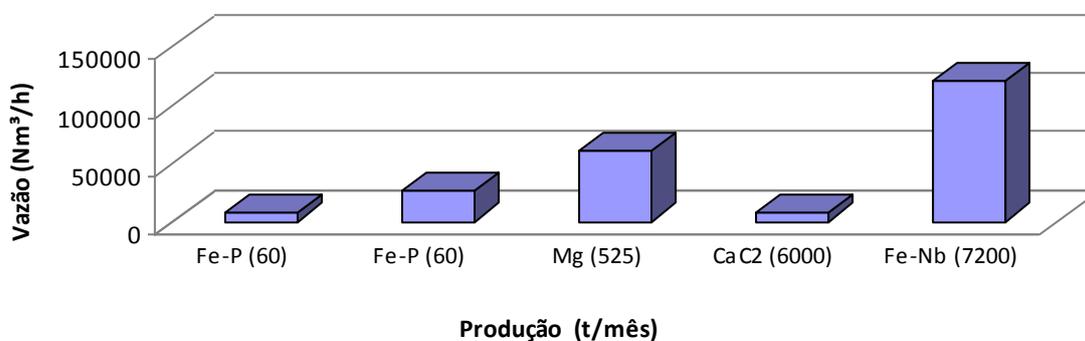


Figura 5.95: Vazão de gás do forno de produção de ligas

A figura 5.96 fornece uma visão geral de vazão de gás por produção de liga.

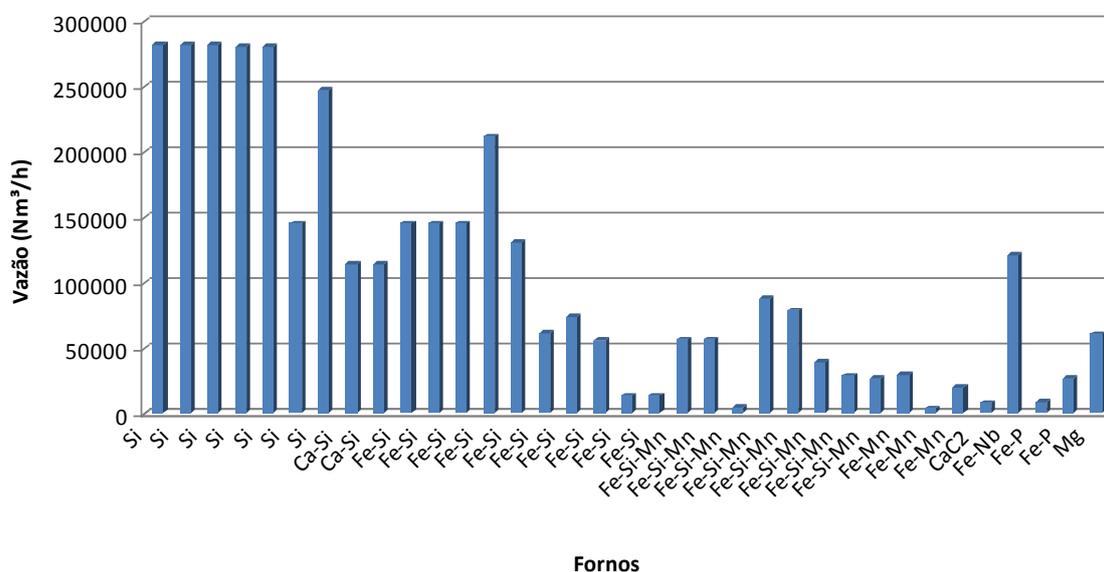


Figura 5.96: Vazão de gás do forno de produção de ligas

Os gráficos demonstram o potencial impacto negativo ao ambiente relativo às emissões atmosféricas, que pode ser visualizado nas fotos 5.3 a 5.5, obtidas durante

o desenvolvimento deste estudo, quando das visitas técnicas aos empreendimentos do setor de ferroligas em Minas Gerais, onde se observa uma “nuvem” de material particulado que se forma nas proximidades da cidade de Pirapora. No Capítulo 3 deste relatório, se encontram descritos os possíveis efeitos nocivos desse tipo de emissão à saúde humana e ao ambiente.



Foto 5.3: Emissão de material particulado de uma planta industrial de ferroligas, formando uma espécie de “nuvem” no seu entorno



Foto 5.4: Visualização da dispersão da pluma de material particulado, referente ao mesmo empreendimento da foto 5.3.



Foto 5.5: Emissão de material particulado de outro empreendimento de ferroligas

5.6.1.1 Desempenho dos sistemas de controle de emissões

Durante o presente estudo, foi possível observar-se que o setor de ferroligas em Minas Gerais possui poucos dados disponíveis sobre emissão de particulados, sendo reduzido o número de empreendimentos que possuem equipamentos de controle de poluição.

- Filtros de mangas

A análise dos dados, obtidos nesta pesquisa, foi feita de forma a comparar o desempenho dos filtros existentes no setor de ferroligas, por meio dos resultados de monitoramento de emissões atmosféricas e, ainda, comparar o nível das emissões de fornos que operam sem filtros de mangas. Esses resultados são apresentados na Figura 5.97 e nas Tabelas 5.5 a 5.7.

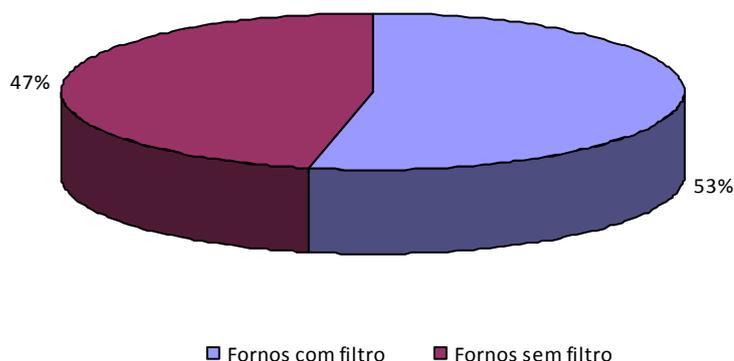


Figura 5.97: Percentual de fornos com e sem filtro no setor de ferroligas

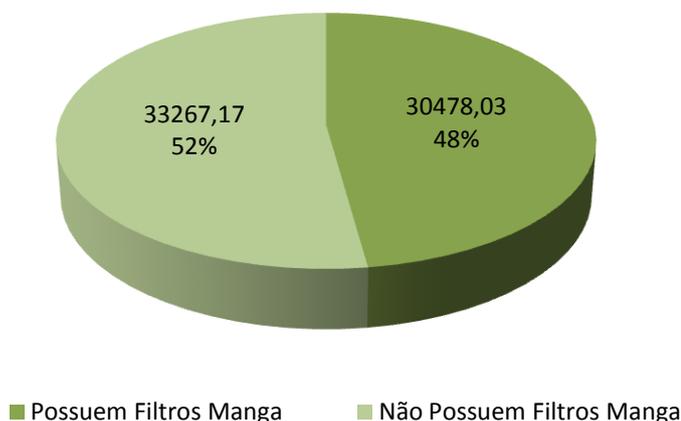


Figura 5.98: Percentual de empresas com e sem filtro no setor de ferroligas

Observa-se que, basicamente, metade dos fornos produtores de ferroligas em Minas Gerais opera com filtros de mangas para o controle de suas emissões. Dentre o total de sessenta fornos existentes no Estado, 32 possuem filtros de mangas para tratamento de suas emissões, enquanto os demais 28 não possuem qualquer sistema de controle.

Quanto ao monitoramento das emissões, por outro lado, o número de fornos que dispõem de resultados ou que realizam as campanhas de amostragem em chaminé é reduzido. Dos sessenta fornos, foi possível analisar os dados de monitoramento de somente vinte e quatro fornos, posto que os demais não apresentaram nenhum

dado de controle de emissões. Desses vinte e quatro fornos, somente oito operam com filtros.

Nas Tabelas 5.5 e 5.6 são apresentados os resultados do monitoramento de emissões atmosféricas, quanto ao parâmetro material particulado, relativos ao ano de 2009, para os fornos que possuem filtros e para os fornos sem qualquer sistema de controle, respectivamente.

É possível observar que, para os fornos que operam com filtros, a taxa mássica anual total de lançamento de particulados na atmosfera é drasticamente menor do que aquela apresentada pelos fornos que operam sem filtros.

Tabela 5.5 – Dados de monitoramento de emissões de efluentes gasosos para fornos produtores de ferroligas com filtros de mangas em Minas Gerais

Forno	Vazão (Nm ³ /h)	Concentração de particulados (mg/Nm ³)	CO (%volume)	Massa de particulados lançada na atmosfera (t/ano)	Volume de CO lançado na atmosfera (milhões de Nm ³ /ano)
1	56.500	16	0	7,81	0,00
2	56.500	16	0	7,81	0,00
3	87.488,7	24,41	1,27	18,45	9,60
4	78.584,22	25,49	0,98	17,31	6,65
5	29.000	150	<0,1	37,58	<0,25
6	7.739	Não analisado	56	Não foi possível estimar	37,44
7	212.000	12	Não analisado	21,98	Não foi possível estimar
8	247.000	4	Não analisado	8,54	Não foi possível estimar
Total (t/ano)				119,48	*

Tabela 5.6 – Dados de emissões de efluentes gasosos para fornos produtores de ferroligas sem filtro em Minas Gerais

Forno	Vazão (Nm³/h)	Concentração de particulados (mg/Nm³)	CO (%volume)	Massa de particulados lançada na atmosfera (t/ano)	Volume de CO lançado na atmosfera (milhões de Nm³/ano)
1	4290	12.407	76,8	460	28,47
2	280.000	2.000	Não analisado	4.838	Não foi possível estimar
3	280.000	1.800	Não analisado	4.355	Não foi possível estimar
4	280.000	1.800	Não analisado	4.355	Não foi possível estimar
5	145.106	2.010	Não analisado	2.520	Não foi possível estimar
6	145.106	2.010	Não analisado	2.520	Não foi possível estimar
7	145.106	2.010	Não analisado	2.520	Não foi possível estimar
8	145.106	2.010	Não analisado	2.520	Não foi possível estimar
9	49.745,95	621,96	Menor que limite de quantificação	267	Não foi possível estimar
10	3.500	55	15	2	4,54
11	61.050	1.361,03	Não analisado	718	Não foi possível estimar
12	7.3441	1.779,6	Não analisado	1.129	Não foi possível estimar
13	5.5971	1.150,6	Não analisado	556	Não foi possível estimar
14	8.400	94	Não analisado	7	Não foi possível estimar
15	7.700	57	Não analisado	4	Não foi possível estimar
16	324.000	1.604 a 9.170	1,83	4.490 a 25.670	51,23
Total (t/ano)				31.260 a 52.440	*

Os dados disponíveis, obtidos neste estudo, sobre os filtros de mangas operantes no setor de ferroligas em Minas Gerais, utilizados tanto no controle das emissões dos fornos, como no controle das emissões de outras fontes existentes nas plantas industriais, encontram-se resumidos na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Dados de filtros de mangas utilizados no setor de ferroligas em Minas Gerais

Empresa	Filtro	Comprimento das mangas (mm)	Diâmetro das mangas (mm)	Número de mangas	Relação ar/pano (m³/(m³.min))	Velocidade de filtragem (m/min)	Tipo de limpeza	Frequência de limpeza	Perda de carga (mmH2O)
1	1	4.560	132	1.728	Não informado	Não informado	Jato Pulsante	10 em 10s	Não informado
2	2	4.000	132	1.152	1,5 m/min	94 m/h	Jato pulsante	6 minutos por câmara	200
	3	4.500	132	768	1,5	Não informado	Jato pulsante	6 minutos por câmara	200
3	1	3.600	160	300	1,23	Não informado	Jato Pulsante	20s	150
4	2	4.500	160	640	1,11	1,11	Jato Pulsante	Não informado	350
	3	10.500	300	640	0,68	0,68	Ar reverso	Não informado	450
	4	10.500	300	640	0,68	0,68	Ar reverso	Não informado	450
5	1	10.500	300	1.760	0,71	0,71	Ar reverso	Não informado	640
6	1	10.500	300	1.540	0,7	0,7	Ar reverso	Não informado	660
7	1	370	152	360	Não informado	Não informado	Válvula diafragma	20s	100/150
	2	3720	152	360	Não informado	Não informado	Válvula diafragma	20s	100/150
	3	1.200	133	36	Não informado	Não informado	Válvula diafragma	20s	Não informado
	4	5.020	127	360	Não informado	Não informado	Diafragma	20s	Não informado
	5	3.720	152	510	Não informado	Não informado	Diafragma	20s	Não informado
8	1	5.000	140	2.000	Não informado	Não informado	Jato Pulsante	Variável	300
	2	5.000	140	2.000	Não informado	Não informado	Jato Pulsante	Variável	300
	3	4.000	200	400	Não informado	Não informado	Jato Pulsante	Variável	150
	4	3.000	150	500	Não informado	Não informado	Jato Pulsante	Variável	150
9	1	4.560	135	576	1,5	1,2	Ar comprimido	contínuo	220
10	1	4.000	132	192	Não informado	1,4	Off-line	Não informado	Não informado
11	1	6.000	150	1.104	1,1	15,06	Ar Pulsante	Ajustável	360
	2	4.000	140	240	1,69	12	Ar Pulsante	Ajustável	Não informado
12	1	4.500	160	400	1,24	74,4 m/h	Pulso de ar comprimido	ciclo 120s/ pulso 0,05s/ intervalo 12s	1.200-1.500 Pa
13	1	3048	149	1.632	1,77	Não informado	2 estágios	2 a 60s	150
	2	4500	160	1.440	1,54	324	2 estágios	2 a 60s	120
14	1	1.2200	292	672	0,36	25m/s	Fluxo reverso	10min	200
15	1	4.500	132	1.115	1,05	1,5	Jato Pulsante Off-line	Automática	Não informado
	2	4.500	132	1.115	1,05	1,5	Jato Pulsante Off-line	Automática	Não informado
	3	4.500	132	1.115	1,05	1,5	Jato Pulsante Off-line	Automática	Não informado
	4	4.500	132	1.115	1,05	1,5	Jato Pulsante Off-line	Automática	Não informado
	5	4.005	132	480	1,33	1,5	Jato Pulsante Off-line	Automática	Não informado
16	1	4.530	160	420	62,6	1	Jato Pulsante	Não informado	150
	2	4.530	160	504	1,05	1	Jato Pulsante	Não informado	150
17	1	3.100	150	648	1,85	1,853	Jato Pulsante	4s	150

Um exemplo de um filtro de mangas, instalado em uma planta industrial do setor de ferroligas em Minas Gerais, é apresentado na foto 5.6, obtida nas visitas técnicas realizadas aos empreendimentos para o desenvolvimento deste estudo.



Foto 5.6: Filtro de mangas .

- Ciclones

Os dados dos ciclones utilizados no setor de ferro ligas estão demonstrados na Tabela 5.8. Geralmente os ciclones são utilizados como equipamentos auxiliares aos filtros de manga para separar as partículas maiores e como desfagulhadores.

Tabela 5.8: Dados de ciclones utilizados no setor ferro-ligas

Empresa	Ciclone	Diâmetro da Seção Cilíndrica (mm)	Altura da Seção de Entrada (mm)	Largura da Seção de Entrada (mm)	Comprimento do Tubo de Saída (mm)	Diâmetro do Tubo de Saída (mm)	Altura Total (mm)	Potência do ventilador (hp)
1	1	3000	2000	2000	4298	1800	11850	600
	2	3000	2000	2000	4298	1800	11850	400
2	1	2030	1520	760	1770	1520	8100	Não informado
	2	2790	2090	1040	2440	2090	11140	Não informado
	3	2790	2090	1040	2440	2090	11140	Não informado
	4	4360	3270	1640	3820	3270	17440	Não informado
	5	4360	3270	1640	3820	3270	17440	Não informado
	6	4360	3270	1640	3820	3270	17440	Não informado
3	1	4360	3270	1640	3820	3270	17440	Não informado
4	1	4360	3270	1640	3820	3270	17440	Não informado
	2	4360	3270	1640	3820	3270	17440	Não informado
5	1	619	2100	2500	2400	203	5100	Não informado
	2	570	2100	2500	2500	78	5100	Não informado
	3	570	2100	2500	2500	78	5100	Não informado
6	1	3500	2200	920	1500	1200	10000	Não informado
	2	3500	2200	920	1500	1200	10000	Não informado
7	1	1900	1140	380	Não informado	680	5635	75
8	1	4500	15850	2800x1400	15100	1500x1700	19450	610
9	1	Não informado	11540	4200	Não informado	1500	15140	Não informado
	2	Não informado	11540	4200	Não informado	1500	15140	Não informado
10	1	2200	Não informado	1200	10805	1200	14000	Não informado
	2	Não informado	Não informado	Não informado	13000	1350	14000	Não informado

- Outros sistemas de controle de emissões

Com relação às áreas de britagem do produto e descarga de matérias primas, a Figura 5.99 apresenta uma comparação percentual entre empresas que controlam as emissões atmosféricas nesses locais e aquelas que não possuem qualquer tipo de sistema de controle.

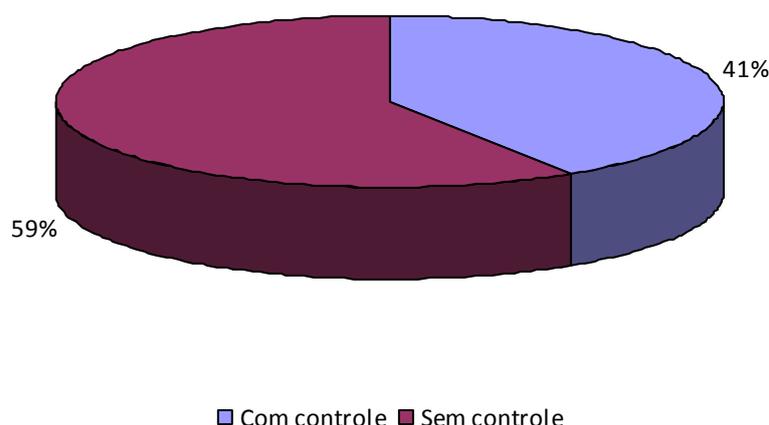


Figura 5.99: Percentual de empresas com e sem controle de emissões atmosféricas nas áreas de britagem do produto e descarga de matérias primas

Essa figura permite verificar que dos 22 empreendimentos do setor de ferroligas em atividade no Estado de Minas Gerais, mais da metade, não controla as emissões nas áreas de preparação de matérias primas e de britagem das ferroligas produzidas.

Além disso, destaca-se que, mesmo dentre aqueles empreendimentos que possuem os sistemas de controle desses processos industriais, apenas um número reduzido realiza o respectivo monitoramento. Os resultados desse, que foram obtidos no desenvolvimento deste estudo relativos ao ano de 2009, quanto ao parâmetro material particulado, estão consolidados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Emissões atmosféricas nas áreas de britagem de produto e descarga de matérias primas

Empresa	Britagem do produto		Descarga de matérias primas		Massa de particulados lançada na atmosfera (t/ano)
	Vazão Nm ³ /h	Concentração de particulados (mg/Nm ³)	Vazão Nm ³ /h	Concentração de particulados (mg/Nm ³)	
1	Britagem enclausurada		Não informado	5,6	Não foi possível estimar
2	Não informado		109.109	13,3	12,5
3	26.885	3	30.016	3,0	1,5
4	38.730	63	42.918	26,0	30,7
5	30.000	11,09	50.000	10,1	7,2
6	59.000	14,04	69.000	5,8	10,6
7	13.656	8,52	Não informado		1,0
8	Não utiliza britagem do produto		54.446	4,9	2,3
9	Britagem enclausurada		Descarga em pátio aberto		Não foi possível estimar
Total (t/ano)					65,9

Um exemplo de sistema de controle de emissões de material particulado, relativo ao descarregamento de matéria prima, é apresentado na Foto 5.6. O empreendimento utiliza a prática de molhagem de carvão vegetal com água para evitar a emissão de particulado.



Foto 5.6: Molhagem de carvão vegetal para evitar a emissão de particulados sólidos

5.6.2 Controle de efluentes líquidos

Com relação à geração e ao tratamento de efluentes líquidos, a geração mais significativa é de efluente pluvial, cujo tratamento em algumas empresas é realizado em tanques de decantação (conforme informado por nove empresas). Das empresas que lavam matéria prima, todas informaram que recirculam o efluente.

5.6.3 Controle de resíduos sólidos

Os principais resíduos sólidos gerados no setor de ferroligas em Minas Gerais, segundo esta pesquisa, são compostos pelo material particulado (pó) retido nos filtros de mangas e nos ciclones, a escória gerada no processo de fusão da liga. Nas Figuras 5.99 e 5.100 é apresentada a geração específica de pó e de escória por tipo de liga produzida.

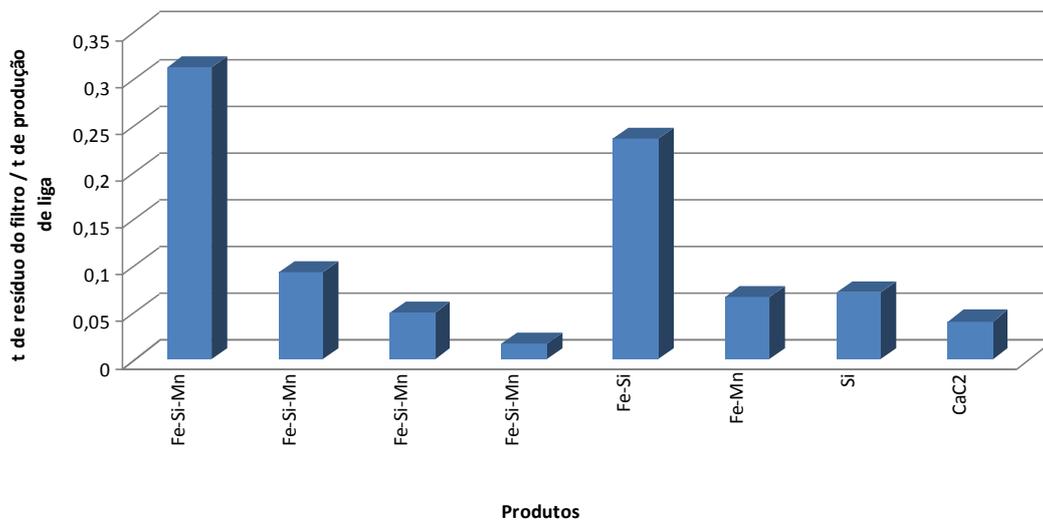


Figura 5.100: Geração de resíduo do filtro por tonelada de liga produzida

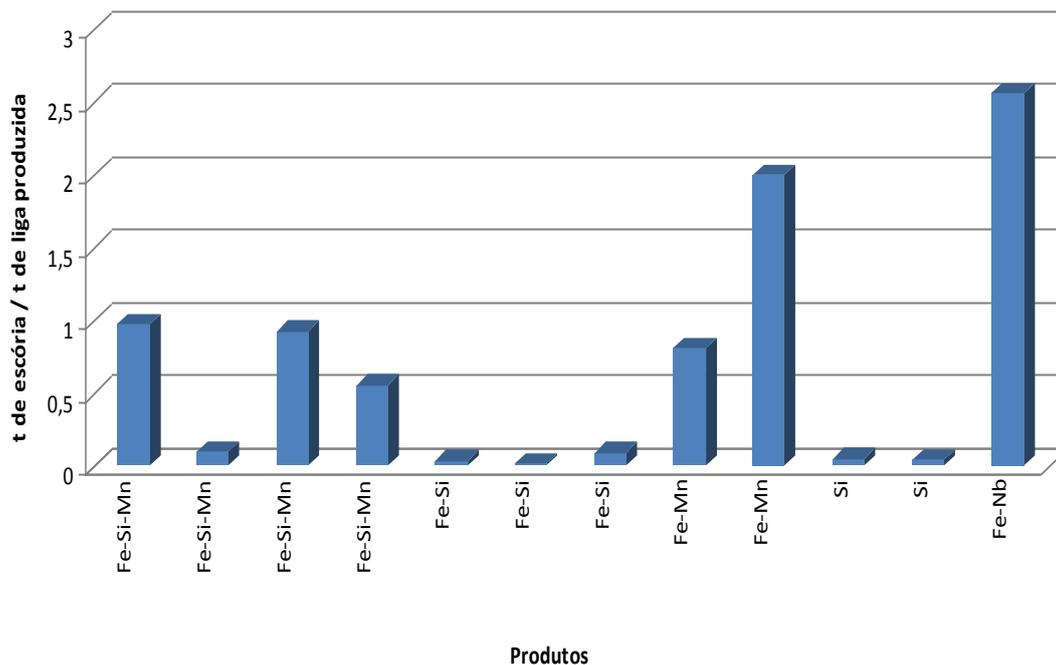


Figura 5.101: Geração de escória por tonelada de liga produzida

Apenas duas empresas informaram que geram microsílca, um resíduo de importante valor econômico que é proveniente de filtros de mangas. O melhor aproveitamento desse resíduo e o seu mercado deverão ser objetos de futuros trabalhos.

5.6.4 Medidas de melhoria de eficiência energética

Neste estudo foram levantadas informações, junto aos empreendimentos do setor de ferroligas no Estado, sobre as medidas de melhoria da eficiência energética adotadas. Dentre o total de vinte e dois empreendimentos existentes em Minas Gerais, apenas onze efetivamente implantaram algum tipo de melhoria, que estão apresentadas na Tabela 5.10.

Tabela 5.10: Medidas de melhoria da eficiência energética adotadas por empresas do setor de ferroligas

Empresas	Medidas de Melhoria da Eficiência Energética
1	Troca da fiação antiga. Troca da aparelhagem e equipamentos
2	Estudo de eficiência energética/ Energia Auxiliar
3	Modernização de equipamentos e eficiência de manutenção preventiva
4	Mudança e otimização de equipamentos; troca de material
5	Troca de combustível fóssil para biomassa e troca de gás FS ₆ por SO ₂
6	Aprovação do projeto CO ₂ gerado no forno de calcinação, com partida prevista para o próximo ano. Projeto de redução de consumo de energia elétrica. Reaproveitamento dos gases (CO e H ₂) gerados no forno elétrico como combustíveis para calcinação do calcário e secagem do carvão vegetal / coque de petróleo.
7	Adequação dos barramentos do forno 3
8	Estudo de utilização de moinha de carvão para aquecer as panelas
9	Instalação da cabine de controle com automação do processo
10	Redução do consumo específico de alumínio em pó / Aumento do rendimento do concentrado refinado com melhoria da recuperação de Nb no produto
11	Construção de PCH

O custo dos empreendimentos em relação ao consumo de energia elétrica, foi informado por um número reduzido deles nesse estudo, principalmente no caso dos produtores de silício metálico, de ferro-silício e de cálcio-silício. Ficou evidente que existe um receio de que os valores da energia negociada por um empreendimento com a concessionária sejam do conhecimento de outro. Tendo em vista que essa negociação é realizada de forma individualizada, ao que parece essa seria uma das medidas significativas para a eficiência energética

Com relação à implantação de projetos de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL), dentre os vinte e dois empreendimentos existentes em Minas Gerais, cinco empresas informaram que pretendem implantá-los. Enquanto que outros dois empreendimentos já possuem projetos, sendo um projeto de substituição de coque verde de petróleo por carvão vegetal e outro de substituição de combustível fóssil por biomassa.

CONCLUSÃO

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho procurou demonstrar a situação produtiva, ambiental e energética do setor de ferroligas no Estado de Minas Gerais, utilizando como base um questionário padrão desenvolvido especificamente para o setor, que foi preenchido pelos empreendimentos nas visitas técnicas realizadas pela FEAM nas plantas industriais.

O principal impacto ambiental negativo inerente às atividades do setor de ferroligas é a emissão atmosférica, tendo em vista os fornos para fusão da liga, que são a fonte da planta industrial onde as emissões são significativas, apenas 53% dos equipamentos operantes possuem sistema de controle de poluição, basicamente composto por filtro de mangas

O processo produtivo foi descrito no item 5, onde foram levantados os principais parâmetros e variáveis operacionais.

Verifica-se que no Estado de Minas Gerais, existe apenas um forno fechado para produção de ligas, neste caso de ferro-silício- manganês, e um forno semi-fechado para produção de ferro-nióbio. A geração de emissões atmosféricas em um forno fechado chega a ser até dez vezes menor que a geração em forno aberto, o que implica em economia de energia em relação à potência do ventilador e economia de equipamentos de controle ambiental, por exemplo, como tamanho e número de mangas do filtro de mangas.

As medidas para aumentar o nível de eficiência energética adotadas pela empresas ainda são reduzidas. Neste estudo, observa-se que, a despeito do grande potencial de geração de energia própria, o número de empreendimentos em Minas Gerais que o faz é reduzido. Basicamente, a energia elétrica utilizada pelo setor é proveniente de concessionária pública, a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). O consumo mensal de energia elétrica do setor é cerca de 396,3 GWh, enquanto que a produção própria é apenas de cerca de 1,19 GWh.

Neste estudo, foi evidenciado que o processo produtivo de silício metálico é uma atividade que demanda elevada quantidade de energia elétrica, comparativamente,

aos demais processos de produção de ligas. Esse consumo foi estimado, com base nas informações coletadas nos questionários aplicados, em cerca de 253.6 GWh/mês. A produção mensal, dessa liga pelo setor girou em torno de 15.320 t, sendo um percentual de cerca de 90% dessa produção destinado ao mercado externo.

Em termos de custo com a demanda de energia elétrica, foi reduzido o número de empreendimentos do setor de ferroligas em Minas Gerais que apresentou alguma informação nesse sentido, principalmente, pelos produtores de silício metálico, ferro-silício e cálcio silício. Desta forma, não foi possível qualquer estimativa relativa ao custo específico de energia elétrica por tonelada de liga produzida. Essa ausência de dados pode ser justificada pelo receio dos empreendimentos de tornar públicos seus custos de energia elétrica, no âmbito do setor, tendo em vista que essa negociação com a concessionária de energia é individualizada.

PLANO DE AÇÃO

7 PLANO DE AÇÃO

Com o objetivo de promover a melhoria na regularização ambiental e na situação energética do setor de ferroligas no Estado de Minas Gerais, inclusive de economia de recursos naturais, está sendo proposto o Plano de Ação que consiste em:

Aplicação de um modelo matemático de dispersão atmosférica nos empreendimentos do setor de ferroligas localizados nos municípios de Pirapora e Várzea da Palma, visando verificar a provável modificação de qualidade do ar devido à operação dos fornos de ferroligas.

Revisão da Deliberação Normativa N° 74/2004 com relação ao enquadramento dos empreendimentos produtores de ferroligas, uma vez que, conforme apresentado neste trabalho, com relação às emissões atmosféricas, qualquer empreendimento a ser implantado ou ampliado obrigatoriamente deverá passar por uma análise dos impactos ambientais, tendo em vista que alguns empreendimentos são passíveis apenas da Autorização Ambiental de Funcionamento (AAF).

Criação de um grupo de trabalho com representantes de órgão públicos e privados relacionados ao setor, inclusive as instituições de pesquisa para discussão dos temas listados a seguir.

Verificação e validação dos dados apresentados neste estudo.

Estudo da viabilidade técnica e econômica de fechamento dos fornos com vistas a reduzir a vazão de gases a ser enviada aos sistemas de controle ambiental e ao aproveitamento energético desses gases.

Estudo de novas medidas para redução da potência do ventilador de exaustão do gás, como troca de sistema de resfriamento, com vistas à economia de energia.

Estudo para melhorar o aproveitamento, possibilitando a criação de novos mercados para a microsilica.

Melhoria do consumo específico de matérias primas, insumos, energia e água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAFE. Disponível em <www.abrafe.ind.br>. Acesso em 20/05/2010.

ANDONYEV, S.; FILIPYEV, O. Dust and Fume Generation in the Iron and Steel Industry. 2.ed. Moscow: Mir Publishers, 1977. 223p.

BATISTA, A.A.M., Utilização do gás de alto-forno para produção de energia na indústria siderúrgica de Minas Gerais. 2009. 173f. Dissertação (mestrado em Sustentabilidade Sócio-econômica e Ambiental) – UFOP, Ouro Preto, 2009.

BARRETO NETO, A.A. Equipamentos de controle de poluição atmosférica. CEFETES. Pós-graduação em engenharia sanitária e ambiental. 26 slides. (2007). Disponível em <www.funcefetes.org.br/showfile.asp?id=Pol_Atmosferica_Aula5_Equipamento_de_controle.pdf&idCliente=133> Acesso em 20 novembro 2008.

CARDOSO, J.J. Eletrotermia: fornos elétricos a arco. Ouro Preto: Imprensa Universitária da UFOP, 1987. v. 1, 625p.

DI STASI, L. Fornos elétricos. São Paulo: Hemus editora limitada, 1981. 451p.

EPA. Disponível em <www.epa.gov>. Acesso em 20/05/2010.

HIGA, O.P. Equipamento de controle de material particulado. Companhia Brasileira de Projetos Industriais - COBRAPI, 1986.

IPPC. Disponível em <www.ippc.int>. Acesso em 20/05/2010.

JACOMINO V.M.F. et.al. Minas Ambiente: Pesquisa Tecnológica para Controle Ambiental em Unidades Independentes de Produção de Ferro-Gusa de Minas Gerais: Estado-da-Arte. Belo Horizonte: CDTN/FEAM, UFMG, 1999. v. 2, 142p.

LICHT, W. Control of particles by mechanical collectors: Handbook of air pollution technology. John Wiley & Sons, New York, 1984. 1066p.

MEILE, L. Estudo do desempenho de lavadores de gases tipo venturi com seção circular. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

MSPC. Cobalto. Disponível em <http://www.mspc.eng.br/quim1/quim1_027.asp>. Acesso em 20/05/2010.

SANTOS, L.M.M. Siderurgia para Cursos Tecnológicos. Ouro Preto: ETFOP, 2007. 154p.

SAX, N.I. Industrial pollution. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1974. 702p.

SUHARA, R.K., Lavadores: Tecnologia de controle de poluição por material particulado. CETESB / PROCOP, Belo Horizonte, 1992. 277p.

ANEXOS

ANEXO – Questionário padrão aplicado nas visitas técnicas dos empreendimentos do setor de ferroligas de Minas

Empresa:					
Situação:					
Endereço:				CEP:	
Contato:				Telefone:	
Função:					
Número de funcionários		Operação:		Administração:	
Coordenadas geográficas		Latitude:		Longitude:	
Produtos					
		Produção (t)		Venda	
				Interna %	Externa %
Silício metálico					
Cálcio Silício					
Carbeto de Silício					
Ferro nióbio					
Ferro silício 75%					
Ferro silício bário					
Ferro níquel					
Ligas de magnésio					
Magnésio Metálico					
Ferro silício manganês					
Escória de silício					
Outros					
Matérias Primas					
Identificação	Britagem	Moagem	Lavagem	Peneiramento (mesh)	Consumo Mensal Atual (t)
Calcário/Dolomita					
Cálcio metálico					
Hematita					
Quartzo					
Zirconita					
Escória sintética					
Escória própria					
Coque metalúrgico					
Coque petróleo					
Lenha					
Sucata de aço					
Ferro titânio					

Granalha de ferro					
Cavacos de madeira					
Carepa de laminação de aço					
Magnésio primário e sucata					
Minério de manganês					
Concreto refratário					
Argamassa					
Argila					
Ardósia					
outros					

Carvão Vegetal				
	Fornecedor(es)	Consumo Mensal		
		Máximo	Atual	
Floresta nativa				
Floresta plantada				
Próprio				
	Produção	Consumo		
		Máximo	Atual	
Floresta nativa				
Floresta plantada				
Insumos (compostos químicos ou materiais utilizados no processo produtivo)				
		Consumo		
		Máximo	Atual	
Água				
Eletrodo de grafite				
Eletrodos amorfos				
Eletrodos de carbono pré-cozidos				
Gases O ₂ e N ₂				
Lança de refino				
Pasta de eletrodos Soderberg				
Pasta eletródica				
Pasta para revestimento da panela				
Plug poroso				
Tubo trefilado				
Vergalhões e tubos de ferro				
Camisa de eletrodos				
Outros				

Energia Elétrica		
Própria	Produção (Mwh)	Consumo (Mwh)
Concessionária	Consumo (Mwh)	Favor anexar a última conta de energia

Forno Elétrico						
	Forno 1		Forno 2		Forno 3	
Tipo do Forno	Aberto		Aberto		Aberto	
	Fechado		Fechado		Fechado	
	Semi-aberto		Semi- aberto		Semi- aberto	
Volume útil (m ³)						
Capacidade(t/d)						
Fator de potência (cos Φ)						
Rendimento						
Potência						
Índice de funcionamento (%)						
Consumo de energia (kWh/t)						
Consumo de carvão vegetal (m ³ /t)						
Vazamento metal (intervalo)						
Tipo de corrida						
Gás do Forno						
	Forno 1		Forno 2		Forno 3	
Vazão (Nm ³ /h)						
Conc. particulados mg/Nm ³						
CO volume %						
CO ₂ volume %						
VOC volume %						
H ₂ O volume %						

O ₂ volume	%			
PCI	kcal/Nm ³			
Obs.: PCI - Poder calorífico inferior Anexar última análise e indicar o ponto de medição				
Britagem do Produto				
Vazão (Nm ³ /h)				
Con. Particulados(mg/Nm ³)				

Descarga Matéria Prima						
Vazão (Nm ³ /h)						
Con. Particulados(mg/Nm ³)						
Equipamentos de Limpeza do Gás do Forno Elétrico						
Filtro Manga						
	Forno 1	Forno 2	Forno 3	Descarga carvão	Tratamento produto	Vazamento de escória e ferroligas
Comprimento manga (mm)						
Diâmetro manga (mm)						
Número de mangas						
Relação ar/ pano						
Velocidade de filtragem						
Tipo de manga						
Tipo de limpeza						
Frequência de limpeza						
Perda de carga						
Potência do ventilador						
Vazão						
Ciclone						
	Forno 1	Forno 2	Forno 3	Descarga	Tratamento	Vazamento de escória e

				carvão	produto	ferroligas
Diâmetro da seção cilíndrica (mm)						
Altura da seção de entrada (mm)						
Largura da seção de entrada (mm)						
Comprimento do tubo de saída (mm)						
Diâmetro do tubo de saída (mm)						
Altura total (mm)						
Altura da seção cilíndrica (mm)						
Diâmetro da saída do pó (mm)						
Velocidade do gás na entrada do ciclone (m ³ /s)						
Potência do ventilador (HP)						
Perda de carga (mca)						
Vazão						

Possui algum sistema para melhoria da captação do gás do forno elétrico?		
Geração de Resíduo de Filtro		
Origem	Quantidade (Kg)	Destino
Forno 1		
Forno 2		
Forno 3		
Descarga carvão		
Descarga matéria prima		
Geração de Escória		
Origem	Quantidade (Kg)	Destino
Forno 1		
Forno 2		
Forno 3		
Descarga carvão		
Descarga matéria prima		
Geração de Outros Resíduos		
Origem	Quantidade (Kg)	Destino
Forno 1		
Forno 2		
Forno 3		
Descarga carvão		
Descarga matéria prima		
Geração de Microssílica / Sílica Amorfa		
Origem	Quantidade (Kg)	Destino
Forno 1		
Forno 2		
Forno 3		
Descarga carvão		
Descarga matéria prima		
Efluentes Líquidos		
Lavagem de matéria prima (m ³ /s)		
Água de resfriamento (m ³ /s)		
Efluente do lavador (m ³ /s)		

Tratamento de efluentes líquidos					
Bacia de decantação		Tanque de decantação		Outros	
Sistema Viário					
Pavimentação	Asfalto		Poliédrica	Outros	
Sem pavimentação					

Sistema de aspersão de água					
Caminhão Pipa					
Sistema Fixo					
Utilização de Produtos Químicos					
Chaminé					
	Forno 1	Forno 2	Forno 3	descarga carvão	Descarga matéria prima
Chaminé diâmetro (m)					
Altura da chaminé (m)					
Coordenada geográfica					
Latitude					
Longitude					
Outros					
	Pretende instalar?		Possui projeto?		Qual?:
	SIM	NÃO	SIM	NÃO	
Termoelétrica					
MDL - crédito de carbono					
Medidas de melhoria da eficiência energética					

Plano de monitoramento de qualidade do ar
Sistema de pré-aquecimento de matéria prima
Favor anexar a última conta de energia elétrica