



GUILHERME FREDERICO BERNARDO LENZ E SILVA

Engenheiro Metalurgista – UFMG

Especialista em Gestão & Tecnologias Ambientais – MBA-PECE-USP

**RECICLAGEM DE RESÍDUOS SIDERÚRGICOS
SÓLIDOS CONTENDO FERRO VIA TECNOLOGIA DE
AGLOMERAÇÃO ATRAVÉS DA SOLUÇÃO DE UM
MODELO MULTICRITERIAL HIERÁRQUICO E DE
PROGRAMAÇÃO LINEAR**

**Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para a
obtenção do Título de Doutor em
Engenharia, junto ao Departamento de
Engenharia Metalúrgica e de Materiais.**

**São Paulo
2004**

OK

GUILHERME FREDERICO BERNARDO LENZ E SILVA

Engenheiro Metalurgista – UFMG

Especialista em Gestão & Tecnologias Ambientais – MBA - PECE/USP

**RECICLAGEM DE RESÍDUOS SIDERÚRGICOS
SÓLIDOS CONTENDO FERRO VIA TECNOLOGIA DE
AGLOMERAÇÃO ATRAVÉS DA SOLUÇÃO DE UM
MODELO MULTICRITERIAL HIERÁRQUICO E DE
PROGRAMAÇÃO LINEAR**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para a
obtenção do Título de Doutor em
Engenharia.

Área de Concentração:

Engenharia Metalúrgica / Processos

Orientador:

Prof. Dr. Marcelo Breda Mourão

**São Paulo
2004**

Lenz e Silva, Guilherme Frederico Bernardo

Reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos contendo ferro via tecnologia de aglomeração através da solução de um modelo multicriterial hierárquico e de programação linear/ São Paulo, São Paulo 2004.

Tese (Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Área de concentração: Processos) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Breda Mourão

1. Reciclagem 2. Resíduos siderúrgicos 3. Aglomeração 4. Modelo multicriterial 5. Programação linear. I. Título

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Eng. Guilherme Frederico Bernardo Lenz e Silva

Tese (Doutorado) aprovada em: / / 2004

Banca Examinadora:

Assinatura:_____.

**Prof. Doutor MARCELO BREDA MOURÃO (orientador)
(Escola Politécnica – Universidade de São Paulo - USP)**

Assinatura:_____.

**Prof. Doutor CYRO TAKANO
(Escola Politécnica – Universidade de São Paulo - USP)**

Assinatura:_____.

**Prof. Doutor PAULO ROBERTO BRANDÃO
(Dep^{to} de Eng. de Minas - Escola de Engenharia – UFMG)**

Assinatura:_____.

**Prof. Doutor ANTÔNIO C. F. VILELA
(Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS)**

Assinatura:_____.

**Doutor ANTONIO MALYNOWSKYJ
(Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA)**

AGRADECIMENTOS

Agradeço às seguintes pessoas e instituições que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho:

Ao Prof. Dr. Marcelo Breda Mourão, orientador deste trabalho, pela amizade, compreensão e apoio.

Ao Eng. Dr. Antonio Malynowskyj, pelo apoio, amizade e carinho com que me apoiou, amparou e me inspirou durante os vários anos de trabalho junto ao Suporte Técnico da Aciaria da Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA.

Aos Prof.(s) Dr.(es) Cyro Takano, Ramiro Conceição do Nascimento Jr., José D. T. Capocchi, pelo apoio, compreensão, cobrança, paciência e profissionalismo.

Aos professores e funcionários da Escola Politécnica da USP, pelo apoio e amizade.

Aos gerentes da Aciaria da Cosipa: Danilo Di Nápoli Guzela, Antonio Márcio Junqueira, Edson J. de Almeida (in memória), Luiz Carlos Lopes, pelo apoio e pelas facilidades na condução deste trabalho.

Ao projeto PADCT III-FINEP (3244) pelo financiamento de parte deste estudo.

Aos amigos e companheiros da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, pelas discussões, apoio e incentivo (Luiz F. Godinho Natal, Renato Nóvoa, Barbará, Ênio Lourenço, Rett, Barroca, Waldemar, Leandro, Anália, Pires, Ciça, Capiotto, Luiz Alberto, Kato, Vanessa Pala, Italiano, Totó, Serra e aos amigos da IAS).

A Magnesita SA. na pessoa do gerente do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento - CPqD/ Magnesita, Dr. Luis Rodolfo M. Bittencourt, pelo apoio na continuidade de meu aperfeiçoamento profissional e aos amigos do CPqD/Magnesita, em especial Carlos Alberto, Wagner Moulin, Ana Paula e Rafael Guimarães.

Aos colegas da Escola Politécnica da USP, pela amizade e apoio, em especial a Vanessa Paula pela amizade e João Chiabi da CST pelas facilidades para a execução dos testes com briquetes.

Aos membros da comissão julgadora da defesa desta tese de doutoramento.

Aos engenheiros Romeu Costa, Rodolfo Pohling e Lopes da Engevix.

A minha família em especial Norma, Roberto, Ana Paula, Lídice, Fabrizia, sobrinhos e amigos.

A Alessandra.

**Se queres um ano de prosperidade ... Semeie trigo;
Se queres dez anos de prosperidade ... Plante árvores;
Se queres cem anos de prosperidade ... Cultive pessoas.**

Provérbio Chinês.

SUMÁRIO

		Pág.
	LISTA DE FIGURAS	i
	LISTA DE TABELAS	ii
	LISTA DE ABREVIATURAS	iii
	LISTA DE SÍMBOLOS	iv
	RESUMO	v
	ABSTRACT	vi
1	JUSTIFICATIVA	1
2	OBJETIVOS	6
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
3.1	Resíduos siderúrgicos	9
a)	Carboquímicos	11
b)	Escórias	12
c)	Lamas, pós e carepas (LPC)	15
d)	Sucatas ferrosas	20
e)	Sucatas de refratários	23
3.2	Reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos (lamas, pós e carepas)	24
3.2.1	Reciclagem externa	28
3.2.2	Reciclagem interna	29

3.2.2.1	Altos-fornos	29
a)	Carga metálica e carbono (minério de ferro, sinter/pelota e coque)	31
b)	Sílica e silicatos:	32
c)	Manganês:	33
d)	Manganês:	34
e)	Enxofre:	34
f)	Zinco:	34
g)	Álcalis (K_2O , Na_2O):	35
3.2.2.2	Sinterizações	40
a)	Hidratação da cal (zona úmida)	43
b)	Condensação dos vapores de água	43
c)	Vaporização da umidade (zona de secagem)	43
d)	Desidratação do hidróxido de cálcio	44
e)	Combustão do carvão/coque (a partir de 500 °C)	44
f)	Decomposição dos carbonatos	44
g)	Reações de fase sólida	44
h)	Reações de redução e reoxidação:	44
i)	Reações de formação de magma/escória:	44
3.2.2.3	Convertedores (LD/BOF)	47
	Matérias primas do processo LD e reações de refino primário ...	50
	Reações do processo de refino	53
	A natureza e a fonte de fumos e de materiais particulados	56
3.2.2.4	Calcinações	58
3.2.2.5	Fornos elétricos	61
	Resíduos siderúrgicos do processamento do aço em fornos elétricos	63
3.2.2.6	Lingotamento do aço líquido e laminações de placas, chapas e bobinas	66
3.3	Processos de aglomeração de resíduos	71
3.3.1	Pelotização e granulação	72
	Teoria do processo de formação de bolas	73

	Cinética do processo de pelotamento	74
	Ligantes adicionados para a melhoria das propriedades das pelotas	76
3.3.2	Granulação	76
3.3.3	Processos de compactação em rolos de compressão (Briquetagem)	79
3.3.3.1	Processo de briquetagem	80
3.3.3.1.1	Efeitos da alimentação de material particulado no desempenho do processo de compactação em rolos de pressão	81
3.3.3.1.2	Efeito da distribuição granulométrica sobre o empacotamento das partículas	83
a)	Modelos de empacotamento de partículas	83
a.1)	Modelo de Furnas:	84
a.2)	Modelo de Andreasen:	84
a.3)	Modelo de Alfred:	85
3.3.3.1.3	Seleção de aditivos: aglomerantes e lubrificantes para os processos de aglomeração	86
a)	Aglomerantes do tipo matriz:	87
b)	Aglomerante tipo filme:	87
c)	Aglomerantes químicos:	87
d)	Lubrificantes:	88
3.3.2.1.4	Distribuição de tensões durante a compactação	89
a)	Zona de fluxo livre:	90
b)	Zona de alimentação:	90
c)	Zona de compactação:	90
d)	Zona de deformação:	90
3.4	Metodologias e ferramentas para a construção do modelo de suporte à tomada de decisões	92
3.4.1	Tipos de problemas de tomada de decisão	92
3.4.2	Formulação de um modelo de decisão	93
3.4.2.1	Metodologias de decisão	93
3.4.2.2	Sistema de apoio à decisão	94

3.4.2.3	Tipos de modelos:	95
3.4.3	Modelo de programação linear, visando a otimização de resultados na tomada de decisões	96
3.4.3.1	Definições	97
3.4.3.2	Algoritmo Simplex	99
3.4.3.3	Matriz MPS (Mathematical Programming System)	101
3.5	Seleção de métodos multicriteriais para a priorização dos resíduos siderúrgicos	103
3.5.1	Método AHP (Processo de Hierarquização Analítica)	105
3.5.2	Passos para a construção e solução de um problema de priorização usando-se o método AHP	106
3.5.3	Comparações paritárias: escala, consistência e autovetores	107
a)	Descrição matemática do processo de comparação paritária	108
b)	Escala linear de comparação paritária	109
c)	Consistência	111
d)	Autovetores e autovalores	113
3.5.4	Modelos conjugados AHP e PL	117
4	METODOLOGIA	118
4.1	Introdução	118
5	DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS	121
5.1	1ª Fase: Construção da base do modelo de reciclagem dos resíduos siderúrgicos sólidos contendo ferro	121
5.1.1	Descrição e caracterização dos resíduos siderúrgicos contendo ferro	121
a.1)	Lamas processadas na estação de tratamento de águas da aciaria #2	122
a.2)	Pó do coletor do alto-forno (POCOL)	124
a.3)	Carepa da máquina de escarfação automática (CMEA)	125
a.4)	Carepa da máquina de lingotamento contínuo (CMLC)	126
a.5)	Pós do sistema de despoeiramento secundário da aciaria (POSEC)	127
a.6)	Pós da estação de dessulfuração de gusa da aciaria#2 (PEDG2)	127

a.7)	Pós de cal e dolomita calcinada e cales do ADR (CALADR)	128
a.8)	Lama da estação de tratamento de lama (ETL III) e solução de cal (SOLCAL)	130
a.9)	Lama da estação de tratamento de lamas (LETL)	130
a.10)	Lama do sistema de tratamento dos altos-fornos (U5A2): fração fina e fração grossa (LAFFF e LAFFG)	130
a.11)	Pós do sistema de despoeiramento da casa de corrida e pós do sistema de despoeiramento da casa de silos dos altos-fornos (PDCSIL e PDCCOR)	132
a.12)	Lama da estação de tratamento e recirculação de águas das laminações (LSTRA)	132
a.13)	Carepas das laminações: carepa da laminação de tiras à quente (CLTQ) e carepa da laminação de chapas grossas (CLCG)	133
a.14)	- Lama do sistema de tratamento de águas ácidas (LSTAA)	134
a.15)	- Lama do canal C-3 (baía de sedimentação) - (LCC3)	134
5.1.2)	- Características físico-químicas (análise química, granulométrica, fases cristalinas e presença de óleos e graxas) e levantamento da geração dos resíduos siderúrgicos sólidos contendo ferro	136
a)	Geração e estocagem – Equação do balanço de massa	136
b)	Teor de água – Umidade	138
c)	Densidades – Base úmida e base seca	140
d)	Composição química (%) – Análise padronizada em óxidos (base seca)	141
e)	Presença de óleos e graxas	143
f)	Variáveis de controle das estações de tratamento de águas	143
g)	Análise microestrutural dos resíduos (difração de raios-X)	144
h)	Análise granulométrica (peneiramento vibratório a seco)	146
i)	Composição química média (Resíduos Estocado - ADR)	147
5.1.3)	Levantamento de dados dos processos metalúrgicos	148
a)	Matérias primas (gusa líquido, sucatas e escorificantes)	149

5.2	Construção da base matemática do modelo de reciclagem dos resíduos sólidos siderúrgicos contendo ferro	152
5.2.1	Definições dos objetivos e da rota tecnológica de reciclagem ...	152
5.2.1.1	Construção do Cenário:	153
5.2.2	Construção da escala de priorização para a reciclagem dos resíduos	156
5.2.2.1	Definição dos critérios primários	156
5.2.2.1.1	Disposição mais adequada (C)	156
5.2.2.1.2	Economia de recursos naturais e energia (F)	156
5.2.2.1.3	Classe do resíduo (D)	156
5.2.2.1.4	Geração mensal (E)	157
5.2.2.1.5	Alternativa tecnológica da rota de reciclagem (B)	157
5.2.2.1.6	Manutenção da prática industrial existente (A)	157
5.2.2.2	Definição dos critérios secundários	160
5.2.3	Razão de consistência (CR) e índice aleatório (RI)	161
5.2.4	Priorização da escolha dos resíduos siderúrgicos usando o método AHP	163
5.2.5	Análise do modelo de priorização AHP	166
5.3	Simulações e otimização do modelo de reciclagem: Programação Linear	171
5.3.1	Cenário: Maximização da produção de briquetes para a aciaria	172
5.3.1.1	Resultado da Otimização: Primeiros 2 anos de operação consumindo 50% do passivo ambiental/ano: Briquetes	174
5.3.1.2	Resultado da Otimização: Primeiros 2 anos de operação consumindo 50% do passivo ambiental/ano: Produção de aglomerados (destinados às unidades de sinterização)	176
5.3.1.3	Balanco de massa global: 2 primeiros anos de operação, consumindo 50% do passivo ambiental estocado a cada ano da área de disposição de resíduos da COSIPA	180
5.3.1.4	Resultado da Otimização: Após término do passivo ambiental estocado (ADR): Produção de briquetes destinados às unidades de aciaria	182

5.3.1.5	Resultado da Otimização: Após término do passivo ambiental estocado (ADR): Produção de micropelotas-granulados destinados às unidades de sinterização	183
5.4	Teste Industrial	186
a)	Briquetes	186
b)	Aglomerados (micropelotas-granulados)	187
5.5	Projeto de uma planta de reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos	189
a)	Equipamentos principais:	189
b)	Análise de viabilidade econômica do investimento:	189
c)	Custo fixo médio	189
d)	Custo variável médio	190
6	COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÕES	191
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	193
Anexo A:	Plano de Experiência: Teste com Briquetes de ferro da CST, nos Conversores #5 e #6 da Aciaria #2	
Anexo B:	Resumo dos resultados das adições de briquetes de ferro da CST e folhas de análise de desvio de composição química	
Anexo C:	Relatório de ensaio / serviço: determinação da composição química – briquete de ferro da CST	
Anexo D:	Planta de recuperação de resíduos sólidos	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Evolução da produção brasileira e mundial de aço bruto, em milhões de toneladas/ano (período de 1970 - 2000), países associados ao IISI	8
Figura 2	As questões mais relevantes da siderurgia dos EUA	9
Figura 3	Principais produtos obtidos pela destilação do carvão mineral	12
Figura 4	Seqüência do beneficiamento interno de escórias de Aciaria LD (resfriamento com água, transporte, separação magnética e classificação granulométrica)	13
Figura 5	Balanço de massa da geração de escórias para usinas integradas a coque ou não (Referência brasileira)	14
Figura 6	Fluxograma geral para a reciclagem interna de resíduos sólidos contendo ferro em usinas siderúrgicas	16
Figura 7	Circuito de tratamento e beneficiamento de sucatas ferrosas – linha branca	21
Figura 8	Quantidade de aço galvanizado (em libras) utilizado na manufatura de veículos de passeio – EUA	21
Figura 9	Aterro industrial classe II e III da COSIPA (19/10/2000)	27
Figura 10	Alto-forno: principais equipamentos e sistemas acoplados - (“Blast furnace”: alto forno; “stock house”: casa de silos; “cast house”: casa de corrida; “stoves”: regeneradores)	30
Figura 11	Princípio geral do processo de redução de minérios em um alto-forno com as indicações de transferência de massa, calor e temperaturas de processo dividido em duas zonas - (“preparation zone”: zona de preparação indicando as reações de redução indiretas e “processing zone”: zona de processo onde se processa a reação de Boudouard, redução direta e fusão)	31

Figura 12	Reações de redução da carga metálica em um alto-forno. (distribuição de gás e sólidos ao longo do forno - temperatura e distância do nível das ventaneiras)	32
Figura 13	Esquema das reações químicas dos produtos de redução dos compostos de silício no interior de um alto-forno - ("slag": escória; "melting": fusão; "coke ash": moinha de coque)	33
Figura 14	Efeito da basicidade quaternária e do volume de escória sobre a remoção de K_2O pela escória (unidade: libra/tonelada métrica de gusa líquido) - ("Slag volume: volume de escória formada; "slag basicity": basicidade quaternária da escória; K_2O removed in slag": massa em libras de óxido de potássio removido pela escória)	38
Figura 15	Modelo de recirculação de álcalis (potássio) em altos-fornos	39
Figura 16	Perfil de cascões gerados pela presença de álcalis em recirculação em um alto-forno - ("tuyeres": ventaneiras)	40
Figura 17	Fluxo do processo de sinterização (adaptado de NUNES)	41
Figura 18	Diagrama esquemático de uma máquina de sinterização contínua	42
Figura 19	Descrição do processo de sinterização	43
Figura 20	Relação entre basicidade binária e índice de redução	45
Figura 21	Mecanismos de formação de espinélio de magnésio (adaptado de PEREZ)	46
Figura 22	Desenho esquemático de um convertedor LD com sopro combinado	47
Figura 23	Evolução da produção mundial de aço por tipo de equipamento	48
Figura 24	Evolução, variantes e derivações dos processos LD, Thomas e Bessemer - ("Process with O_2 top blowing": Processos com sopro de oxigênio por cima; "Process with O_2 Bottom blowing": Processos com injeção de oxigênio por baixo da carga; "carbon steel: aço carbono; "stainless steel": aço inoxidável)	50

Figura 25	Representação esquemática dos mecanismos de reação decorrente do impacto do jato de oxigênio	53
Figura 26	Evolução das reações de refino primário no processo LD	54
Figura 27	Esquema do mecanismo de formação da emulsão: metal-escória-gases decorrente das etapas de refino primário do aço durante a descarburização (Adaptado de LIMA)	57
Figura 28	Processo de calcinação de carbonatos em um forno tipo “shaft kiln” com suas 5 fases (I- pré-aquecimento, II a IV – calcinação e V- resfriamento) e descrição do modelo topoquímico para a decomposição de uma partícula densa de geometria esférica de um carbonato de cálcio – (“Preheating zone”: zona de pré-aquecimento; “calcining zone”: zona de calcinação; “cooling zone”: zona de resfriamento)	59
Figura 29	Diagrama esquemático de um forno de calcinação rotativo	60
Figura 30	Avanços na tecnologia de produção de aços em fornos elétricos – período de 1965 a 2000	61
Figura 31	Capacidade mundial comissionada de fornos elétricos (EAF: AC e DC) no período de 1988 a 1998 – (“Number of furnaces”: número de fornos; “Heat size”: capacidade)	63
Figura 32	Algumas rotas de produção de aço via fornos elétricos, em função do tipo de carga metálica utilizada	63
Figura 33	Estrutura química de uma dioxina (1): 2,3,7,8-tetraclorodibenzo-(p)-dioxina e de um furano (2): 2,3,7,8 – tetracloro-dibenzo-furano	65
Figura 34	Forma esquemática o ciclo de geração dos principais resíduos/ subprodutos dos processos de laminações da COSIPA	67
Figura 35	Evolução da redução de descarga de poluentes da COSIPA, período de 1995 – 2002; (Adaptado de PAES) – (“Dust emission”: emissão de particulados; “oil and grease waste”: resíduos oleosos e graxas; “soluble manganese waste reduction”: redução dos resíduos contendo manganês solúvel)	68

Figura 36	Próspero distrito de redução e refino de minérios “smelter town” a mais de 120 anos atrás	71
Figura 37	Mecanismo de formação de bolas ou pelotas	73
Figura 38	Dispositivos de aglomeração por pelotamento	74
Figura 39	Vários mecanismos de formação de núcleos em diferentes condições de disponibilidade de líquido e formação de filme ao redor das partículas aglomeradas (Adaptado de SRB)	75
Figura 40	Equipamentos de granulação de pastas, através de misturadores intensivos	77
Figura 41	Uniformidade/eficiência da mistura como função do tempo - (“Theoretical value”: valor teórico; “mixing time”: tempo de mistura; “sec”: segundos)	78
Figura 42	Linhas de fluxo na movimentação do material no interior de um misturador intensivo	78
Figura 43	Briquetadora marca Hosokawa-Bepex, modelo: MS 300 para briquetagem de pós abrasivos	79
Figura 44	Exemplos de processamentos em rolos de compressão	80
Figura 45	Força necessária para a compactação de diferentes materiais particulados	81
Figura 46	Métodos para melhoria do desempenho de compactação de materiais particulados	82
Figura 47	Casos mais comuns dos efeitos da alimentação de material particulado em rolos de compactação	82 a 83
Figura 48	Distribuição granulométrica de densidade máxima ($q = 0,37$) segundo o modelo de Alfred	85
Figura 49	Modelo de saída de gases da região do ângulo de contato	89
Figura 50	Comparação entre resultados simulados (linha cheia) e dados observados (linha pontilhada) da distribuição de pressão em rolos durante o processo de compactação – (“test and compaction conditions”: condições de compactação do teste; “compaction pressure”: pressão de compactação; “rolling angle”: ângulo de ataque)	89

Figura 51	Várias zonas e ângulos existentes na compactação de material particulado entre rolos de compressão	90
Figura 52	(a) Gradientes de densidade medidos através de ultra-som um corpo cerâmico de alumina prensado uniaxialmente; (b) Modelo de simulação computacional para a prensagem uniaxial de alumina utilizando coeficiente de atrito igual a 0,25	91
Figura 53	Passos para o processo de tomada de decisão	93
Figura 54	Estruturação de um sistema DSS (Sistema de Suporte a Decisão)	94
Figura 55	Fluxograma de comandos para implementação do algoritmo Simplex	99
Figura 56	Vantagens do processo de hierarquização de analítica	106
Figura 57	Resumo da metodologia de cálculo do método AHP com as comparações paritárias realizada de forma simplificada - (“Goal”: meta e objetivos; “criteria”: critérios; “subcriteria”: subcritérios ou critérios secundários; “alternatives”: alternativas”)	117
Figura 58	Modelo de reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos	120
Figura 59	Seqüência do tratamento dos gases do sistema OG: a) Recebimento a água do sistema OG (água+ lamas) b) Separador helicoidal (fração grossa) c) Sistemas de tanques de decantação (fração fina) d) Caçamba de coleta do separador helicoidal (fração grossa) e) Caçamba de coleta do filtro prensa (fração fina)	123
Figura 60	a, b, c - LOGFF a) Foto de elétrons secundários da lama da Aciaria (LOGFG); b/c) Espectros de energia dispersiva de EDS, indicando a presença de Fe/Ca/Si/O; (aumento 300 x)	124
Figura 61	Difratograma de raios-X (método do pó) – Amostra: Pó do coletor do alto-forno da COSIPA: Fases detectadas: hematita, quartzo, grafita, magnetita, calcita	124

Figura 62	Sistema de limpeza de gases (precipitador eletrostático a úmido) e poço de decantação de carepas do processo de escarfagem automática de placas	125
Figura 63	Difratograma de raios-X (método do pó) – Amostra: Carepa blendada pela empresa Sobremetal: Fases detectadas: wustita, magnetita e hematita	125
Figura 64	Aspecto morfológico das partículas que constituem a carepa da máquina de escarfagem automática (CMEA) – Microscopia eletrônica de varredura – elétrons secundários / USP	126
Figura 65	Máquina de lingotamento contínuo MLC#2 (aciaria #2 / COSIPA) e poço de decantação de carepas das MLC (#1,#2 e #3)	126
Figura 66	Sistema de despoeiramento secundário da aciaria #2	127
Figura 67	Sistema de despoeiramento da estação de dessulfuração de gusa da aciaria #2 (mangas filtrantes)	128
Figura 68	Difratograma de raios-X (método do pó) – Amostra: Cal da ADR (área de disposição de resíduos); Fases detectadas: portlandita e calcita	129
Figura 69	a) Sistema de filtragem da calcinação #3 (filtros tipo manga) b) Área de disposição de resíduos industriais (cales armazenadas)	129
Figura 70	Sistema U5A2 – Lamas dos altos-fornos (frações fina e grossa)	131
Figura 71	Micrografia de elétrons retroespalhados indicando a morfologia da lama do U5A2 (Lamas dos altos fornos fração fina). Os espectros de EDS são respectivamente das partículas circuladas #3 (elementos: Fe, C, O, Ca, Al, Si, Mn e Na) e #4 (elementos: Fe, O, C, Si, Al, S e Ca)	131
Figura 72	Sistema de tratamento e recirculação de águas das laminações (STRA) (a) tanques de decantação, (b) sistemas de filtros, (c) filtro a vácuo, (d) caçambas de recolhimento da lama	132

Figura 73	Micrografia de elétrons retroespalhados da lama do sistema de tratamento e recirculação de lamas das laminações (STRA). Espectros de EDS das regiões #1 (elementos: Fe, O, C, Al, Si, P, S, Ca, Na) e #3 (elementos (Fe, O, C, S, Al, Si, Ca)	133
Figura 74	Pátio de recuperação e processamento de carepas pela empresa Sobremetal nas dependências da COSIPA	134
Figura 75	Vista aérea, indicando o ponto de amostragem B, localizado na saída do canal C3	135
Figura 76	Balanco de massa da geração dos resíduos em uma unidade industrial	137
Figura 77	Rota tecnológica do modelo de reciclagem: Briquetagem + Aglomeração (pelotização ou granulação)	153
Figura 78	Fluxo esquemático do processo de reciclagem proposto para a reciclagem dos resíduos da COSIPA	154
Figura 79	Diagrama do modelo do processo de decisão multicriterial usando AHP otimizado via programação linear	155
Figura 80	Pesos obtidos das priorizações entre os critérios (A a F da matriz dos critérios primários), utilizando-se da metodologia AHP	159
Figura 81	Árvore decisória do modelo multicriterial priorização da escolha dos resíduos siderúrgicos	162
Figura 82	Gráficos de variação da pontuação de priorização dos resíduos siderúrgicos sólidos de acordo com atributos diferentes usados na construção de modelos de priorização (escala padronizada: 0 a 100%)	167
Figura 83	Modelo de priorização em função dos elementos contidos $\%(Fe+CaO+C)$ comparado com o modelo AHP. Nota-se a grande diferença entre os dois modelos (DMQ calculado)	170
Figura 84	Curva granulométrica da mistura a ser briquetada (sem aditivos, consumindo os resíduos estocados na ADR, $q = 0,17$ – Modelo de Andreasen)	176

Figura 85	Curva granulométrica da mistura a ser granulada (sem aditivos, consumindo os resíduos estocados na ADR)	179
Figura 86	Fluxo de produção e balanço de massa estimado (adequação da umidade e adição dos aditivos sólidos e líquidos), para os primeiros 2 anos de operação da unidade de reciclagem de resíduos	180
Figura 87	Fluxo de produção e balanço de massa estimado (adequação da umidade e adição dos aditivos sólidos e líquidos)	184

LISTA DE TABELAS

Tabela I	Consumo do setor siderúrgico brasileiro de algumas matérias primas e insumos, utilizados na produção do aço - fonte: IBS/ base: 1999	1
Tabela II	Principais produtos e resíduos gerados nas unidades de processamento, tratamento e transformação do gusa e do aço	10
Tabela III	Principais aplicações das escórias siderúrgicas	12
Tabela IV	Estudos, desenvolvimentos e implantação de tecnologias visando à reciclagem dos resíduos contendo ferro nas usinas siderúrgicas	18
Tabela V	Relação entre a produção e a reciclagem de latas de aço - fonte: Aspects of steel recycling	20
Tabela VI	Alguns dos acidentes radioativos com a fusão de sucata documentados nos EUA, após 1987, fonte: Aspects of Steel Recycling – IISI, 1995	23
Tabela VII	Classificação da reciclagem de resíduos	28
Tabela VIII	Temperatura mínima de redução dos óxidos e silicatos de zinco, potássio e sódio	36
Tabela IX	Composição química típica de sínteres de minério de ferro	41
Tabela X	Composição típica e especificação química do “sinter feed” da COSIPA	41
Tabela XI	Granulometria típica de carregamento de matérias primas destinadas a produção de sinter	45
Tabela XII	Evolução do processo de refino do aço	48
Tabela XIII	Comparação entre os vários métodos de sopro de oxigênio	49

Tabela XIV	Efeito das impurezas sobre as propriedades dos aços	51
Tabela XV	Principais reações durante o refino primário do aço	55
Tabela XVI	Composição típica dos resíduos captados pelos sistemas de despoeiramento dos processos de refino primário do aço	56
Tabela XVII	Solubilidade de poeiras de BOP (BOF/LD) para vários níveis de pH	58
Tabela XVIII	Produção mundial de aço: FEA versus LD	62
Tabela XIX	Composição química de algumas poeiras captadas em sistemas de despoeiramento de fornos elétricos e do processo BOP (BOF/LD)	64
Tabela XX	Resumo com as principais características de controle para a reciclagem de subprodutos siderúrgicos em uma usina integrada (Adaptado de LÜNGEN)	68
Tabela XXI	Principais classes e exemplos de aglomerantes	86
Tabela XXII	Principais lubrificantes de compactação	88
Tabela XXIII	Estrutura típica de uma matriz MPS	102
Tabela XXIV	Alguns dos principais métodos multicriteriais de auxílio à tomada de decisão	104
Tabela XXV	Escala de comparações semânticas (inglês e português) da metodologia AHP (adaptado de SAATY)	111
Tabela XXVI	Índice aleatório (IR) em relação ao número total de critérios analisados	112
Tabela XXVII	Macro descrição das fases do modelo proposto	118
Tabela XXVIII	Resíduos: nomenclatura e siglas	121
Tabela XXIX	Geração e estoque de resíduos siderúrgicos sólidos (base: 4,5 milhões de toneladas de aço líquido)	137
Tabela XXX	Umidade contida nos resíduos siderúrgicos (%)	139
Tabela XXXI	Densidade dos resíduos siderúrgicos (unidade: g/cm ³)	140
Tabela XXXII	Análise química dos resíduos/subprodutos siderúrgicos (Base seca calcinada, % em massa)	141

Tabela XXXIII	Quantificação do teor de óleos contidos nos resíduos/subprodutos siderúrgicos	143
Tabela XXXIV	Principais condições e variáveis operacionais das estações de tratamentos de água da COSIPA	143
Tabela XXXV	Caracterização das fases cristalinas presentes nos resíduos através da técnica de difração de raios-X (método do pó)	144
Tabela XXXVI	Distribuição granulometria (% retida simples)	146
Tabela XXXVII	Composição química média dos resíduos estocados e gerados (média ponderada com a quantidade existente), base úmida	147
Tabela XXXVIII	Dados de processo: Balanço de massa do carregamento de matérias primas no conversor LD da COSIPA e características físico-químicas das variáveis de carregamento (período: abril a outubro de 2000, LD's #5 e #6)	149
Tabela XXXIX	Composição química do gusa sólido e dos principais escorificantes (base de cálculo do STE)	149
Tabela XL	Composição química típica da escória do processo LD (abril a outubro de 2000) – Conversores #5 e #6	150
Tabela XLI	Evolução da composição química e temperatura do gusa líquido carregado, período de 1998 a 2000	151
Tabela XLII	Matriz de comparação paritárias dos critérios primários do modelo hierárquico (critérios primários)	158
Tabela XLIII	Análise da semântica das comparações paritárias ente os vários critérios principais (A, B, C, D, E, F)	158
Tabela XLIV	Análise da semântica das comparações paritárias ente os vários critérios principais (A, B, C, D, E, F)	160
Tabela XLV	Resumo dos parâmetros para a análise de consistência: $\lambda_{\text{máx}}$, n, RI, CI, e CR	161
Tabela XLVI	Resultados do modelamento de priorização dos resíduos siderúrgicos sólidos	165

Tabela XLVII	Priorização dos resíduos siderúrgicos através da formação de uma escala padronizada em modelos construídos com diferentes atributos	166
Tabela XLVIII	Comparações entre modelos de priorização dos resíduos sólidos siderúrgicos	168
Tabela XLIX	Condições de contorno e especificações do cenário de briquetagem (1 ^o e 2 ^o anos de operação)	172
Tabela L	Resumo da simulação (proporção de matérias primas, composição química esperada e valor da pontuação da simulação)	174
Tabela LI	Composição química esperada padronizada (briquetes)	175
Tabela LII	Resumo da simulação (proporção de matérias primas, composição química esperada e valor da pontuação da simulação)	177
Tabela LIII	Composição química esperada (micropelotas-grânulos)	178
Tabela LIV	Limites de especificações das micropelotas-granulados (1 e 2 ano de operação)	179
Tabela LV	Resumo da simulação (proporção de matérias primas, composição química esperada e valor da pontuação da simulação)	182
Tabela LVI	Resumo da simulação (proporção de matérias primas, composição química esperada e valor da pontuação da simulação)	183
Tabela LVII	Limites de especificações das micropelotas-granulados (Após Término do Consumo do Material Estocado no ADR); 6,5 % de cimento; 7% de umidade e 1% de bentonito	184
Tabela LVIII	Caracterização química (%) do briquete da CST comparado dos os resultados simulados	185
Tabela LIX	Resumo do teste industrial	186

Tabela LX

Efeito da adição das micropelotas-granulados do processamento dos resíduos sobre a composição química do “blend” de sinter da COSIPA

188

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AACCMCI - The Association of American Ceramic Component Manufactures
- ADR - Área de disposição de resíduos
- AHP - Analytical hierarchy process (processo analítico de hierarquização)
- AL - Alabama/EUA
- ARIADINE - Alternative ranking interactive aid based on dominance structural information elicitation
- BB - Basicidade binária; $BB = C/S = [(\%CaO) / (\%SiO_2)]$
- BQ - Basicidade quaternária; $BQ = CM/SA = [(\%CaO + MgO) / (\%SiO_2 + Al_2O_3)]$
- BOF - Basic oxygen furnace (forno básico a oxigênio)
- BTX - Benzeno, tolueno e xileno
- CIII - Resíduo de cal/dolomita calcinada da unidade de Calcinação III
- CALADR - Cal estocada na área de disposição de resíduos
- CBP - Pelotas de altos-fornos a frio
- CFD - Fluidodinâmica computacional

CGT	- Cooperative game theory
CIMARI	- Cimento de alta resistência inicial
CLCG	- Carepa do poço do laminador de chapas grossas
CL	- Carga líquida (gusa líquido + retorno de aço líquido)
CM	- Carga metálica
CMEA	- Carepa do poço da máquina de escarfagem automática
CMLC	- Carepa do poço das máquinas de lingotamento contínuo
CLTQ	- Carepa do poço do laminador de tiras a quente
CLCG	- Carepa do poço do laminador de chapas grossas
CONAMA	- Conselho Nacional de Meio Ambiente
CONARC	- Tecnologia SMS-Demag (Combinação de conversor convencional + forno elétrico a arco)
CORALS	- Canonical optimal regression by alternating least squares
COSIPA	- Companhia Siderurgia Paulista
CRADA	- Cooperative research and development agreement
CS	- Carga sólida (sucata de aço + cascos + sucata de gusa + ...)

CST	- Companhia Siderúrgica de Tubarão
DM	- Decision maker (decisor)
DSS	- Decision support system
DRI	- Direct reduced iron
EAF	- Electric arc furnace (forno elétrico a arco)
EAF-AC	- Forno elétrico a arco com alimentação de energia em corrente alternada
EAF-DC	- Forno elétrico a arco com alimentação de energia em corrente contínua
EC	- Expert Choice ®
ELECTRE	- Elimination et coix traduisant la réalité
ETLIII	- Lama da estação de tratamento de lamas da Calcinação III
FO	- Função objetivo
FCP-I	- Fuzzy compromise programming
HBI	- Hot briquetted iron
IBM	- International Business Machine
IC	- Índice de consistência

IDF	- Parte do sistema de exaustão e resfriamento de gases/particulados (sistema OG)
IN	- Indiana/EUA
IPT	- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo SA.
IR	- Índice aleatório
ISS	- Iron and Steel Society
IISI	- International Iron and Steel Institute
LAFFF	- Lama da estação de tratamento da águas dos altos-fornos – U5A2 (fração fina)
LAFFG	- Lama da estação de tratamento de águas dos altos fornos – U5A2 (fração grossa)
LBE	- Lance bubbling equilibrium
LCC3	- Lama do canal de decantação C3
LETL	- Lama da unidade de tratamento de resíduos da Aciaria #1
LD	- Linz-Donawitz (forno básico a oxigênio)
LD-CB	- Combined blowing (sopro combinado)
LD – HC	- Linz-Donawitz Hainaut-Sambre/CRM
LD – KG	- Linz-Donawitz Kawasaki gas

LD – OB	- Linz-Donawitz oxygen blowing
LD – OTB	- Linz-Donawitz oxygen top and bottom
LINDO®	- Linear interactive and discrete optimizer (Lindo Systems Inc.)
LOGFF	- Lama da estação de tratamento de águas da Aciaria #2 – ETAL – fração fina (filtro à vácuo)
LMM	- Linear multiobjective method (simplex de Philip)
LMOIP	- Linear multiobjective integer programming
LOGFG	- Lama da estação de tratamento de águas da Aciaria #2 – ETAL – fração grossa (separador parafuso)
LSTAA	- Lama da estação de tratamento de águas ácidas
LPC	- Lamas, pós e carepas
LSTRA	- Lama do sistema de tratamento e recirculação de águas das laminações
MAUT	- Teoria da utilidade multiatributo
MCOQUE	- Moinha de coque
MORALS	- Multiple optional regression by alternating least squares
MPS	- Mathematical programming system

MRPA	- Multiple reference point approach
MS	- Microsoft®
MSM	- Multiobjective statistic method
ND	- Não disponível
NY	- Nova Iorque / EUA
OG	- Oxygen converter – gas recovery system (Kawasaki)
ONU	- Organização das Nações Unidas
ONG	- Organização não governamental
PCDD	- poli (tetra)-cloro-dibenzo-dioxina
PCFF	- poli (tetra)-cloro-dibenzo-furano
PDCCOR	- Pó do sistema de despoejamento da casa de corridas do alto forno
PF	- Perda ao fogo (%)
pH	- Potencial de hidrogênio; $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$
PL	- Programação linear
PMM	- Programação matemática multiobjetivo
PO	- Pesquisa operacional

POCAL	- Pó de cal
PODSEC	- Pó do sistema de despoejamento secundário da Aciaria #2
PODOL	- Pó de dolomita
POEDG2	- Pó do despoejamento da estação de dessulfuração de gusa nos carros torpedos- Aciaria #2
POCOL	- Pó do coletor do alto-forno
PPC	- Programação por compromisso
PROMETHEE	- Preference ranking organization methods for enrichment evaluations
PROTRADE	- Probabilistic tradeoff development method
Q-BOP	- Quick bottom oxygen process
QFD	- Quality function deployment (desdobramento da função qualidade)
R _{AHP}	- Escala de priorização do processo analítico de hierarquização
RC	- Razão de consistência
R&D	- Research and Development
RFA	- Antiga República Federal da Alemanha (atual Alemanha)
RHS	- Right hand side

SOLCAL	- Solução de cal
STB	- Sumitomo top and bottom
STE	- Equivalente térmico em sucata
SSD	- Sistema de suporte à decisão
TAMCO	- Usina siderúrgica (Califórnia/EUA)
TKS	- Thyssen Krupp Sthal
TN	- Tennessee /EUA
UK	- United Kingdom
UT	- Utah /EUA
UTA	- Utility additive
VAI	- Voest Alpine industrianlagenbau
VOC	- Compostos orgânicos voláteis
VÖEST	- Vereinigte Oesterreichische Eisen – und Stahlwerke AG

LISTA DE SÍMBOLOS

- A – Matriz (a_{ij});
- h – Altura da coluna capilar (cm);
- σ_L – Tensão superficial do líquido ($N \cdot cm^{-1}$);
- r – Raio do capilar (cm);
- ρ_L – Densidade do líquido ($g \cdot cm^{-3}$);
- g – Aceleração da gravidade ($cm \cdot s^{-2}$);
- δ – Ângulo de contato entre a superfície do sólido e a fase líquida ($^\circ$);
- ϵ_i – Porosidade do material i (%);
- S_i – Área superficial das partículas de material i ($cm^{-2} \cdot g^{-1}$);
- R_2 – Densidade real do material i ($g \cdot cm^{-3}$);
- $\alpha_{F/E}$ – Ângulo de compactação ($^\circ$);
- $\lambda_{m\acute{a}x.}$ – Maior autovalor da matriz (A);
- w – Vetor de prioridades;

- a_{ij} - Elemento da linha (i) e coluna (j) da matriz (A);
- S - Estímulo;
- ΔS - Incremento do estímulo (S);
- r - Razão da intensidade do estímulo; ($r = \Delta S / S$);
- S_0 - Estímulo inicial percebido;
- CPFT - Porcentagem acumulada de partículas menores que D_p ;
- D_p - Diâmetro da partícula;
- D_s - Diâmetro da menor partícula;
- D_L - Diâmetro da maior partícula;
- \bar{r} - Quociente entre o volume das partículas retidas em uma malha de peneira e o volume retido na malha imediatamente inferior;
- q - Módulo ou quociente da distribuição;

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados alcançados na elaboração de um projeto de recuperação e reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos contendo ferro, provenientes das etapas de elaboração, transformação e tratamento do gusa e do aço produzidos em uma usina integrada a coque (COSIPA – Companhia Siderúrgica Paulista). O projeto elaborado se baseia em dois cenários construídos tendo como base a reciclagem da quase totalidade dos resíduos sólidos gerados e estocados na forma de lamas, pós e carepas da COSIPA. Nas simulações das misturas dos resíduos siderúrgicos foi empregado um conjunto de técnicas de engenharia/administração, tais como: AHP (Analytical Hierachy Process) para a priorização dos resíduos e PL (Programação Linear) na otimização das misturas de resíduos. O modelo proposto foi construído a partir de dados obtidos através das caracterizações físico-químicas, granulométricas, cristalográficas e de geração/estocagem destes resíduos. As soluções do modelo de otimização das misturas de resíduos foram obtidas através da imposição de condições de contorno (presença de elementos deletérios, tais como enxofre, fósforo, álcalis e óleos, maximização da recuperação do ferro, do carbono, controle da basicidade e minimização da geração de ganga, etc.) definidas pelos processos de sinterização e de refino primário do aço através da adoção de duas rotas de reciclagem: aglomeração por granulação-micropelotização em misturador intensivo e briquetagem a frio. Industrialmente, testou-se a utilização de briquetes de resíduos siderúrgicos da CST (Companhia Siderúrgica de Tubarão) como carga sólida nos conversores a oxigênio da COSIPA.

ABSTRACT

The present work shows the results of a recycling and recover project of steelwork wastes that contains iron, carbon and iron oxides as major constituents from the elaboration, transformation and treatment of hot metal and steel process in a coke integrated steelworks (COSIPA - Companhia Siderúrgica Paulista). These projects consist of two recycling sceneries using all produced wastes of the steelworks process and storage landfill. For the wastes mixtures simulation that were used in a group of engineering/business tools and techniques, like: AHP (Analytical Hierarchy Process) and PL (Linear Programming) to solve the recycling model. The proposed model was fed with data from physical chemistry wastes analysis, granulometric distribution, crystallographic and generation/storage data of wastes. The solving of the mixtures optimization model was achieved with condition boundaries (sulphur, alkalis, phosphorus, oil content, iron and carbon improvement, basicity control and gangue minimization) determined by sintering and steel refining process, using two recycling routes: An intensive waste granulation and could roller press. Industrial tests using CST iron/wastes briquettes were used as solid charge in COSIPA's BOF process.

1 - JUSTIFICATIVA

O processo metalúrgico de produção, transformação e processamento do aço em usinas siderúrgicas integradas é um processo de grande impacto sobre o meio ambiente, uma vez que além de consumir uma grande quantidade de recursos naturais não renováveis^{1,2,3} (minério de ferro, minério de manganês, minerais não metálicos, carvão mineral, derivados do petróleo, ferroligas, etc.) é também um consumidor intensivo de água, gases industriais e energia elétrica gerando uma grande quantidade e diversidade de resíduos e subprodutos.

Tabela I - Consumo do setor siderúrgico brasileiro de algumas matérias primas e insumos, utilizados na produção do aço² - fonte: IBS/ base: 1999

Matéria-prima / Insumo	Valor	Unidade
Fontes de ferro e carbono		
Carvão mineral coqueificável	10.484	10 ³ t
Coque	8.038	10 ³ t
Carvão vegetal	4.273	10 ³ m ³
Minério de ferro	3.942	10 ³ t
Minério de manganês	143	10 ³ t
Pellets	1.557	10 ³ t
Sinter	22.205,5	10 ³ t
Escorificantes		
Dolomita	1.506	10 ³ t
Calcário	4.784	10 ³ t
Cal	1.230,7 (prod. Própria) + 787,4 (mercado interno) = 1.956	10 ³ t
Fontes de ferro e ferro-ligas		
Ferro gusa	20.674	10 ³ t
Sucata de ferro e aço	7.296	10 ³ t
Ferro-ligas: (FeMn, FeSiMn, FeCr, FeSi, FeW, FeMo, ...)	335,9	10 ³ t
Ferro esponja	397	10 ³ t

(Continuação)		
Energéticos e gases		
GLP	63,99	10 ³ t
Gás natural	409,8	10 ³ Nm ³
Oxigênio	2.182,8	10 ³ m ³
Energia elétrica	13.022	MWh
Óleo combustível	132,1	10 ³ t
Consumo específico - Fuel rate	396 (coke rate) + 120 (oil rate) = 516	Kg/t gusa

Os resíduos e subprodutos gerados podem ser basicamente divididos em cinco grandes classes^{4,5}:

- **Carboquímicos**: provenientes das etapas de transformação do carvão mineral em coque na unidade de coqueria;
- **Escórias**: provenientes da produção do gusa nos altos-fornos e dos processos de pré-tratamento do gusa, refino primário e secundário do aço;
- **Lamas, pós e carepas**: provenientes dos vários sistemas de captação de materiais particulados e limpeza de gases, existentes em todas as unidades fabris de uma usina siderúrgica;
- **Sucatas ferrosas**: provenientes de desvios de processos e sobras das etapas de elaboração do aço (sobra de metal líquido nos conversores, carros torpedos, painéis de aço e potes de escória, etc.), desvios de forma e qualidade nas etapas de lingotamento, escarfagem, laminação, armazenamento, transporte, etc;
- **Sucatas de materiais refratários**: provenientes da aplicação e utilização de materiais refratários conformados ou monolíticos nas unidades de manuseio de metal líquido (redução/aciaria) ou fornos e sistemas de aquecimento.

Em função desta diversidade e da grande quantidade de resíduos e subprodutos gerados em uma usina siderúrgica integrada, uma série de práticas operacionais, processos e equipamentos têm sido desenvolvidos visando à recuperação e a reciclagem destes. Porém, as práticas e tecnologias disponíveis nem sempre solucionam todos os problemas dos resíduos e subprodutos. Muitas vezes, as soluções propostas ou adotadas isoladamente acabam gerando novos problemas,

como a necessidade de disposição dos resíduos inservíveis em aterros ou a necessidade de inertização/incineração dos resíduos antes de sua disposição em local apropriado (aterro industrial).

Dentre todos estes resíduos e subprodutos gerados, as escórias apesar de serem em termos quantitativos os principais subprodutos, possuem tecnologias de recuperação/reciclagem bastante difundidas. Basicamente, as escórias dos altos-fornos quando corretamente granuladas possuem na indústria de cimento seu maior consumidor, sendo que novos estudos têm sido desenvolvidos para sua utilização diretamente como agregados miúdos em concretos, fertilizantes, etc. Já as escórias de aciaria possuem características distintas durante sua reciclagem, uma vez que reações expansivas devem ser controladas antes de sua utilização em aplicações estruturais. Estudos de sua utilização como corretivos de acidez de solo, como fertilizantes agrícolas, lastro ferroviário, base e sub-base de capeamentos asfálticos, etc. têm sido focos de desenvolvimentos por centros de pesquisas, universidades e empresas⁶.

A reciclagem dos resíduos carboquímicos apresenta um elevado retorno econômico para as usinas siderúrgicas e, apesar da complexidade das unidades de recuperação destes materiais eles são amplamente reciclados e recuperados na forma de gases para combustão (gás de coqueria), BTX^{*}, moinha de coque, etc.

As sucatas ferrosas são os subprodutos/produtos com a tecnologia de reciclagem e recuperação mais madura⁷, sendo estas intensivamente recuperadas e utilizadas como carga metálica na própria siderurgia seja ela integrada ou não.

A reciclagem das sucatas dos materiais refratários tem sido estudada em diversas frentes^{8,9}, seja sua recuperação direta como carga granulada em concretos e tijolos refratários, seja para a produção de escórias sintéticas ou mesmo no desenvolvimento de novos produtos refratários.

* BTX: Compostos orgânicos aromáticos: benzeno, tolueno e xileno.

As maiores dificuldades da reciclagem e da recuperação destes materiais são decorrentes da diversidade de tipos de materiais aplicados em um mesmo equipamento, da necessidade de se realizar a descontaminação dos restos de escórias e metais/cascões aderidos, além da necessidade de se controlar as modificações estruturais que ocorrem nestas sucatas refratárias ao longo do tempo (hidratação), degradando estes materiais.

Os resíduos siderúrgicos gerados na forma de lamas, pós e carepas (LPC) englobam a maior classe em termos de diversidade de formas, características físico-químicas e morfológicas, sendo então a classe de resíduos que será enfocada neste estudo. Basicamente, pode-se buscar a recuperação do ferro contido, do carbono e dos elementos fundentes (cal, magnésia, alumina, etc.) sendo que os principais elementos deletérios agregados a estes materiais são o enxofre, o fósforo, os álcalis, o zinco e a presença de óleos, graxas e alguns metais pesados.

Visando-se projetar uma unidade de recuperação e reciclagem que possibilite a transformação destes resíduos em um novo material capaz de atender aos parâmetros de processo das unidades de redução e de aciaria é necessária a resposta de algumas questões fundamentais tais como:

- Qual é a melhor rota de reciclagem levando-se em conta aspectos econômicos (custo de implantação e manutenção), ambientais, logísticos, tecnológicos (disponibilidade de tecnologia e simplicidade de sua implantação) e flexibilidade operacional?
- Quais são as características físico-químicas e morfologias que as misturas destes resíduos devam possuir, para que se minimizem as interferências nos processos produtivos e se maximize a taxa de reciclagem dos resíduos (gerados e estocados)?
- Qual a proporção ideal entre os vários tipos de resíduos e subprodutos capaz de maximizar a recuperação do ferro, do carbono e dos fundentes?

- Após se definir uma rota de reciclagem; quais são as possibilidades de se escolher aglomerantes de baixo custo e o qual sua interferência na característica dos produtos contendo reciclados (propriedades mecânicas, químicas, granulométricas, etc.)?

Com a finalidade de se responder algumas destas questões foi estruturado um modelo para a reciclagem dos resíduos siderúrgicos (lamas, pós e carepas) contendo as seguintes linhas de trabalho:

- Análise e caracterização química, granulométrica e mineralógica dos resíduos siderúrgicos sólidos disponibilizados pela COSIPA;
- Levantamento da geração dos resíduos siderúrgicos captados nas inúmeras unidades e equipamentos de controle, e de tratamento de efluentes e contabilização da quantidade de resíduos estocados na ADR* da COSIPA;
- Aplicação da metodologia de tomada de decisão multicriterial (AHP – Analytical Hierachy Process) visando à priorização das escolhas dos resíduos a serem reciclados;
- A simulação computacional de misturas destes resíduos, buscando determinar as condições ótimas para a maximização da recuperação do ferro, do carbono e de fundentes, através de técnicas de pesquisa operacional (programação linear);
- Elaboração de uma rota de reciclagem e um projeto de uma unidade capaz de processar os resíduos siderúrgicos tendo como base as soluções e condições de contorno (características químicas e de geração/estoque de resíduos) do modelo proposto.

*ADR – Área de disposição de resíduos, anteriormente conhecida como: “bota fora”.

2 - OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é desenvolver e solucionar um modelo para a reciclagem dos resíduos siderúrgicos (lamas, pós e carepas), capaz de indicar uma rota de reciclagem/recuperação destes resíduos através do desenvolvimento de um projeto de uma unidade industrial para recuperar os elementos contidos nestes resíduos (ferro, carbono e fundentes), trazendo uma série de benefícios ambientais e econômicos, tais como a racionalização da utilização dos recursos naturais não renováveis (minerais e energia) e obtenção de retorno financeiro para a própria usina siderúrgica.

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Atualmente, um dos grandes desafios do homem consiste na aplicação do conceito de desenvolvimento sustentável* aos processos de extração, transformação e de serviços, no sentido de garantir às futuras gerações iguais possibilidades de utilização dos recursos naturais¹⁰.

A consequência imediata desta prática mais sustentável reverte-se diretamente na melhora da qualidade de vida** e na diminuição da pressão sobre o meio ambiente; mas, para que estas metas de desenvolvimento sustentável sejam alcançadas, é necessário que as ações efetivas sobre as atividades industriais tenham baixo custo e facilidade operacional.

O primeiro passo em direção desses objetivos consiste na modernização de equipamentos, otimização do trabalho e da produção nas usinas - (Redução)***. O segundo passo se dá pela reutilização de peças e a retífica de dispositivos, visando obter o máximo rendimento e prolongamento da vida útil dos equipamentos - (Recuperação).

Outra frente de trabalho no sentido de buscar esse aperfeiçoamento da prática ambiental refere-se ao desenvolvimento de práticas e pesquisas científicas, com a finalidade de reciclar os materiais descartados (Reciclagem). A reciclagem vem despontando como uma alternativa fundamental, não só por baratear o custo de produção (aumenta a disponibilidade de matérias primas, insumos e energia), mas também por diminuir os gastos com a disposição, inertização e/ou imobilização dos resíduos industriais.

* O conceito de desenvolvimento sustentável foi primeiramente proposto pela Comissão Brundtland¹¹, criada pela ONU em dezembro de 1983.

** Qualidade de vida: Relação entre satisfação das necessidades e a ocupação do espaço (meio ambiente).

*** 3R's (ou mais): Reduzir, Recuperar, Reciclar, Reutilizar, Retornar, Reprojeter, etc.

Uma fonte de materiais passíveis de serem reciclados nas indústrias siderúrgicas são os próprios resíduos gerados durante as etapas de fabricação, transformação e processamento do aço.

No Brasil, onde a produção de aço bruto anual é de aproximadamente 30 milhões de toneladas¹² são gerados cerca de 1,2 milhões destes resíduos recicláveis por ano. A Figura número 1 apresenta a evolução da produção mundial até o ano de 2000 e evolução da produção de aço Brasileira até 2003.

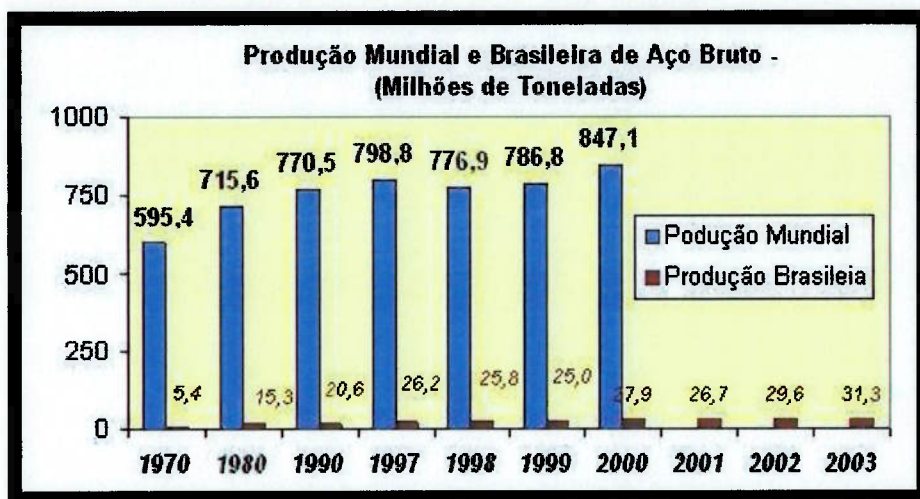


Figura 1 – Evolução da produção brasileira (até 2003) e mundial de aço bruto, em milhões de toneladas/ano (período de 1970- 2000), países associados ao IISI¹²

Em trabalho publicado em 1996, FRUEHAN¹³ analisou as tendências da siderurgia no século XXI e alguns de seus resultados podem ser sumarizados pela figura 2. Neste trabalho, se evidencia que a geração de resíduos particulados constitui um dos maiores desafios tecnológicos a serem enfrentados neste século pela siderurgia. Este estudo apesar de ser direcionado ao cenário Americano pode ser estendido para a realidade brasileira, uma vez que o país esta entre os dez maiores produtores mundiais de aço, e seu parque siderúrgico encontra-se em fase de modernização e expansão passada a crise vivida pelo setor no final da década de 90.

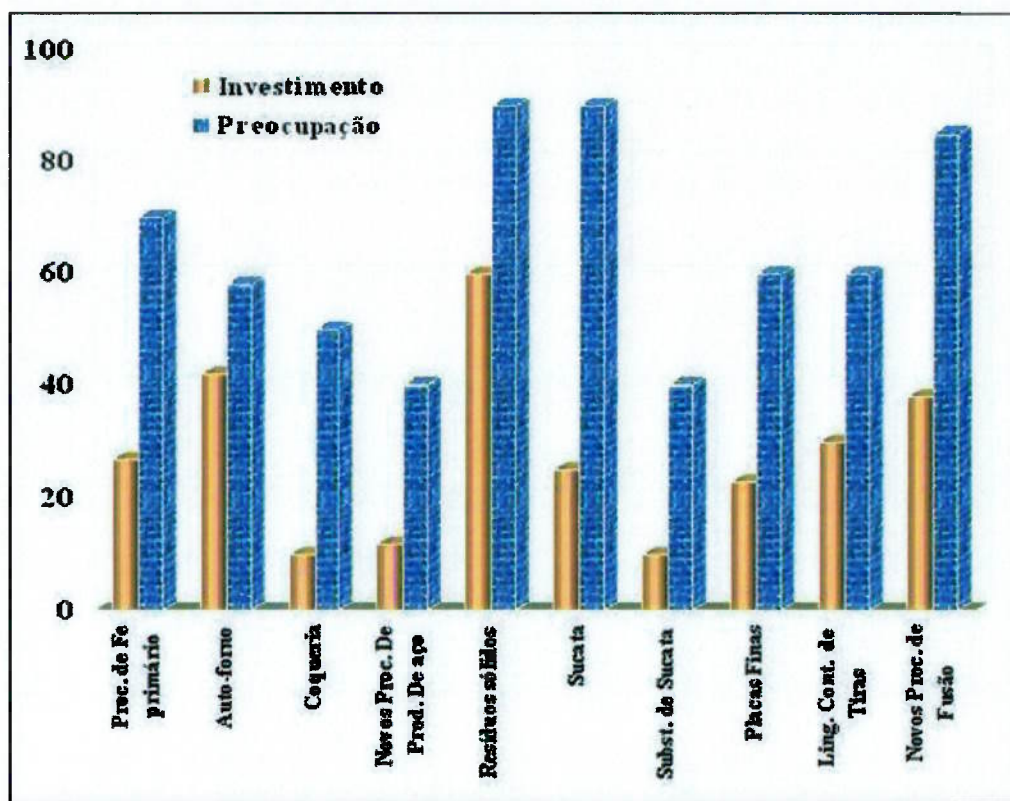


Figura 2 - As questões mais relevantes da siderurgia dos EUA¹³

3.1- Resíduos siderúrgicos

O processo siderúrgico é baseado em seqüências de reações que visam basicamente à produção do aço a partir do minério de ferro (usinas integradas) ou a partir da fusão de sucatas ferrosas (usinas não integradas). Cada operação unitária dentro de uma usina siderúrgica está associada ao consumo de matérias primas, insumos e energia, gerando por sua vez resíduos sólidos, líquidos e gasosos. A tabela II apresenta de forma resumida, uma relação dos principais resíduos gerados nas operações metalúrgicas desde a transformação do minério de ferro até se obter os produtos acabados.

Tabela II – Principais produtos e resíduos gerados nas unidades de processamento, tratamento e transformação do gusa e do aço¹⁴

Unidade - Planta	Produto	Resíduos (Sólidos / Líquido e/ou Gasosos)
Coqueria	Coque.	Gases (NO _x /VOC's*), dioxinas**, metano, benzeno, fenóis, compostos alifáticos, amônia, naftalenos.
Sinterizações	Sinter.	Material particulado, dioxinas, gases (CO/CO ₂ /SO ₂ /NO _x /VOC's).
Altos-fornos	Gusa líquido.	Fenóis, cianetos, amônia, sulfetos, gases (CO/CO ₂ /NO _x), refratários, escórias.
Dessulfurações	Gusa dessulfurado.	Material particulado, escórias.
Calcinações	Cales e dolomitas calcinadas.	Material particulado, CO ₂ .
Aciaria LD - Refino primário	Aço líquido.	Material particulado, Metais (Zn), gases (CO/CO ₂ /VOC's), metais solúveis, Material sedimentável, escórias, refratários.
- Refino secundário	Aço líquido (tratado).	Gases (CO/CO ₂), material particulado, sucata, escórias, refratários.
- Lingotamento contínuo	Placas/tarugos ou lingotes de aço.	Sucata, material particulado, sólidos suspensos, óleos.
Laminações	Chapas, bobinas, tiras.	Óleos, soluções ácidas, sucatas, gases (CO/CO ₂ /SO ₂ /NO _x /VOC's) material sedimentável, metais solúveis.

* VOC's - Compostos orgânicos voláteis.

** Dioxinas – Classe de compostos organoclorados.

Dentre os resíduos sólidos gerados nas operações metalúrgicas de produção e transformação do aço, pode-se classificá-los em 5 classes distintas que serão apresentadas a seguir:

a) Carboquímicos

São de certa forma a classe de resíduos mais perigosa, em função da toxicidade de seus componentes para o Homem, englobando gases (monóxidos e dióxidos de carbono, óxidos de enxofre e nitrogênio, amônia, compostos orgânicos voláteis), subprodutos/resíduos contendo benzeno, fenóis, BTX, alcatrão, piches, etc.

O coque é um produto obtido da pirólise que visa à transformação das moléculas complexas do carvão mineral* em produtos mais simples com o desprendimento de compostos voláteis. O material volátil é constituído por uma mistura de vários hidrocarbonetos e outros compostos, onde os principais são:

- **Compostos gasosos:** Hidrogênio, metano, etano, propano, butano, etileno, propileno, acetileno, dióxido de carbono, monóxido de carbono, sulfeto de hidrogênio, amônia, oxigênio e nitrogênio.
- **Compostos líquidos:** Benzeno, tolueno, xileno e dissulfeto de carbono.
- **Compostos sólidos:** Naftaleno, fenol, antraceno, alcatrões e piches.

* **Carvão mineral:** Uma vasta série de artigos e estudos sobre carvão mineral e meio ambiente podem ser obtidos através do site: < <http://www.ccsd.biz/publications/researchreports.cfm?PubID=40> > (Cooperative Research Center for Coal in Sustainable Development).

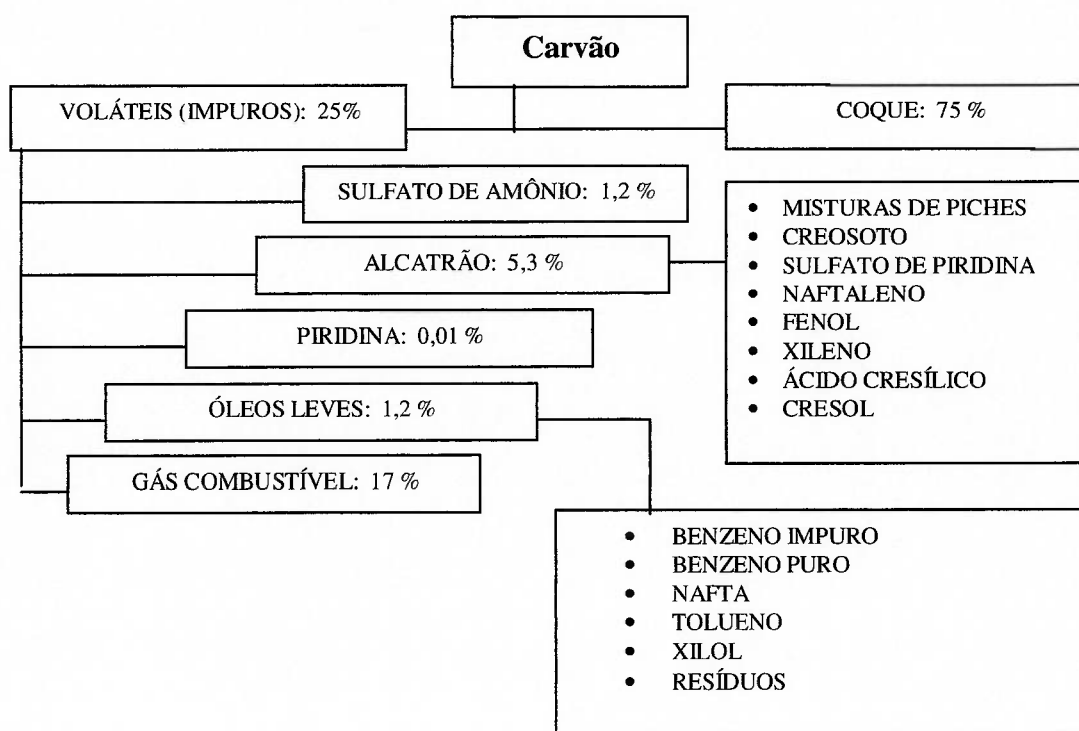


Figura 3 – Principais produtos obtidos pela destilação do carvão mineral⁴

b) Escórias

As escórias de alto-forno e de aciaria são os resíduos/subprodutos de maior geração nas usinas siderúrgicas, possuem uma larga utilização em outros processos industriais ou mesmo podem ser recicladas em diversas formas.

Tabela III – Principais aplicações das escórias siderúrgicas^{6, 33, 38}

Tipo de escória / aplicação	Escórias de aciaria a oxigênio Principal limitação tecnológica de uso: Expansão volumétrica	Escórias de alto-forno Principal limitação tecnológica de uso: Necessidade de granulação
Aplicação	Pavimentação, lastro ferroviário, artefatos de concreto (blocos, tubos, guias, blocos intertravados, ...), contenção de encostas (Rip-rap), gabiões, drenagens, fertilizantes, corretivos de solo.	Matéria-prima para a produção industrial (cimento, lâ mineral, indústria de vidro), asfalto, aterros, lastro ferroviário, bases de estradas.

Vários trabalhos⁴³⁻⁴⁸ têm sido conduzidos com o objetivo de aumentar sua utilização em uma vasta gama de aplicações, cobrindo um universo de potencialidades como: agricultura, construção civil, indústria de vidros, indústria de cimento e de construção rodo-ferroviária. Seu emprego só não é maior devido a uma série de fatores tais como:

- Competição com produtos naturais (calcário);
- Alto custo do frete;
- Necessidade de melhores estudos e de regulamentação de seu emprego “in natura”;
- Necessidade de estudo e normalização de suas características para aplicações estruturais;
- Baixa produção de cimentos do tipo: CP-II-E e CP-III;
- Necessidade de maior divulgação de suas potencialidades de uso agrícola (corretivo de acidez, fonte de silício, aumento da disponibilidade de cálcio e fósforo, efeito residual, etc.).



Figura 4 - Sequência do beneficiamento interno de escórias de Aciaria LD (resfriamento com água, transporte, separação magnética e classificação granulométrica)

Do ponto de vista tecnológico, os dois principais aspectos envolvidos na sua aplicação e no processamento das escórias são a necessidade de granulação (formação de fases vítreas e facilitação de manuseio) e o controle de sua expansão dimensional (dependente de sua composição química).

Basicamente, para cada tonelada de gusa produzido, em torno de 270 kg de escória de alto-forno são gerados, e para cada tonelada de aço líquido processado, 100 a 150 kg de escória de aciaria são formados. A seguir, são apresentados os balanços de materiais para as rotas de produção de aço via refino por oxigênio e por forno elétrico.

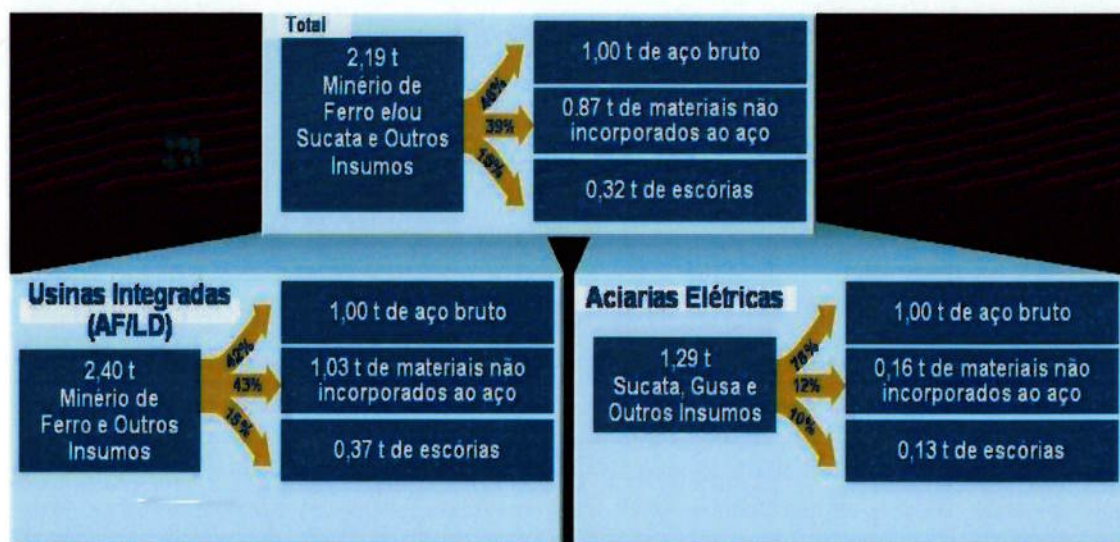


Figura 5 – Balanço de massa da geração de escórias para usinas integradas a coque ou não¹⁵ (Referência brasileira)

c) Lamas, Pós e Carepas (LPC)

Em uma usina integrada brasileira, cada tonelada de aço (produto acabado) gera, aproximadamente, 200 kg de resíduos sólidos ricos em ferro (25-85% em massa).

Em geral, os resíduos sólidos, ricos em ferro, apresentam-se na forma de pós secos (material particulado), lamas e carepas¹⁶, sendo que atualmente, tais resíduos recebem basicamente as seguintes destinações¹³:

- Aproximadamente 6% são comercializados;
- 14% são destinados a áreas de acumulação;
- 80% dos pós e das carepas retornam à sinterização.

Embora a reciclagem da maior parte (80%) dos resíduos sólidos ricos em ferro via sinterização seja uma prática siderúrgica comum, todavia, devido principalmente às características granulométricas dos mesmos (uma alta porcentagem de particulados com granulometria inferior a 0,150 mm), tal prática não é a mais recomendada, por diminuir a permeabilidade da carga e conseqüente produtividade da sinterização. Outros fatores que prejudicam sua utilização direta estão associados à elevada heterogeneidade química e variação do conteúdo de água dos resíduos, o que causa segregação e limitações técnicas (térmica / composição química / distribuição granulométrica) e conseqüente descontrole das propriedades do sinter, dificuldades durante o manuseio, menor recuperação econômica global dos resíduos e utilização menos adequada do potencial de estocagem de resíduos no aterro industrial.

A reciclagem por meio de aglomeração (pelotização/briquetagem) destes resíduos parece ser uma rota atraente, pois:

- Flexibiliza a reciclagem conjunta de quase totalidade de resíduos sólidos gerados durante a produção e transformação do aço;
- Pode-se potencializar a recuperação energética dos redutores (coque e/ou seus subprodutos e outras fontes de carbono);
- Produto pode se transformar em aço (utilização nos conversores LD) ou carga metálica para a sinterização ou altos-fornos;
- Diminui a demanda de matérias primas e insumos externos;
- Promove um ganho econômico e ambiental (internalização dos impactos ambientais);
- Por simples secagem, classificação, dosagem e mistura se obtém uma matéria-prima apta à conformação: pelletização / briquetagem;
- Promove a busca de um desenvolvimento mais sustentável do negócio.

Do ponto de vista das tecnologias existentes tem-se o processo de sinterização, a pelletização ou a briquetagem dos resíduos como operações convenientes para a transformação destes em produtos ou insumos.

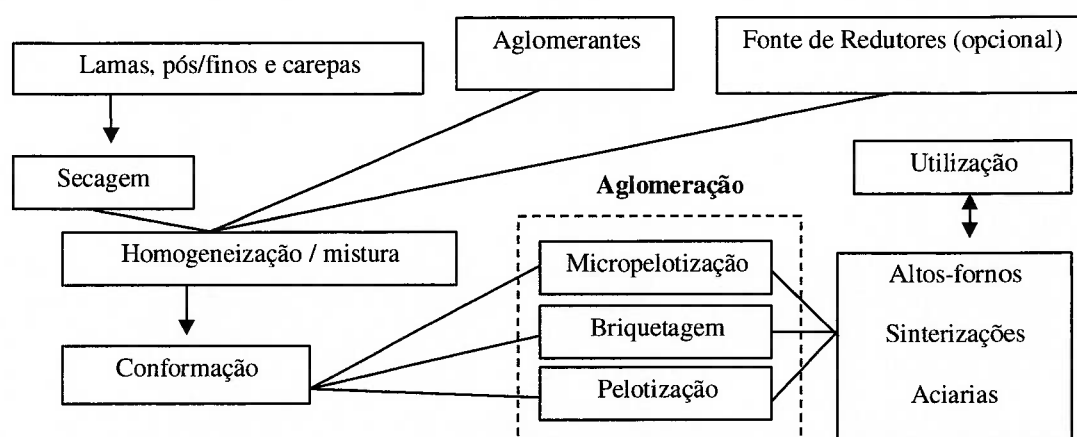


Figura 6 – Fluxograma geral para a reciclagem interna de resíduos sólidos contendo ferro em usinas siderúrgicas¹⁷

Principais aplicações dos processos de aglomeração de pós na reciclagem de resíduos siderúrgicos contendo ferro

A utilização de processos de aglomeração visando à reciclagem dos resíduos siderúrgicos sólidos não é uma prática nova. Ela teve seu desenvolvimento conjuntamente com a evolução das técnicas de aglomeração, mas, vários fatores têm alavancado sua utilização, tais como:

- Pressões econômicas: custo de matérias primas, insumos e energia (resíduos são desperdícios do processo), aumento do custo de disposição de resíduos em aterros, aumento dos passivos ambientais;
- Pressões sociais (sociedade, ministério público, governos e meio empresarial);
- Pressões ambientais (saturação do meio ambiente degradado, impossibilidade de diluição, de descarte dos resíduos e incremento se sua geração for dada por implantação e melhorias dos sistemas de controle da poluição).

A seguir na tabela IV é apresentado um resumo contendo vários desenvolvimentos e implantações de reciclagem dos resíduos siderúrgicos contendo ferro através de técnicas de aglomeração (pelotização e conformação). Mais informações podem ser obtidas nos trabalhos desenvolvidos pelo IBS⁵¹, IPT⁵², IISI⁵⁶ e por empresas como: Hesco/Sobremetal²⁶, VAI⁵³, Küttner⁵⁴, Nippon Steel⁵⁵, TKS³⁸, entre outras.

Tabela IV – Estudos, desenvolvimentos e implantação de tecnologias visando à reciclagem dos resíduos contendo ferro nas usinas siderúrgicas.

Usina/ empresa	Processo / Tecnologia	Descrição	Referência bibliográfica
COSIPA, Cubatão/SP	Estudos de aglomeração, micropelotização em misturadores intensivos para a sinterização	Micropelotização de resíduos diversos contendo ferro (lamas e pós) e cal em escala laboratorial e teste semi-industrial; testes em sinterização piloto indicando que a dosagem de até 4% não provocam alterações significativas de mistura a sinterizar.	18, 34 a 37
Thyssen Stahl AG (Edelstahlwerke) e TKS AG	Briquetagem, reforçada com adição de fibras metálicas (aglomerante: lignosulfonato de Ca/Mg) - Hamborn shaft furnace (R&D project)	Briquetagem de pós-secos coletados dos sistemas de despoeiramento – precipitador eletrostático dos (convertedor AOD e EAF), aglomerante: sistemas. Forno “Shaft”: metal líquido e escória (proporção estimada 3:1)	19, 38
Posco, (Pohang Works – Coréia do Sul) CBP (Kwangyang Works)	Pelotização com cimento (5-10%) – resíduos contendo ferro Pelotização: Resíduos de calcinações.	Pelotização (lamas de aciaria a oxigênio, pós-secos do sistema de precipitadores eletrostáticos, resíduos carbonáceos (10%) de coqueria). Pelotização: lama calcária, cal. CBP – pelotas para alto-forno	20, 49

(continuação) CSN – Volta Redonda /RJ	Processo Regran: Mistura e homogeneização direta.	Granulação de rejeitos em misturadores intensivos com finos de sinter (proporção 1:2).	21, 40
CST – Serra /ES	Briquetagem – 1º Fase: Briquetes para altos-fornos; 2º Fase: Briquetes para aciaria LD.	Briquetagem (lamas de aciaria e carepas de lingotamento) enriquecimento de resíduos pré- reduzidos, aglomerante: cal hidratada + melaço.	22
British Steel – Teesside Works - Inglaterra	Injeção de lamas e óleos pelas ventaneiras dos altos-fornos.	Teste em escala piloto: Lamas de laminações e óleo na proporção 1:1.	23
Inland Steel Company - EUA	Briquetagem a frio.	Briquetagem a frio de lamas de aciaria e carepas, ligante melaço + cal hidratada.	24
VAI Stahl – Linz / Áustria	Pelotização: resíduos BOF Briquetagem a frio: resíduos BOF Injeção de finos pela lança: resíduos BOF.	1 ton/h 12 t/hora 200 kg/min.	25
Heckett Multiserv- Eslováquia	Pelotização e Briquetagem.	Pelotização: ligante a base de cal e escória desmetalizada	26
ILVA S.p.a – Taranto - Itália	Briquetagem, 34 % destinados ao alto- forno e 66% como carga sólida LD (aciaria).	Resíduos de aciaria e altos-fornos (lamas e pós), adição de 4% de finos (escória) e ligante a base de cal+melaço.	53

d) Sucatas Ferrosas

A reciclagem de sucatas ferrosas, além de ser um negócio que movimentava bilhões de dólares por ano^{7,41} (EUA – US\$ 5 bilhões em 1998) é uma prática ambientalmente muito desejável, pois minimiza o gasto energético e aumenta a disponibilidade de recursos naturais.

Esta facilidade de transformação (ganho energético), atrelado à dinâmica da disponibilidade de sucatas⁴² e um menor investimento de instalações e aumento da qualidade dos produtos provenientes da transformação do aço em usinas (Mini Mills* e aciarias elétricas), tem dado um grande impulso à indústria de reciclagem.

Outro fator importante para o aumento da reciclagem é a diminuição de áreas disponíveis para a disposição de sucatas e o alto custo desta prática⁷ (UK: US\$ 5 a 23 /tonelada – RFA: US\$ 250 a 375 / tonelada – Japão : US\$ 93 /t).

Tabela V - Relação entre a produção e a reciclagem de latas de aço⁷ - Fonte: Aspects of Steel Recycling

País	UK	Japão	Alemanha	EUA	França
Produção kt/ano	700	1438	856	Nd	567
1990	11 %	50 %	50 %	34 %	32 %
1995	Nd	Nd	75 %	66 %	50 %
2000 (estimativa)	37-50 %	Nd	95 %	Nd	75 %

* **Mini Mills:** Usinas siderúrgicas de menor capacidade, normalmente não integradas.

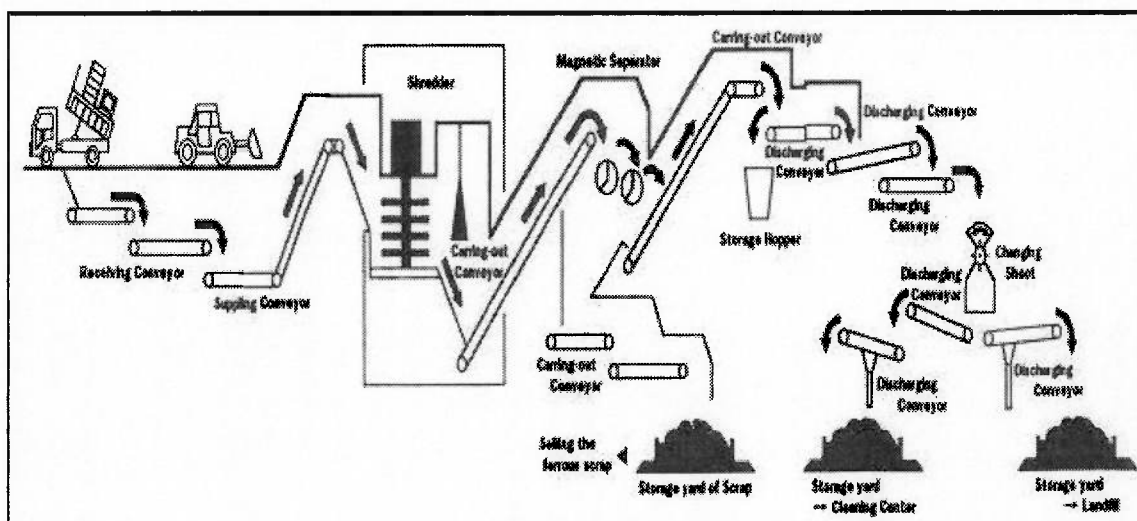


Figura 7 - Circuito de tratamento e beneficiamento de sucatas ferrosas / linha branca⁷ – usando um equipamento denominado “shredder”

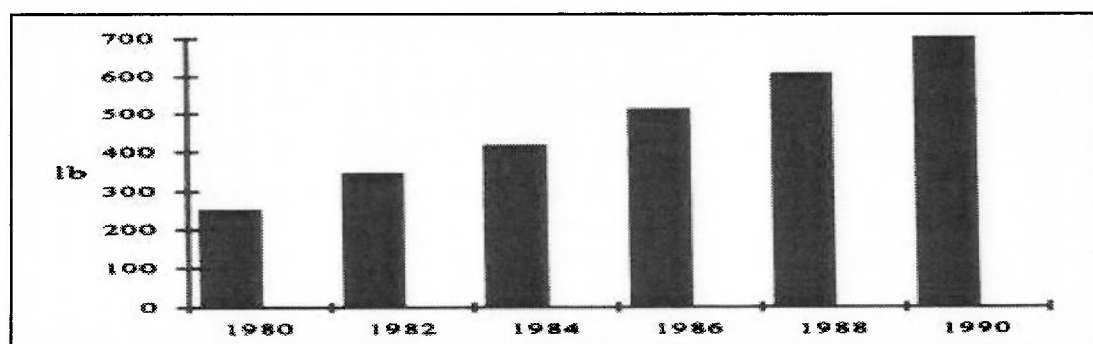


Figura 8 - Quantidade de aço galvanizado (em libras; 1 libra = 0,45 kg) utilizado na manufatura de veículos de passeio⁷ – EUA

Do ponto de vista negativo da reciclagem das sucatas ferrosas, tem-se a geração de resíduos perigosos (Zn), decorrente do aumento da utilização de sucatas galvanizadas e a contaminação radioativa de sucatas provenientes de dispositivos nucleares (armamentos, medidores, reatores, etc.), como os fatores mais importantes a serem levados em consideração.

A cada ano a siderurgia mundial utiliza cerca de 200 milhões de toneladas de sucata, sendo em sua maioria fundida em fornos elétricos. Estas sucatas na maior parte das vezes, utilizam o transporte rodoviário ou ferroviário nas siderúrgicas, tendo apenas uma inspeção visual em seu recebimento antes de sua aceitação. Na maioria dos casos, não se analisa a emissão de radiação.

Em 1983, a usina de Auburn (NY/EUA) fundiu como sucata uma fonte radioativa, contaminando a planta e neste episódio, gastou-se 4,4 milhões de dólares na operação de descontaminação. Outro acidente bizarro ocorreu em 1984, quando os detectores do Centro de Pesquisa Los Alamos, no Novo México/EUA, dispararam – Uma mobília de aço foi construída com aço contaminado por cobalto 60, produzido em uma usina siderúrgica do Novo México/EUA.

Quando acidentalmente carregado nos fornos elétricos, o material radioativo não é destruído, ele somente é distribuído entre os produtos da produção do aço. O Cobalto 60 é absorvido pelo aço, o Césio 137 é volátil e coletado nos equipamentos de controle ambiental (filtros), o Amerício 241 é absorvido pela escória.

Nos EUA, a maior parte dos acidentes contendo resíduos radioativos, fundidos em usinas siderúrgicas, ocorreram com material radioativo natural, que não é potencialmente tão perigoso quanto fontes radioativas artificiais.

- 600 acidentes – materiais radioativos naturais;
- 30 acidentes – fontes radioativas artificiais.

Porém, os acidentes com fontes artificiais geraram grande dispêndio de gastos com a descontaminação, estes gastos são mostrados na tabela VI a seguir.

Tabela VI - Alguns dos acidentes radioativos com a fusão de sucata documentados nos EUA, após 1983, fonte: Aspects of Steel Recycling – IISI⁷, 1995

Acidente	Ano	Metal	Local	Isótopo	Gasto U\$\$ Milhões
1	1983	Fe	Auburn Steel - NY	Co 60	4,4
2	1984	Fe	US. Pipe & Foundry - AL	Cs 137	0,6
3	1985	Fe	TAMCO	Cs 137	1,5
4	1987	Fe	Florida Steel - TN	Cs 137	0,2
5	1987	Al	United Tech - IN	Ra 226	0,5
6	1989	Fe	Cytemp Spec - PA	Th	0,1
7	1990	Fe	Nucor - UT	Cs 137	2,0
8	1992	Fe	Newport Steel	Cs 137	2,5
9	1992	Al	Reynolds - VA	Ra 226	-
10	1993	Fe	Auburn Steel - NY	Cs 137	5 - 10

e) Sucatas de Refratários

Os refratários são materiais utilizados como revestimentos de equipamentos siderúrgicos e possuem como função básica a contenção de metal líquido e o isolamento térmico. O mercado brasileiro de materiais refratários é da ordem de 181.000 toneladas ano (base: 1998), gerando uma média percentual estimada de 32% de sucata refratária (58.000 toneladas).

Os refratários após uso apresentam problemas específicos para serem reciclados, podendo ser dividido em duas classes²⁸:

- Reciclagem de Descartes no Produtor:

- Os descartes gerados no produtor são de origem conhecida;
- Em geral, não possuem contaminações;
- Os custos de processamento são menores, pois em geral, envolvem apenas estocagem, moagem, e classificação;
- Podem ser dosados em pequenas quantidades, na proporção que são gerados;
- Menor envolvimento de terceiros;
- Menor incidência de regulamentações e legislação específica.

- Reciclagem de Descartes no Consumidor:

- Descartes gerados no consumidor são muitas vezes de origem desconhecida;
- Em geral, possuem contaminações (outros refratários, alterações químicas, escória e aço);
- Os custos de processamento são maiores, pois em geral, envolve demolição, seleção, limpeza, moagem, classificação, estocagem e transporte;
- Podem ser taxados de impostos;
- Possuem legislação ambiental específica, quando classificados como resíduos.

As principais práticas empregadas e utilizadas na reciclagem dos materiais refratários são: reutilização dos agregados limpos, britados e classificados como carga em concretos refratários, produtos refratários (peças pré-moldadas) e escórias sintéticas ou ainda podem ser aplicados diretamente como peças de desgaste em zonas de impacto de jato de metal líquido ou em assentamentos em regiões de baixa solicitação mecânica.

3.2 – Reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos (lamas, pós e carepas)

Atualmente, do ponto de vista tecnológico, a maior parte ou quase a totalidade dos resíduos siderúrgicos contendo ferro podem ser reciclados ou devidamente inertizados. Porém, a dificuldade atual para se adotar uma prática do tipo

“zero waste plant”^{30,31} está associada ao custo de investimento necessário para a adequação dos processos existentes à necessidade de construção e operação de unidades de reciclagem capazes de recuperar de forma integral e integrada os subprodutos/resíduos. No caso da inertização, seu elevado custo de tratamento (incineração ou encapsulamento) e seguinte disposição adequada ainda é um obstáculo.

A grande questão da reciclagem destes resíduos^{27,29} é centrada na compatibilização de tecnologias versáteis (capazes de englobar uma grande variedade de tipos de resíduos), com baixo custo de instalação/operação e capazes de garantir um produto final com características e propriedades controladas: físico-químicas, granulométricas e termo-mecânicas.

Neste ponto, uma série de propostas tecnológicas têm sido empregadas para solucionar o problema de tratamento, reciclagem e disposição dos resíduos, tais como:

- Utilização “in natura” (sinterizações);
- Mini sinterizações;
- Plantas de pelletização/granulação a frio (posterior envio às sinterizações);
- Plantas de briquetagem a quente e/ou a frio (posterior envio à aciaria ou aos altos-fornos);
- Agente para o processo de desfosforação;
- Agente para o processo de dessiliciação de gusa;
- Fundente/escorificante no processo LD;
- Matérias primas em usinas de pelletização de minérios de ferro;
- Matérias primas na indústria cerâmica;
- Recuperação dos metais contidos, etc.

A Reciclagem dos resíduos é uma prática ambientalmente desejável, fazendo parte do emprego de “Tecnologias Limpas”*. Neste caso, busca-se internalizar os impactos ambientais dos processos produtivos, minimizando a geração dos resíduos e transformando materiais inservíveis em insumos, matérias primas e energia.

A prática siderúrgica mais comum na COSIPA (usina siderúrgica integrada focalizada neste trabalho) é a reciclagem via sinterização, venda (escórias/resíduos das calcinações) e a disposição em aterros. A reciclagem, recuperação e o reuso dos materiais e resíduos gerados podem ser realizados de várias maneiras e formas, porém depende de uma grande quantidade de variáveis, tais como: conscientização empresarial, disponibilidade de recursos técnicos e financeiros, localização geográfica, atuação da sociedade e do poder público (órgãos ambientais, ONG’s, ministério público, governo, etc.), legislação ambiental, valor do resíduo**, etc.

Alguns resíduos sejam por sua composição química muito heterogênea não são passíveis de serem reciclados, logo sua estocagem e monitoramento devem ser realizados em instalações projetadas para este fim. A COSIPA em 1995 desenvolveu um projeto de aterro industrial⁵⁰ para a disposição dos resíduos classe: II e III, com a execução da obra sendo realizada de forma parcial, ou seja, em módulos. O projeto original desenvolvido pela CSD-Geoclock e aprovado pela CETESB possuía as seguintes características:

- Capacidade total: 850.000 m³
- Área útil: 175.000 m²
- Vida útil: 10 anos
- Número de células: 10

* **Tecnologias limpas:**³² Práticas de escolha tecnológica e de gestão ambiental, onde os tratamentos do tipo “end of pipe” são substituídos por projetos ambientalmente mais eficazes, tratando-se das causas da poluição e não de seus efeitos.

Os principais resíduos a serem destinados ao aterro industrial são: lixo industrial, solução de cal (caixas e galerias das calcinações), lamas de valas, lixo urbano (varrição de ruas), lama do poço de bombas do IDF da aciaria #2, pós coletados pelo aspirador industrial, escória bruta (não granulada), lamas de galerias, bocas de lobo e canaletas pluviais (microdrenagem).



Figura 9 – Aterro industrial classe II e III da COSIPA (19/10/2000)

**** Valor do resíduo:** A valoração de resíduos é uma prática complexa, que contém parâmetros subjetivos e objetivos, tais como: equivalente em matérias primas, equivalente em energia, gastos com manuseio/ transporte/ disposição, valor de mercado, risco de contaminação, exposição da população, impacto sobre o biota, etc.

3.2.1 – Reciclagem Externa

Pode-se classificar o tipo de reciclagem de várias maneiras, sendo que quanto ao local de realização da operação de reciclagem ela pode ser externa ou interna. A reciclagem externa é realizada em outro estabelecimento industrial, sendo que, neste caso os resíduos são basicamente matérias primas ou insumos para outros tipos de processos industriais. Do ponto de vista ambiental, muitas vezes a reciclagem externa não é a prática mais desejável, uma vez que ela envolve terceiros, aumenta o risco nas etapas de transporte, envolve aspectos jurídicos específicos (licenças, autorizações, registros, etc.), aumenta o risco e exposição do negócio à acidentes e indenizações ambientais, externaliza impactos ambientais, aumenta os custos com fiscalização e controle, etc.

Tabela VII – Classificação da reciclagem de resíduos

Tipo de classificação	Descrição
Quanto ao local e instalações	- interna - externa (cativas ou abertas)
Quanto à utilização	- matéria prima - produto - insumos ou componentes - combustível - co-processamento *
Quanto ao estado do resíduo	- estado bruto - após condicionamentos físicos - após condicionamentos químicos, térmicos ou físico-químicos
Quanto ao tipo de processamento	- mecânicos - térmicos - pirometalúrgicos / químicos
Quanto ao processo de geração	- mesmo processo que foi gerado - processo distinto do qual foi gerado

* **Co-processamento:** incorporação de resíduos tóxicos e não inertes em materiais inertes, normalmente baseados em dois pilares: balanço térmico favorável (recuperação energética) e compatibilidade química.

As principais aplicações da reciclagem externa dos resíduos siderúrgicos (lamas, pós e carepas), são:

- Matéria prima para a indústria de cerâmica;
- Matéria prima na indústria de processamento mineral;
- Aditivo para a produção de blocos de concreto;
- Tratamento de água (resíduos a base de cal).

3.2.2 – Reciclagem Interna

A reciclagem interna é a prática mais usual na indústria siderúrgica e será a mais enfocada neste estudo. As principais aplicações da reciclagem dos resíduos siderúrgicos do tipo LPC são as aplicações de substituição de matérias primas nos próprios reatores metalúrgicos (altos-fornos, sinterizações, convertedores e fornos elétricos).

Cada um destes reatores apresenta características distintas quanto às propriedades dos reciclados passíveis de serem processados, tais como: composição química, comportamento térmico, teores de umidade, resistência mecânica, etc.

3.2.2.1 - Altos-fornos

O alto forno, basicamente é um reator complexo de redução de minério de ferro que tem como objetivo produzir ferro gusa líquido gerando como subprodutos e resíduos: escória, pós e gases a altas temperaturas. As principais reações e transformações que ocorrem no interior do alto forno são a redução carbotérmica da carga (“metálica”) através da ascensão de gases redutores aquecidos em contracorrente e a formação de escória decorrente da fusão da ganga e dos fundentes.

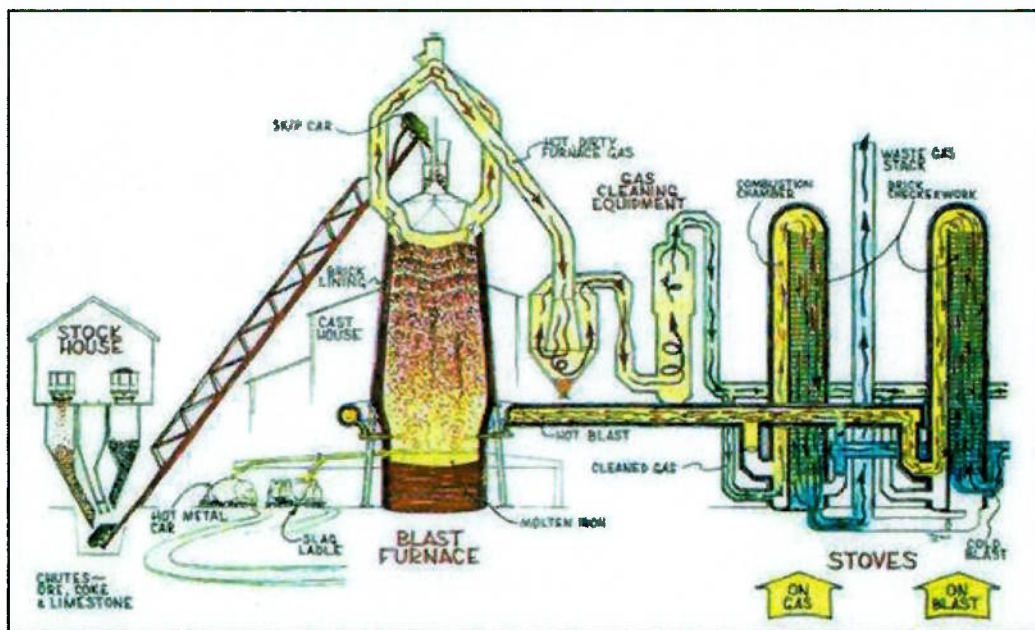


Figura 10 – Alto-forno: principais equipamentos e sistemas acoplados⁵⁷ - (“Blast furnace”: alto forno; “stock house”: casa de silos; “cast house”: casa de corrida; “stoves”: regeneradores)

As principais características da carga alimentada nos altos fornos são:

- Controle granulométrico;
- Composição química e elementos deletérios (teor de ferro, teor de carbono, teor de cinzas, fósforo, enxofre, álcalis, ganga, basicidade, etc.);
- Distribuição de carregamento (carga metálica e coque);
- Reatividade do coque;
- Resistência mecânica;
- Redutibilidade da carga metálica;
- Porosidade/área superficial.

A figura 11 apresenta os principais fenômenos físicos e térmicos no alto forno. (perfil térmico, reações de redução, zonas, etc.).

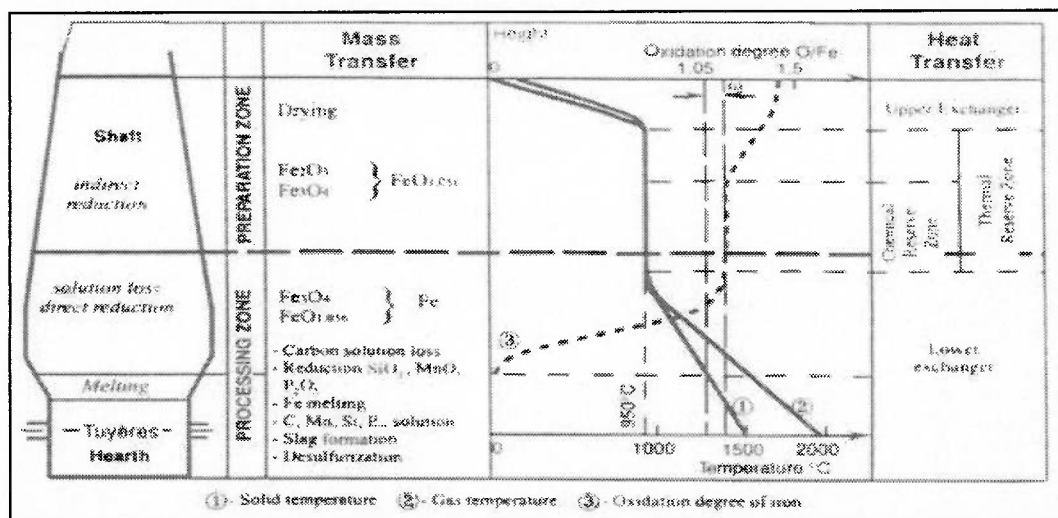
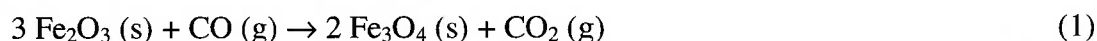


Figura 11 – Princípio geral do processo de redução de minérios em um alto-forno com as indicações de transferência de massa, calor e temperaturas de processo dividido em duas zonas - (“preparation zone”: zona de preparação indicando as reações de redução indiretas e “processing zone”: zona de processo onde se processa a reação de Boudouard, redução direta e fusão)⁵⁸

Transformações da carga:

a) Carga metálica e carbono (minério de ferro, sinter/pelota e coque):

Durante o processo de produção do gusa, a carga metálica desce em contracorrente ao fluxo de gases, onde diversas reações de redução, gaseificação e decomposição são processadas. A figura 12 apresenta esquematicamente estas transformações.



Reação de Boudouard⁵⁹: Reação de gaseificação do carbono, também conhecida como: “solution loss”.

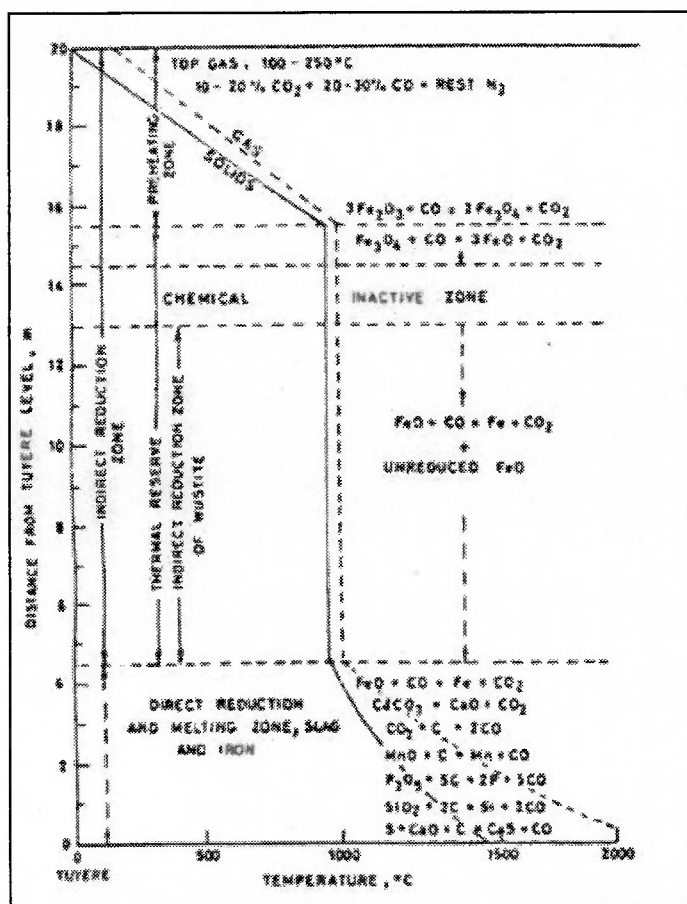


Figura 12– Reações de redução da carga metálica em um alto-forno⁶⁰

(distribuição de gás e sólidos ao longo do forno - temperatura e distância do nível das ventaneiras).

b) Sílica e silicatos:

O silício sob a forma de sílica (SiO₂) representa o maior componente da ganga do minério. Na temperatura acima de 1200 °C, grande parte da sílica combina com a cálcia (CaO) e com a magnésia (MgO) formando silicatos que passam para a escória. Sob determinadas circunstâncias é possível reduzir a sílica no alto-forno à custa do aumento de temperatura e conseqüente aumento do consumo de combustíveis. Nos ciclos operacionais normais somente uma pequena proporção de silício metálico é formado e este, se incorpora ao gusa.

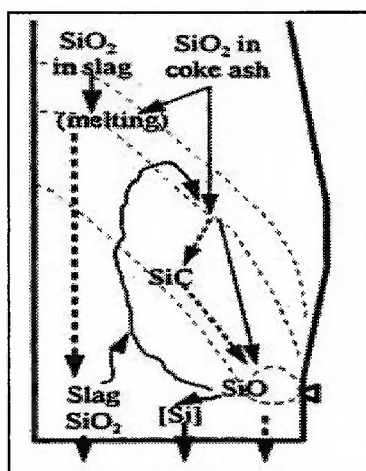
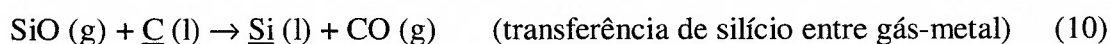
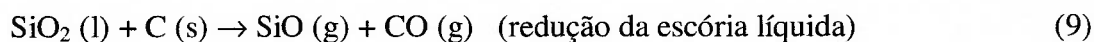
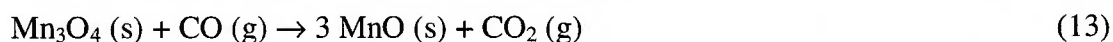
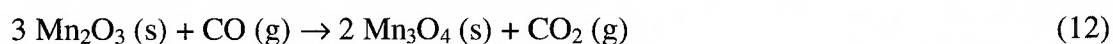
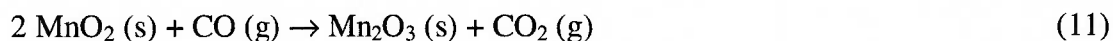


Figura 13 – Esquema das reações químicas dos produtos de redução dos compostos de silício no interior de um alto-forno⁶¹ - (“slag”: escória; “melting”: fusão; “coke ash”: moinha de coque)

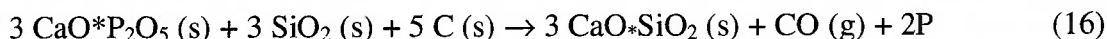
c) Manganês:

O manganês é introduzido no alto forno como parte do minério de manganês adicionado ou de algum fundente. Cerca de 50 a 75 % do manganês adicionado é reduzido e incorporado ao gusa sendo o restante transferido para a escória.

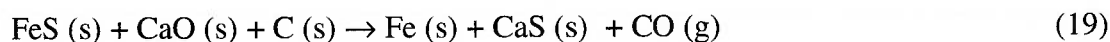


d) Fósforo:

É basicamente um dos únicos elementos que são totalmente incorporados no gusa, ao serem reduzidos os seus compostos carregados no alto forno.

**e) Enxofre:**

O coque é o principal contribuinte para o aumento do teor de enxofre seguido pela presença de minérios sulfurosos e/ou sulfatos (FeS, MnS, FeS₃, etc.). A remoção do enxofre se faz pela reação entre a cal com o enxofre, produzindo um sulfeto de cálcio, porém na presença de FeO, este tende a dificultar o processo. Sendo o alto forno um reator que opera com excesso de carbono, pode-se reverter em parte este processo.



(O Manganês na carga também contribui para a remoção do enxofre)

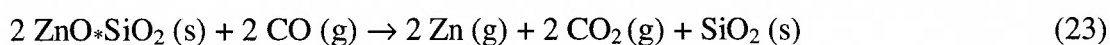
**f) Zinco:**

O zinco contido no minério sofre redução na parte superior da região da cuba do alto-forno sendo volatilizado através da coluna de carga, depositando-se nas regiões mais frias e oxidando-se conforme a reação:



Uma parte do óxido de zinco pode depositar-se nas paredes da cuba e nos condutores de saída de gases interrompendo seu fluxo, outra parte dos vapores de zinco pode se infiltrar nos poros e fendas dos materiais refratários, causando sua destruição ou ainda reagir com sílica e silicatos, formando compostos sólidos.

Um ponto importante de se observar é que a introdução do zinco na carga do alto forno é distinta da função da fonte da matéria prima. Nos minérios de ferro o zinco é encontrado na forma de silicato ($2 \text{ ZnO} \cdot \text{SiO}_2$). Por outro lado, o zinco proveniente de resíduos siderúrgicos está na forma de óxidos. Já os resíduos de poeiras de aciaria LD e de FEA, se encontram na forma de soluções sólidas de FeO e ZnO (ferritas de zinco).



Como o óxido de zinco apresenta uma temperatura de início de redução mais baixa do que de seus silicatos, o que pode ser considerado um ponto positivo para o processo, uma vez que se desloca a região de recirculação para a parte mais superior do alto-forno aumentando assim a possibilidade deste ser removido junto ao gás de topo.

g) Álcalis (K_2O , Na_2O):

Os metais alcalinos são parcialmente volatilizados durante seu processamento no alto forno sendo que a parte não volatilizada é transferida para a escória. Os principais efeitos prejudiciais dos álcalis são:^{63,65}

- Formação de cascões;
- Estrangulamento da carga;
- Modificações no fluxo de gases;
- Ataque do revestimento refratário;
- Aumento das perdas térmicas;
- Modificações nas propriedades das escórias;
- Modificação nas propriedades mecânicas do coque, etc.

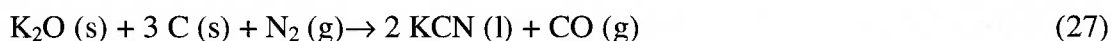
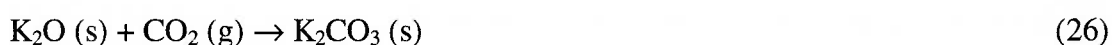
Em alguns casos, o efeito sobre a produtividade e permeabilidade da carga pode ser tão elevado que o alto forno é obrigado a ter sua produção interrompida para a demolição dos cascões gerados.

O potássio também passa por um processo de recirculação no interior do alto forno, entretanto, devido a maior estabilidade termodinâmica do silicato de potássio, a região de recirculação no alto-forno se situa em níveis mais baixos e mais próximos das ventaneiras. Como a escória primária é resultado da ganga do minério, o silicato de potássio tem sua atividade reduzida ao ser incorporado à escória. Entretanto, quando o potássio é carregado na forma de óxido, devem-se esperar problemas mais sérios quanto à formação de cascões e ataque aos refratários.

Tabela VIII – Temperatura mínima de redução dos óxidos e silicatos de zinco, potássio e sódio⁶²

Elemento	Silicato (°C)	Óxido (°C)	Diferença (°C)
Zinco	830	730	-100
Potássio	1310	550	-760
Sódio	1370	710	-660

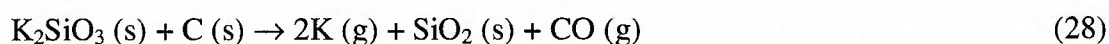
Reações:



Esta reação (27) ocorre em temperaturas baixas, sendo o cianeto de potássio líquido em temperaturas entre 620 a 1625 °C, ou seja, quando quantidades consideráveis de KCN são formadas há uma perda da permeabilidade decorrente da formação de fase líquida entre as partículas de coque.

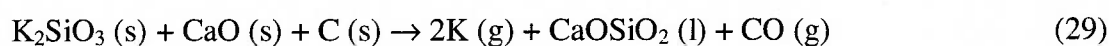
Em decorrência da baixa temperatura nas quais o K_2O são reduzidos e a baixa temperatura de vaporização do potássio é difícil de se remover o K_2O no alto forno como parte da escória formada. O processo de recirculação e acumulação do K_2O pode atingir níveis de 10 a 15 kg/ton causando consideráveis problemas de operação mesmo quando a carga inicial de K_2O seja de 2 a 4 kg/ton de gusa líquido.

A reação de redução do K_2O se inicia quando a temperatura excede 815°C , cálculos termodinâmicos indicam que a redução do silicato de potássio não se inicia antes de a temperatura atingir 1550°C . A equação desta reação é:



A pressão parcial do gás CO para esta reação não excede a pressão parcial do monóxido de carbono dentro do alto forno ($1,02 \text{ kg/cm}^2$) até que a temperatura exceda os 1550°C . Logo, se este álcalis pode ser forçado a reagir com sílica e formar silicato, é possível removê-lo como parte da escória.

Porém, se a concentração de CaO e MgO na escória forem elevadas, pode ocorrer a seguinte reação:



Termodinamicamente, esta reação ocorre em uma temperatura 100°C inferior à da formação do silicato de potássio, conseqüentemente para se remover o máximo de álcalis pela escória, é importante controlar a basicidade * quaternária em níveis mais baixos.

* **Basicidade:** São índices que relacionam as proporções entre óxidos básicos e óxidos ácidos, existindo uma grande quantidade de tipos (basicidade binária, quaternária, ótica, etc.). Notadamente, quando indicamos à basicidade, estamos nos referindo à:

Basicidade binária, onde: $BB = (\% \text{CaO}) / (\% \text{SiO}_2)$;

Basicidade quaternária, onde: $BQ = [(\% \text{CaO}) + (\% \text{MgO})] / [(\% \text{SiO}_2) + (\% \text{Al}_2\text{O}_3)]$.

A figura 14 apresenta o gráfico de correlação entre o efeito da composição química (basicidade quaternária) e do volume de escória na remoção do óxido de potássio do alto-forno.

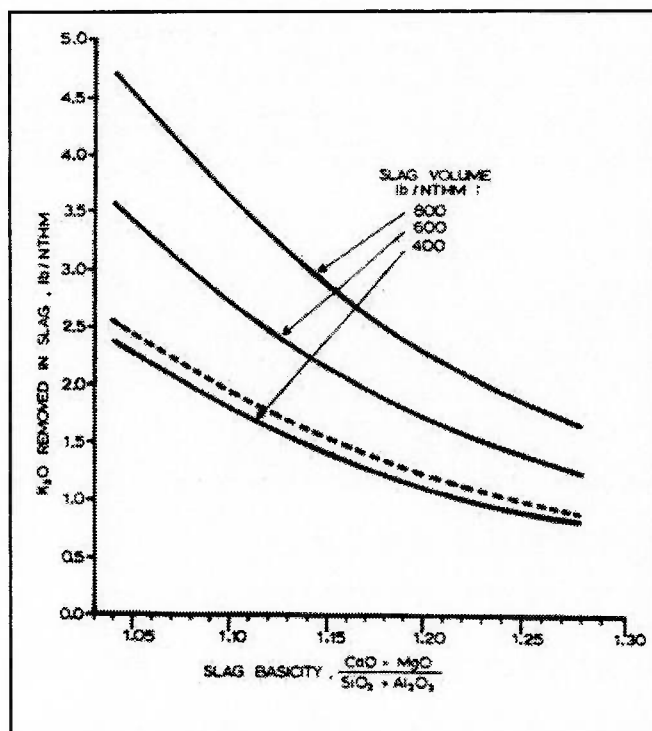


Figura 14 – Efeito da basicidade quaternária e do volume de escória sobre a remoção de K_2O pela escória⁶⁶ (unidade: libra/tonelada métrica de gusa líquido) – (“Slag volume”: volume de escória formada; “slag basicity”: basicidade quaternária da escória; “ K_2O removed in slag”: massa em libras de óxido de potássio removido pela escória)

Outro fator que influencia a remoção dos álcalis é o tamanho das partículas de SiO_2 , a presença dessas partículas abaixo de 10 mm aumenta significativamente a remoção do potássio enquanto partículas de 25 a 50 mm não são efetivas.

Em função da perniciosidade da presença dos álcalis, vários modelos^{67,70} de recirculação destes compostos têm sido propostos, sendo indicado na figura 15 o modelo proposto por CAMPOS-LORIZ et al.⁶⁷ para a recirculação do potássio no interior de um alto-forno.

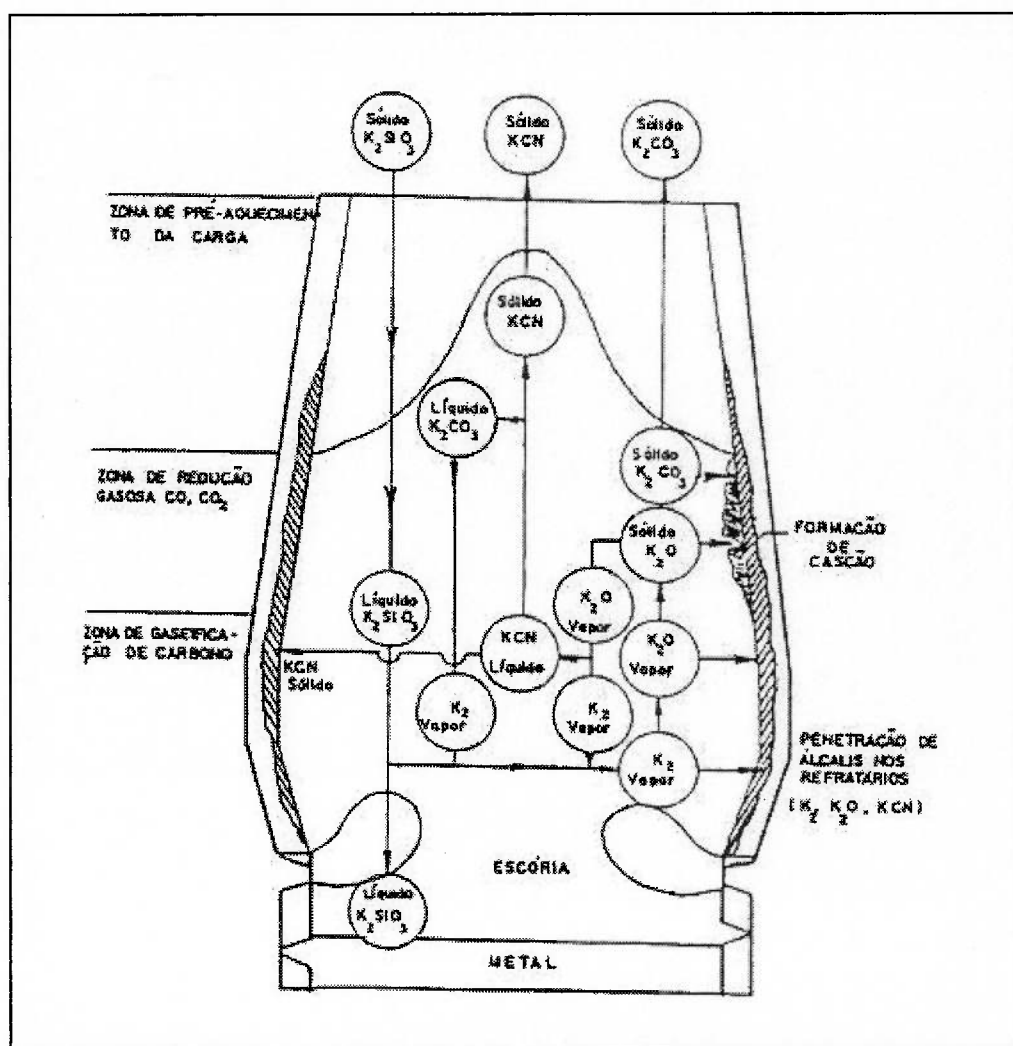


Figura 15 – Modelo de recirculação de álcalis (potássio) em altos-fornos⁶⁷

Os compostos de sódio apresentam reações similares aos compostos de potássio, entretanto, a reação de redução do Na_2O pelo carbono, não ocorre até se atingir uma temperatura de $1020\text{ }^\circ\text{C}$. A temperatura de vaporização do sódio é de $890\text{ }^\circ\text{C}$, conseqüentemente, o sódio também recircula no interior do alto forno porém sendo menos pernicioso para a operação.



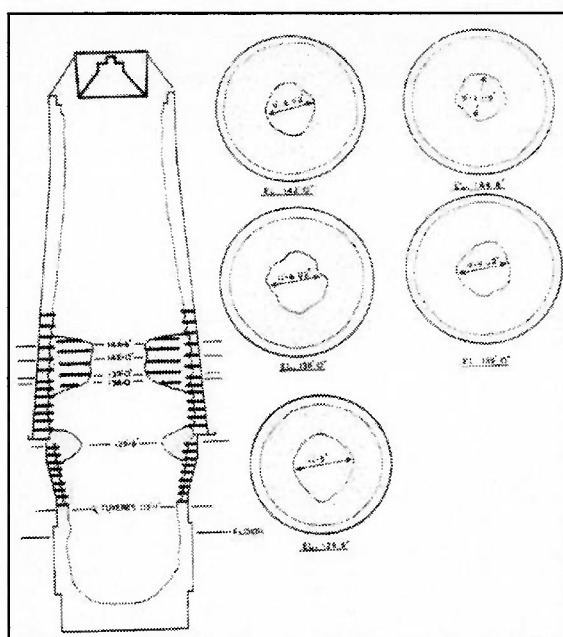


Figura 16 – Perfil de cascões gerados pela presença de álcalis em recirculação em um alto-forno⁶⁶ – (“tuyeres”: ventaneiras)

3.2.2.2 – Sinterizações

A sinterização é um processo de aglomeração de partículas minerais finas transformadas em uma massa porosa, decorrente da formação de fases líquidas, fusão parcial e formação de escória aglomerando as partículas. O aumento da produção das sinterizações foi decorrente da diminuição da disponibilidade de minérios bitolados já no final do século XIX. A energia requerida do processo é decorrente do calor resultante da queima de combustíveis.

Portanto, o sínter é o produto da aglomeração de minérios de ferro e outros aditivos, com a finalidade de ser consumido no alto forno, devendo possuir as seguintes características:

- Alta porosidade;
- Alta redutibilidade;
- Alta resistência à abrasão;
- Elevada resistência mecânica;
- Composição química e distribuição granulométrica controladas;

- Possuir a menor quantidade possível de elementos deletérios (álcalis, fósforo, enxofre, etc.);
- Baixo custo de produção.

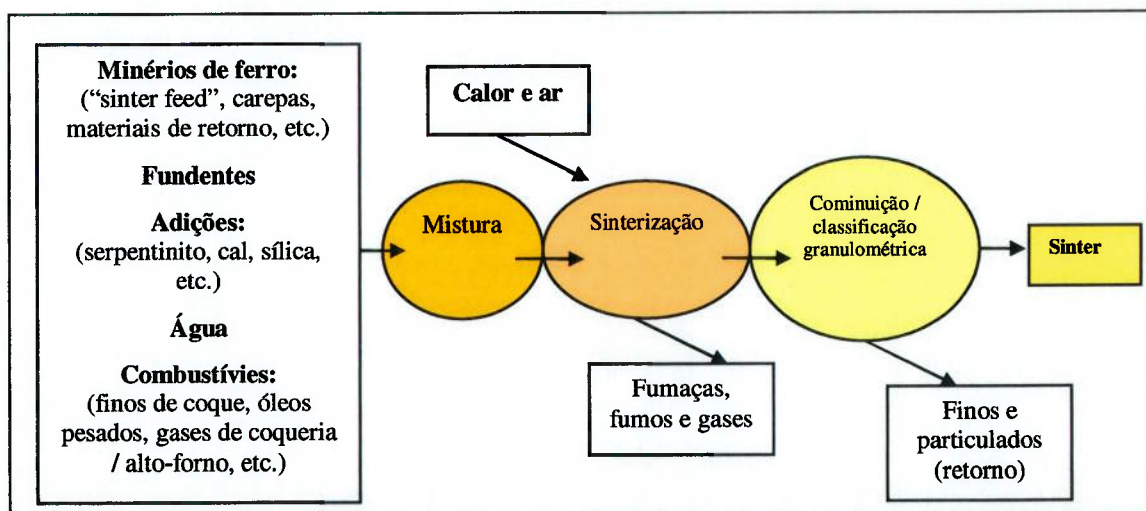
Tabela IX – Composição química típica de sinteres de minério de ferro⁶⁸

Fe total	FeO	SiO ₂	CaO	MgO	MnO	Al ₂ O ₃	P	K ₂ O + Na ₂ O	BB
58,0	6,5	5,70	8,65	1,30	0,65	1,40	0,070	< 1,0 %	1,40 – 1,90
+/- 1,50	+/- 0,5	+/-0,10	+/- 0,10	+/-0,15	+/-0,10	+/-0,20	-	-	-

Tabela X – Composição típica e especificação química do “sinter feed” da COSIPA^{34,37}

	Fe total	SiO ₂	MnO	Al ₂ O ₃	P	H ₂ O	PF
Resultado típico	65,50	3,95	0,52	0,77	0,030	5,68	1,08
Especificação	> 63,50	< 5,50	< 0,50	< 1,0	< 0,044	< 7,5	-
“Blend” – mistura a sinterizar	> 56,00	-	-	-	-	6,0 +/- 0,2	-

BB – Basicidade binária; PF - perda ao fogo.

Figura 17 – Fluxo do processo de sinterização (adaptado de NUNES⁷⁰)

* Fe total: Somatório das espécies que contém ferro (na forma metálica ou oxidada: número de oxidação: 0, +2 e +3).

As sinterizações são unidades destinadas à produção do sinter, sendo hoje uma das principais matérias primas utilizadas como carga metálica dos altos fornos. O sinter é produzido a partir do tratamento térmico de misturas complexas como mostrado pela figura 18, sendo constituído de finos de minérios, cal, calcários, serpentinito*, dunito**, carbono, etc. Suas principais características são:

- Controle da composição química (basicidade, elementos deletérios, teor de ferro, etc.);
- Controle das propriedades mecânicas (resistência à compressão, abrasão, degradação térmica, etc.);
- Redutibilidade;
- Porosidade;

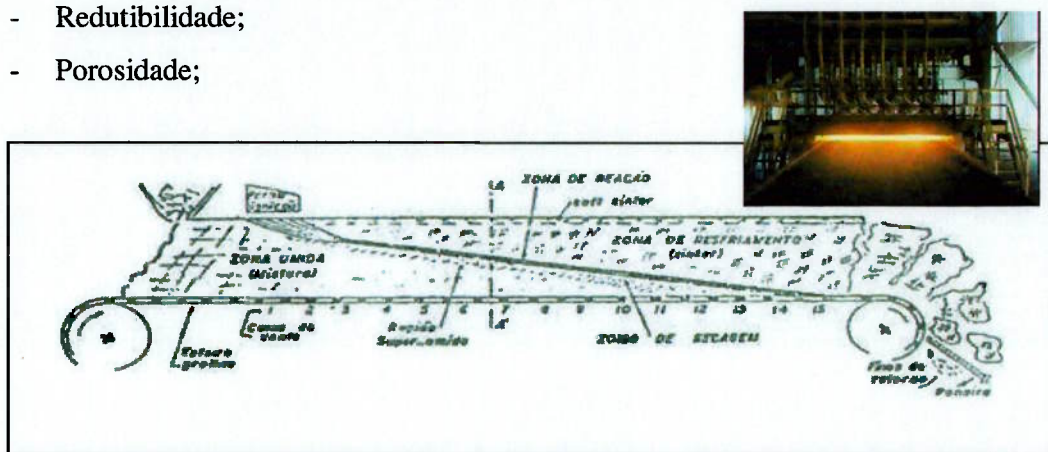


Figura 18 - Diagrama esquemático de uma máquina de sinterização contínua⁶⁹
(acima foto da região de ignição de uma máquina de sinterização)

Do ponto de vista de controle de processo da sinterização, as principais variáveis que afetam a produtividade e as características dos sínteres são:

- Teor de água contido na mistura;
- Teor de cal;
- Basicidade da mistura;
- Temperatura de queima;
- Permeabilidade do leito (granulometria da mistura, em especial a presença de finos, abaixo de 0,150 mm).

* **Serpentinito:** Silicato de magnésio hidratado $[(Mg_3Si_2(OH)_4)_2]$.

** **Dunito:** Silicato de magnésio complexo (forsterita: Mg_2SiO_4 , faialita: $FeSiO_4$ e piroxênio $MgSiO_3$).

O processo de sinterização é determinado por dois fenômenos distintos, porém inteiramente dependentes entre si: A frente de transferência de calor cuja velocidade de propagação é proporcional à vazão de ar e, o fenômeno de combustão do combustível contido na mistura, produzindo calor e que gera uma frente de reação cuja evolução é função da reatividade e da quantidade de combustível, da umidade e da composição da mistura.

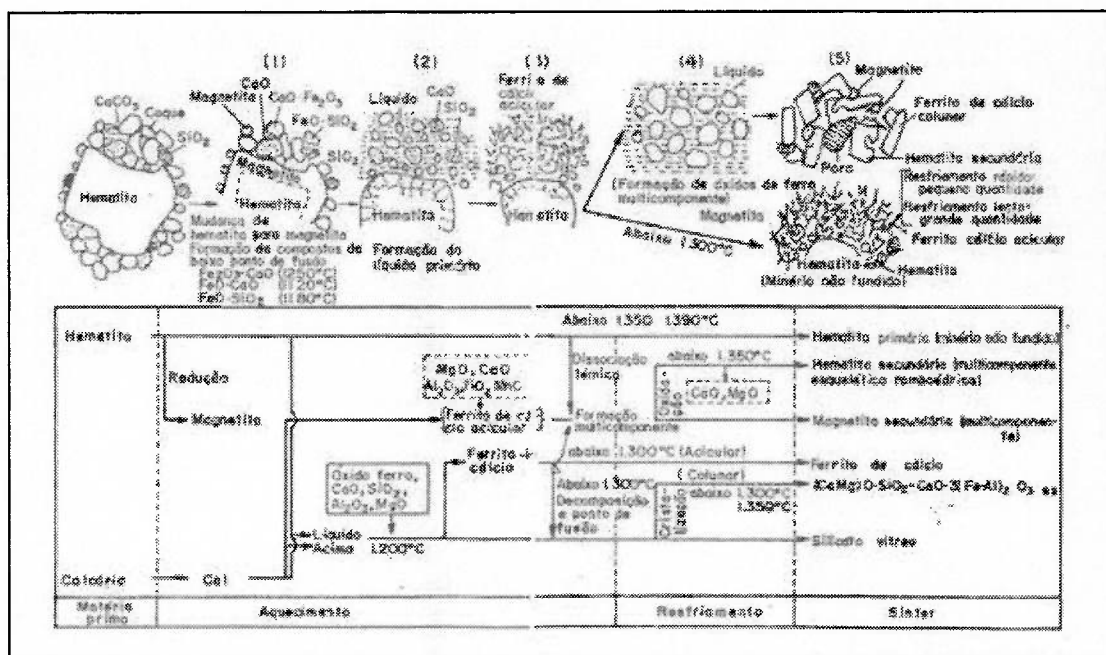
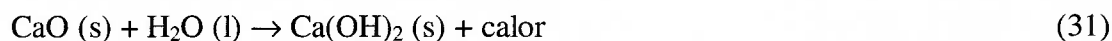


Figura 19– Descrição do processo de sinterização⁶⁴

As principais reações envolvidas no processo de sinterização são:

a) Hidratação da cal (zona úmida)



b) Condensação dos vapores de água

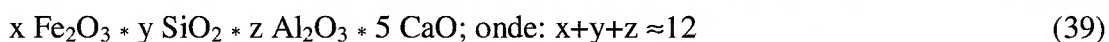


c) Vaporização da umidade (zona de secagem)



d) Desidratação do hidróxido de cálcio**e) Combustão do carvão/coque (a partir de 500 °C)****f) Decomposição dos carbonatos****g) Reações de fase sólida**

Cálcio ferritas: $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$; $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$; $\text{CaO} \cdot 2\text{Fe}_2\text{O}_3$ – a partir de 500 °C em atmosfera oxidante.



Fayalitas: $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ – a partir de 1000 °C em atmosfera redutora

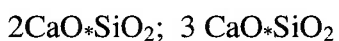
Silicatos: dificilmente se formam na fase sólida.

h) Reações de redução e reoxidação:

Iniciam-se na zona de aquecimento superior e só terminam com o início do processo de resfriamento.

i) Reações de formação de magma/escória:

Os silicatos são os produtos principais destas reações de formação de escória.



Alguns parâmetros de controle de matérias primas como composição química, basicidade, umidade, etc. são muitos importantes nas características e propriedades finais dos sínteres produzidos e da produtividade das máquinas de sinterizações, tais como:

- **Umidade: faixa ótima:** Entre 6-10 %
- **Basicidade:** A basicidade do sinter apresenta grande influência em sua estrutura mineralógica e em seu índice de redução.

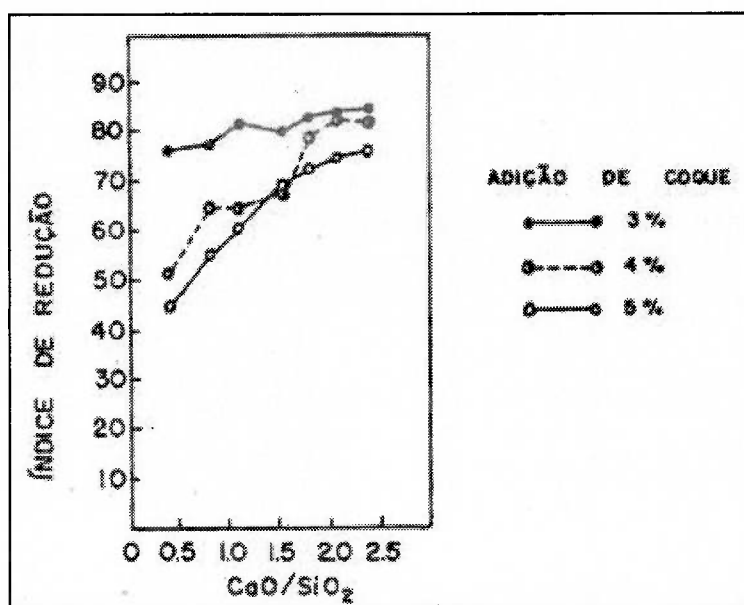


Figura 20 – Relação entre basicidade binária e índice de redução⁶⁴

- **Granulometria:** Proporção em faixas conforme indicado na tabela XI.

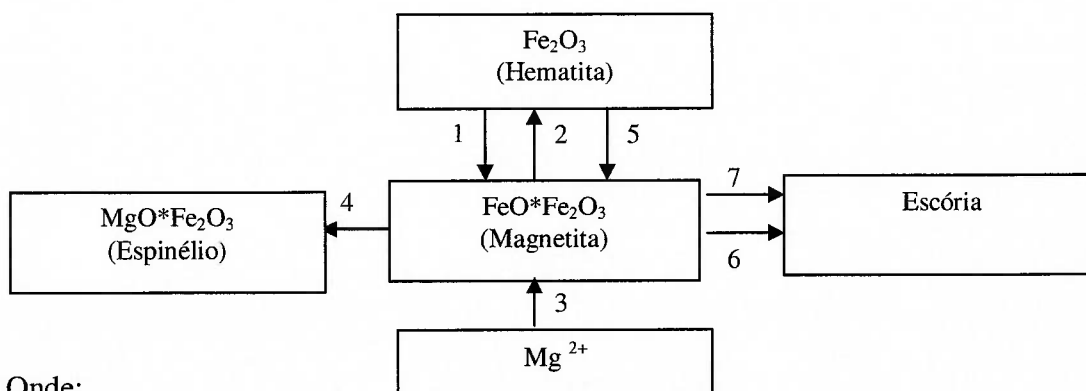
Tabela XI- Granulometria típica de carregamento de matérias primas destinadas a produção de sinter³⁶

	Fração abaixo de 0,10 mm	Fração acima de 10,0 mm	Faixa de trabalho
Carga	Máximo: 10 - 15 %	Máximo: 0 - 10 %	-
Adições e coque	-	-	1,0 a 3,0 mm

- **Teor de alumina (Al₂O₃):** Nas frações finas dos minérios de ferro (frações menores que 1,0 mm) considera-se importante para o índice de redução a relação⁶⁴ Al₂O₃/SiO₂, que deve estar situada na faixa entre 0,30 a 0,35 %.

- **Teor de magnésia (MgO):** A adição de materiais contendo MgO afetam diretamente a mineralogia do sinter tendo grande influência em suas propriedades,

sua presença influencia negativamente a redutibilidade do sinter, decorrente do decréscimo de cálcio-ferritas e hematitas e no aumento de magnetitas (espinélios de magnésio).



Onde:

- 1) Redução da hematita para magnetita;
- 2) Reoxidação parcial da magnetita para hematita;
- 3) Difusão iônica do magnésio (Mg^{2+}) no reticulado de magnetita;
- 4) Formação do espinélio*;
- 5) Dissociação térmica da hematita ($1350\text{ }^{\circ}C$);
- 6) Redução parcial da magnetita em wustita durante a sinterização;
- 7) Liberação iônica de ferro (Fe^{2+}) do reticulado da magnetita e difusão de Mg^{2+} .

Figura 21– Mecanismos de formação de espinélio de magnésio (adaptado de PEREZ⁶⁴)

Porém, quando a fonte de magnésio induz a formação de magnésio-ferrita (adição de olivina**) tem-se, conforme estudo realizado por CURRIER¹¹³ et al., uma melhoria da redutibilidade, das propriedades mecânicas em elevadas temperaturas e da resistência ao ataque por álcalis em aglomerados de minério de ferro.

* **Espinélio:** Compostos do tipo $M'O \cdot M''_2O_3$; onde: (M' é o cátion bivalente e M'' é o cátion trivalente).

** **Olivina:** Solução sólida contínua entre forsterita (Mg_2SiO_4) e faialita (Fe_2SiO_4).

3.2.2.3 – Convertedores (LD/BOF)

Os convertedores LD e os fornos elétricos são atualmente os dois principais reatores de refino primário e de fusão de cargas metálicas, sendo responsáveis por aproximadamente quase 60% da produção mundial de aço⁷¹. Os convertedores servem para o refino e transformação do gusa líquido em aço através do sopro de oxigênio puro e outros gases (argônio, gás natural, nitrogênio, compostos orgânicos, etc. através de lanças e/ou ventaneiras posicionadas no fundo do reator). Neste processo também são adicionadas sucatas metálicas que visam ajustar o balanço térmico e escorificantes (minérios, sínteres, cal, dolomita crua, calcinada, etc.) que auxiliam no processo de formação de escória e remoção de elementos deletérios (fósforo).



Figura 22 – Desenho esquemático de um convertedor LD com sopro combinado⁷²

A produção e o aprimoramento do processamento do aço a partir do gusa líquido em usinas siderúrgicas integradas tem evoluído continuamente desde os primeiros processos de refino primário através de sopro pneumático já em 1856. Atualmente, os dois principais processos de produção se baseiam na rota de refino através de sopro de oxigênio (Processo LD e suas variantes com a injeção de gases) e na rota de fusão / refino da sucata em fornos elétricos. (Usinas não integradas – “Mini Mills”).

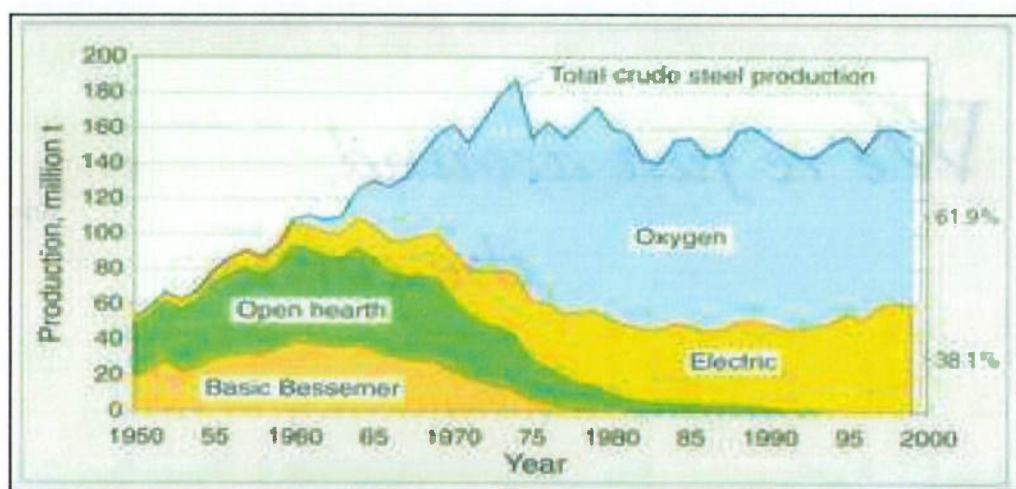


Figura 23 – Evolução da produção mundial de aço - (“total crude steel production”) por tipo de equipamento de fusão/refino⁷¹

A idéia original do processo de sopro de oxigênio foi exposta por Sir HENRY BESSEMER⁸⁹, porém dificuldades em se obter o oxigênio puro em quantidades industriais não permitiram sua utilização prática no século XIX (Somente em 1928 com o processo Linde-Fränk1 o oxigênio passou a ser disponível em larga escala⁹⁰). Em 1939, OTTO LELLEP em Oberhausen; em 1941 CARL VALERIAN SCHWARTZ (Aachem, na Alemanha); em 1947, ROBERT DURRER na Suíça e, em 1949 HERIBERT RANKLER na Áustria, experimentaram a utilização do oxigênio em conversores. Finalmente, em 1952 iniciou-se a operação do primeiro processo industrial (forno de 30 toneladas) de refino primário na cidade de Linz/Áustria através da empresa Vöest-Alpine Industrienlagenbau. Em 1958, GUY SAVARD e ROBERT LEE no Canadá, demonstraram a possibilidade de injetar oxigênio pelo fundo de um banho metálico.

Tabela XII – Evolução do processo de refino do aço^{4,73,89,90}

Processos	Inventores	Ano
Processo Bessemer	Sir HENRY BESSEMER e WILLIAN KELLY	1856- 1857
Open Hearth Furnace ou Processo Siemens	KARL WILHELN SIEMENS	1868

(Continuação)		
Processo Thomas ou processo Thomas-Gilchrist	SYDNEY GILCHRIST THOMAS e PERCY C. GILCHRIST	1879
Forno Elétrico Heroult	PAUL HEROULT	1899
ROTOR	-	-
KALDO	-	-
LD	VÖEST	1952
OBM (Oxygen Boden Maxhütte) ou Q-BOP	Maximilianshüte	1968

Basicamente, existem três maneiras de se injetar gases oxidantes para o refino do aço:

- Sopro por cima (Lança de oxigênio);
- Sopro por baixo (Ventaneiras);
- Combinado (Sopro por cima e por baixo).

Tabela XIII – Comparação entre os vários métodos de sopro^{4,72}

Tipo	Vantagens	Desvantagens
Sopro por cima	<ul style="list-style-type: none"> - Flexibilidade - Rápida formação da escória 	<ul style="list-style-type: none"> - Oxidação excessiva - Reação metal/escória - Homogeneização do banho não é perfeita
Sopro combinado	<ul style="list-style-type: none"> - Pouca super oxidação - Aumento do rendimento metálico - Boa homogeneização do banho - Reações metal/escória favorecidas (melhor aproveitamento de ligas) - Flexibilidade - Melhor remoção do fósforo 	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento do custo operacional (consumo de gases industriais)
Sopro por baixo	<ul style="list-style-type: none"> - Menos ferro na escória - Maior rendimento metálico - Melhor reprodutibilidade do processo - Melhor distribuição de fósforo e enxofre - Possibilidade de se produzir aços de baixo carbono sem a necessidade de super-oxidação do banho - Sopros mais brandos e sem sucata não fundida no final do processo 	<ul style="list-style-type: none"> - Formação mais lenta da escória - Menor possibilidade de carregamento de sucata - Maior desgaste da região do fundo do conversor

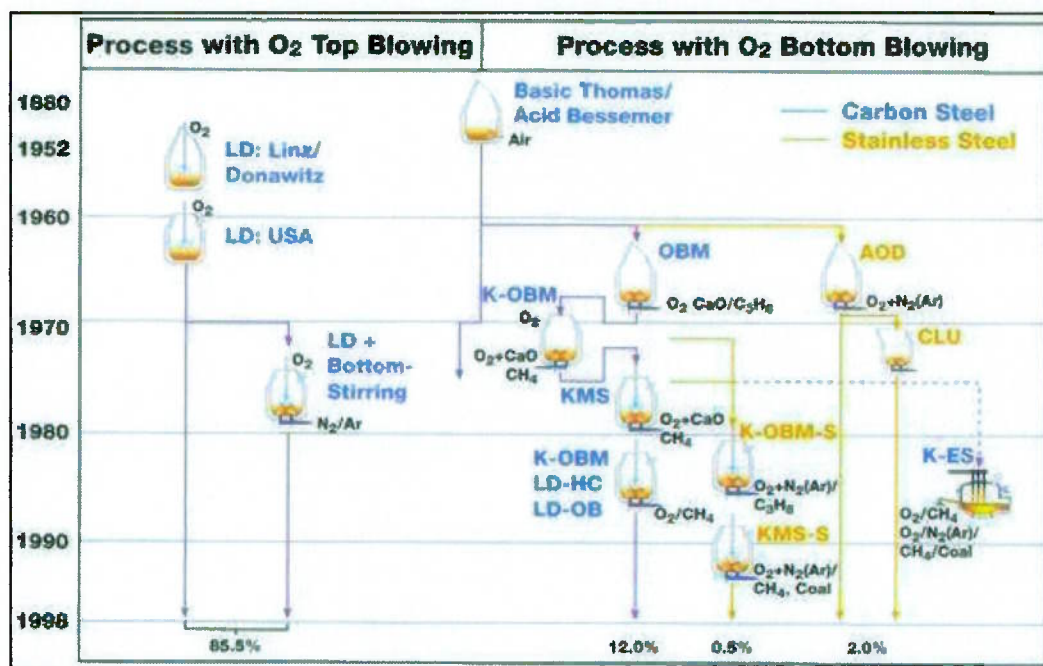


Figura 24 – Evolução, variante e derivações dos processos LD, Thomas e Bessemer⁷⁴
 - (“Process with O₂ top blowing”: Processos com sopro de oxigênio por cima;
 “Process with O₂ bottom blowing”: Processos com injeção de oxigênio por baixo da carga;
 “carbon steel: aço carbono; “stainless steel”: aço inoxidável)

Matérias primas do processo LD e reações de refino primário

O processo LD possui como matérias primas principais, para a elaboração do aço através de reações de oxidação, as seguintes matérias primas:

- Gusa líquido;
- Sucatas de aço e de ferro gusa, HBI, briquetes de resíduos contendo ferro;
- Escorificantes/fundentes (cal, calcário, fluorita, dolomita calcinada, dolomita crua, etc.)
- Refrigerantes (minérios de ferro e de manganês, sínteres de ferro, carepas de aço, etc.);
- Agentes termógenos: ferro silício, carvão de silício, antracito, etc.
- Oxigênio.

Do ponto de vista do processo LD, as principais características das matérias primas adicionadas durante o refino primário são:

- Composição química e controle da basicidade;
- Presença de elementos deletérios: fósforo, enxofre, metais (Cu, Cr, Zn, etc.);
- Reatividade dos escorificantes e fundentes;
- Umidade;
- Aporte termoquímico conhecido e controlado (entalpia);
- Distribuição de tamanho;
- Teor de metálicos.

A característica principal das reações de refino na fabricação do aço pelo processo LD é a oxidação total do silício e parcial do carbono, manganês, fósforo, ferro e outros elementos porventura contidos no gusa, na sucata e também na redução do teor de enxofre. A formação de uma escória básica, além de neutralizar os óxidos ácidos formados, protegendo da corrosão o revestimento refratário, acelera as reações de refino e permite a estabilização do enxofre e do fósforo escorificados.

Os outros elementos contidos na carga de sucata, como elementos de liga (Cr, V, Ti, etc.) ou como impurezas (Pb, Sn) serão ou não oxidados de acordo com sua afinidade pelo oxigênio. Do ponto de vista das propriedades e das características que estes elementos conferem ao aço, estes podem ser classificados como: muito nocivos, nocivos ou menos nocivos. A tabela XIV apresenta um quadro resumo com as principais características destes elementos e como sua presença interfere nas propriedades dos aços.

Tabela XIV – Efeito das impurezas sobre as propriedades dos aços^{73,75,76}

Impurezas	Elementos	Características
Muito Nocivas	Enxofre (S)	É responsável pela formação de inclusões não metálicas (sulfetos de ferro e de manganês) na forma de estrias alongadas. O sulfeto de ferro possui ponto de fusão muito baixo em relação ao aço (O FeS solidifica-se em torno de 1000 °C) de modo que sua presença nos aços afeta os processos de conformação a quente, realizados

(continuação)		normalmente acima de 1000 °C, conferindo ao aço a chamada “fragilidade à quente”. Nestas condições é necessária a presença do manganês, pois o enxofre tem maior afinidade por este elemento e o sulfeto de manganês formado possui ponto de fusão em torno de 1600 °C.
	Cobre (Cu) e Níquel (Ni)	São metais nobres, que não podem ser oxidados durante a etapa de refino primário.
Nocivas	Fósforo (P)	Deve estar limitado a teores entre 0,025 – 0,40 % no máximo, pois sua presença pode formar um eutético fosforoso que funde a temperatura de 1000 °C, podendo ocasionar a ruptura ou o esboroamento do aço se este for deformado a quente. O fósforo também causa a “fragilização a frio”, decorrente de sua dissolução na ferrita endurecendo-na e aumentando seu tamanho. * Em alguns casos o fósforo e mesmo o enxofre são benéficos ao aço, pois aumentam a resistência a tração, corrosão e a usinagem, principalmente nos aços de baixo teor de carbono.
	Zinco (Zn)	Exige cuidados especiais, pois em quantidade elevadas causa problemas de desvio de composição e seus voláteis podem interromper ou obstruir os sistemas de limpeza de gases e a transferência de calor do sistema de resfriamento, além de suas poeiras serem consideradas resíduos perigosos.
Menos nocivas	Chumbo (Pb) Arsênio (As) Antimônio (Sb) Cádmio (Cd) Mercúrio (Hg)	Apesar de serem elementos nobres, nas condições de elaboração do aço são eliminados na forma gasosa. Porém são elementos de grande toxicidade.
	Alumínio (Al)	Quando na forma metálica, o alumínio se fragmenta na forma de partículas diminutas com menor prejuízo ao aço, porém quando na forma de inclusões não metálicas de alumina, pode ser extremamente prejudicial às etapas de conformação mecânica em especial nos aços trefilados de menor espessura (“steel cord”) e chapas finas.
	Manganês (Mn)	O manganês que não se combina com o oxigênio ou com o enxofre, pode atuar de duas maneiras: Quando o teor de carbono é baixo, o manganês se dissolve na ferrita, aumentando a dureza e a resistência mecânica. Com um teor de carbono mais elevado, admite-se que se forme Mn_3C que se associa com Fe_3C , aumentando ainda mais a resistência do aço. Normalmente o manganês é especificado em teores de 0,23 a 0,9 %.
	Silício (Si)	O silício, responsável pela formação dos silicatos, varia nos aços comuns de 0,05 a 0,3%. Dissolve-se na ferrita do mesmo modo que o fósforo, sem, contudo, afetar apreciavelmente a ductilidade, embora aumente ligeiramente sua dureza e sua resistência mecânica.
	Outros	Titânio (Ti), Zircônio (Zr), Nióbio (Nb), Cromo (Cr), Molibdênio (Mo), Vanádio (V), Tungstênio (W), Oxigênio (O), Hidrogênio (H), Nitrogênio (N).

Reações do processo de refino

O oxigênio necessário às reações de refino no processo LD é fornecido na forma gasosa, pelo jato de oxigênio da lança, contribuindo também o oxigênio contido nas adições de minérios e carepas, porém em menor escala. As reações de refino acontecem apenas entre o oxigênio gasoso e o metal líquido; ao contrário a escória que vai sendo formada principalmente pelos óxidos dos escorificantes e fundentes adicionados desempenha um papel muito importante nas reações de refino primário.

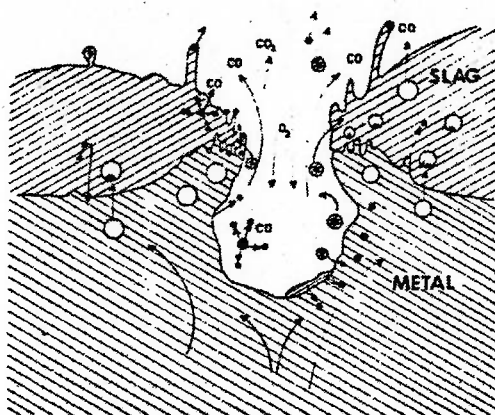


Figura 25 – Representação esquemática dos mecanismos de reação decorrente do impacto do jato de oxigênio⁷⁷

A evolução da composição química, da temperatura do banho metálico e da composição química da escória durante o sopro de oxigênio são mostrados na figura 26. Pode-se caracterizar a evolução do sopro pela existência de três períodos distintos⁴⁵ de acordo com a variação da velocidade de descarburização*. Praticamente todas as reações que ocorrem no processo LD são exotérmicas, isto é, liberam energia na forma de calor, principalmente as reações de oxidação do silício e do manganês, ocorrendo uma elevação acentuada da temperatura no decorrer do processo.

* Os termos: descarburização, dessulfuração, desgaseificação e desoxidação seguem referência ao Dicionário da Língua Portuguesa de AURÉLIO B. de H. FERREIRA¹⁵⁷ (5ª impressão de 2003). Já os termos desaeração, desfosforação e desnitrificação seguem referência ao Dicionário Metalúrgico de JAMES L. TAYLOR¹⁵⁸ (8ª Impressão de 1994).

Terminada a oxidação do silício, o aumento da temperatura e a formação de uma emulsão metal-gás-escória criam condições em que a única reação importante é a descarburização, cuja velocidade atinge valores limitados pelo teor de oxigênio disponível. Neste período os óxidos de ferro e de manganês da escória são reduzidos, revertendo esses elementos para o banho metálico, dando origem a um aumento do teor de manganês em solução. Este segundo período do sopro prossegue até o valor do teor de carbono atingir um nível a partir do qual a velocidade de descarburização passa a ser controlada não pela disponibilidade do oxigênio, mas pela difusão do carbono até a interface de reação.

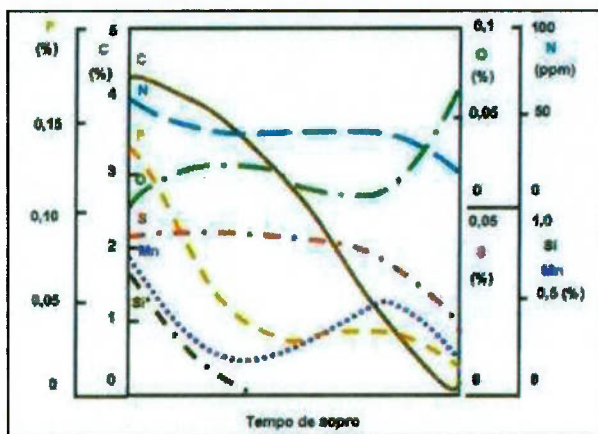


Figura 26 – Evolução das reações de refino primário no processo LD⁷²

A terceira etapa é caracterizada pela velocidade de descarburização decrescente e por um aumento gradativo da oxidação do manganês e do ferro, à medida que o teor de carbono diminui. Nesta fase a dissolução da cal é acelerada e a basicidade da escória aumenta acentuadamente.

A desfosforação é iniciada na primeira etapa, quando as condições de baixa temperatura e elevado teor de FeO na escória favorecem a reação de oxidação do fósforo. Na segunda etapa, a diminuição do teor de FeO da escória e o aumento da temperatura fazem com que a reação de desfosforação seja interrompida, ou mesmo invertida, neste caso com aumento do teor de fósforo dissolvido no metal. No período final o aumento da dissolução da cal e o aumento da oxidação da escória fazem com que a desfosforação prossiga atingindo taxas elevadas no final do sopro.

A evolução da dessulfuração está intimamente ligada à evolução da dissolução da cal. De maneira geral ela apenas se processa de maneira efetiva na etapa final do sopro, quando a basicidade da escória se eleva, apesar de não atingir valores superiores a 50%. Deve-se ainda notar que a dessulfuração na fase gasosa é responsável pela eliminação de cerca de 8% do enxofre carregado.

A variação do teor de nitrogênio do metal é resultado das reações de desnitrificação do banho pela ação da reação de descarburização e oxidação dos nitretos, além da nitrogenação decorrente do teor de nitrogênio injetado com o oxigênio. O balanço destas reações acarreta normalmente uma diminuição do teor de nitrogênio dissolvido no aço, no início e no final do sopro, podendo se elevar consideravelmente caso ocorra uma diminuição muito acentuada do carbono.

A temperatura do banho se eleva quase uniformemente durante o sopro, devendo-se, entretanto notar que mesmo com condições operacionais normais, seu valor nas etapas iniciais apresenta uma dispersão bastante acentuada, devido às naturais oscilações e variabilidades das condições de carregamento do gusa e da dissolução da sucata. Na parte final do sopro, esta dispersão diminui acentuadamente.

Tabela XV – Principais reações durante o refino primário do aço^{77,91}

Fenômenos	Reação Química
Oxidação do carbono: Descarburização	$O_2 (g) \rightarrow 2\underline{O}$ $2\underline{C} + O_2 (g) \rightarrow 2 CO (g)$ $\underline{O} + \underline{C} \rightarrow CO (g)$
Oxidação do Silício	$\underline{Si} + 2 \{FeO\} \rightarrow \{SiO_2\} + 2 Fe$
Oxidação do Manganês Reversão do manganês	$\underline{Mn} + \{FeO\} \rightarrow \{MnO_2\} + Fe$ $\{MnO\} + \underline{C} \rightarrow \underline{Mn} + CO (g)$
Oxidação do Titânio	$\underline{Ti} + 2 FeO \rightarrow \{TiO_2\} + 2Fe$
Oxidação do Ferro	$2 Fe + O_2 (g) \rightarrow 2 \{FeO\}$
Remoção do Fósforo	$2 \underline{P} + 5\{FeO\} \rightarrow 5\{P_2O_5\} + 5 Fe$ $\{FeO\} + P_2O_5 \rightarrow FeO*P_2O_5$ $\{FeO*P_2O_5\} + CaO (s) \rightarrow \{CaO*P_2O_5\} + \{FeO\}$
Remoção do Enxofre	$\underline{S} + \{O^{2-}\} \rightarrow \underline{O} + \{S^{2-}\}$ $\underline{S} + \{CaO\} \rightarrow \{CaS\} + \underline{O}$

Observações:

Os elementos sublinhados indicam que estão em solução com o ferro: X;

Os compostos indicados entre colchetes, indicam que estão na fase escória: {X}.

A natureza e a fonte de fumos e de materiais particulados

No processo de refino através de sopro de oxigênio, vários tipos de particulados são emitidos, sendo necessário a sua captação e tratamento; pois geram poluição atmosférica e também representam perdas no rendimento metálico do processo.

O maior constituinte dos particulados gerados é o ferro, em um estado de oxidação que depende da história térmica, do potencial oxidante da atmosfera circundante e do conteúdo de carbono presente no metal líquido, além do tipo de matérias primas e de finos adicionados como: cal, dolomita calcinada, minérios, etc. A tabela XVI apresenta as composições típicas dos particulados emitidos pelos vários tipos e processos de refino primário de produção do aço.

Tabela XVI – Composição típica dos resíduos captados pelos sistemas de despoiramento dos processos de refino primário do aço⁷⁷

Processo		Fe ₂ O ₃	FeO	Fe ⁰	Fe total	MnO	SiO ₂	CaO MgO	P ₂ O ₅
Besse- mer	30-40 % de enriquecimento	85	-	-	47-52	4-11	2	10,2	0,5-6
Open Hearth	-	30-60	0,1	-	51-60	1-5	0,6	5,1	0,1-2,3
BOF LD	Combustão completa	83-86	4	0,6	50-67	6	0,7-3	2- 15,5	0,3-1
	Combustão incompleta	1-7	25-67	7,5- 60	72-76	-	1,2	-	0,3
LD-AC / OLP		56	27	3,8	50-65	-	0,4- 0,6	6-15	1,6-4
Rotor		86,4	10,5	-	69	-	0,6	1	1,5
EAF	Operação normal	18-60	10-51	-	30-50	1,5-12	0,2- 14	4-38	-
	Durante injeção de oxigênio	45-48	13-23	-	40-60	1,7- 6,5	0,1- 7,5	4,3- 8,3	-

O mecanismo de formação de poeiras geradas nos processos de fabricação do aço é causado essencialmente pela ejeção de partículas de metal líquido ocasionado pela reação entre o oxigênio com o carbono na superfície do banho metálico. Durante a etapa de descarbonização entre o oxigênio e o carbono

dissolvido dentro de gotículas ocorre uma explosão da mesma gerando partículas ainda mais finas.

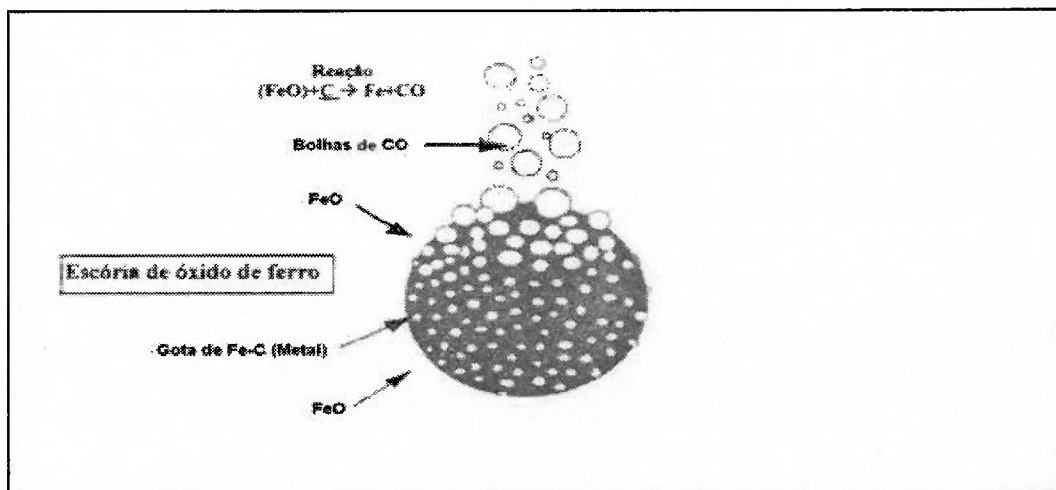


Figura 27 – Esquema do mecanismo de formação da emulsão: metal-escória-gases decorrente das etapas de refino primário do aço durante a descarbonização (Adaptado de LIMA⁷⁸)

Estudos realizados por NEDER⁸², confirmaram a predominância do mecanismo de ejeção de partículas metálicas, mas indicou também outros 3 mecanismos atuantes como: ejeção de escória, captura de material de carregamento e evaporação, estes 3 mecanismos representando aproximadamente por 40% do mecanismo total da formação de poeira no processo LD. Uma extensa caracterização das poeiras/fumos e do material particulado proveniente de processos de aciaria (LD, LD-AC, Arco, KALDO, ROTOR, etc.) é descrita por HOPKINS et al.⁸³

Em estudo realizado por L.M. WU⁸⁴, sobre a caracterização de poeiras de aciaria LD, enfocando seu comportamento em meio aquoso e a influência do pH sobre a solubilização/lixiviação dos metais contidos, confirma a menor toxidez dos resíduos de aciaria LD, onde quase todos os dados analisados atenderam aos padrões da recomendação 92-4 da Comissão de Paris para descargas industriais.

Tabela XVII – Solubilidade de poeiras de BOP (BOF/LD) para vários níveis de pH⁸⁴

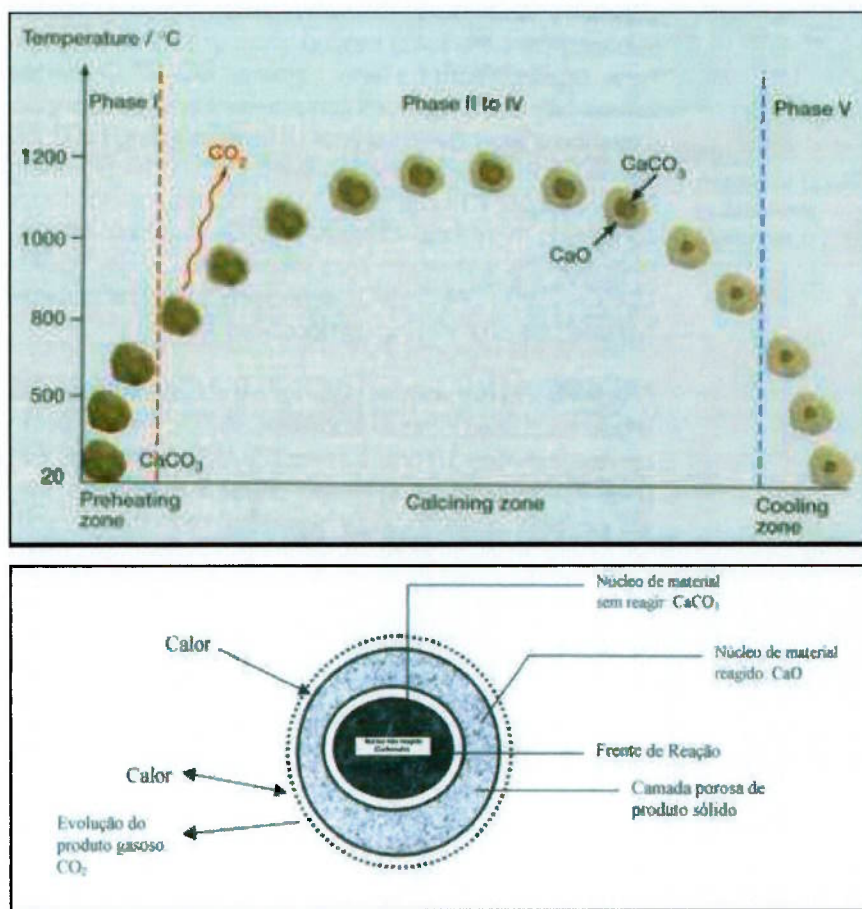
Elementos	Concentração ($\mu\text{g L}^{-1}$)							Comissão de Paris 92/4
	11,78	10,93	10,15	9,43	7,61	7,14	4,53	
pH								
Cádmio (Cd)	< 0,05	< 10,0	< 10,0	< 10,0	0,21	< 10,0	< 10,0	< 200,0
Chumbo (Pb)	3,9	< 100	< 100	< 100	1,44	< 100	< 100	< 500,0
Cromo (Cr)	5,65	< 20,0	< 20,0	< 20,0	< 8,25	< 20,0	< 20,0	< 500,0
Arsênio (As)	< 1,0	< 70,0	< 70,0	< 70,0	< 70,0	< 70,0	< 70,0	ND
Cobre (Cu)	6,0	< 10,0	13,1	20,0	11,8	19,9	<10,0	< 500,0
Níquel (Ni)	4,05	< 40,0	< 40,0	< 40,0	< 40,0	< 40,0	193	< 500,0
Zinco (Zn)	10,2	< 10,0	< 10,0	< 10,0	3,78	11,6	817	< 500,0
Mercúrio (Hg)	< 0,20	-	-	-	< 0,05	-	-	< 50,0

ND – Não disponível.

3.2.2.4 - Calcinções

As unidades de calcinação têm a finalidade básica de prover a aciaria e a sinterização de cales (calcítica, magnesianas e/ou dolomítica) e dolomita calcinada, insumos estes fundamentais nos processos de produção do sinter e das operações de refino primário dos aços, mas também, indispensáveis em várias outras operações metalúrgicas, como a dessulfuração do gusa líquido e a metalurgia secundária.

Normalmente, o processo de calcinação se dá através do aquecimento de carbonatos, decompostos em seus respectivos óxidos. O esquema da reação deste processo pode ser observado na figura 28, que representa o processo de calcinação em um forno tipo “shaft kiln”. Já a figura 29 apresenta o diagrama de um forno rotativo de calcinação; porém, fornos verticais, fornos de leito fluidizado, fornos de calcinação tipo “flash” e até fornos mais primitivos podem ser empregados na produção das cales¹¹⁴. Na maioria dos casos, as grandes siderúrgicas possuem unidades cativas de calcinações, podendo adquirir parte destes insumos externamente de acordo com suas necessidades de produção.



Onde: Reação: $\text{CaCO}_3 (\text{s}) + \text{calor} \rightarrow \text{CaO} (\text{s}) + \text{CO}_2 (\text{g})$ (40)

- Transmissão de calor da fase gasosa homogênea até o sólido reagindo através da camada limite;
- Transmissão de calor até a frente da reação através da camada de produto sólido formada;
- Decomposição do carbonato na interface carbonato / óxido (frente de reação);
- Difusão do produto gasoso através da camada de produto sólido;
- Difusão do produto gasoso através da camada limite de gás.

Figura 28 – Processo de calcinação de carbonatos em um forno tipo “shaft kiln” com suas 5 fases (I- pré-aquecimento, II a IV – calcinação e V- resfriamento) e descrição do modelo topoquímico para a decomposição de uma partícula densa de geometria esférica de um carbonato de cálcio^{79,114} – (“Preheating zone”: zona de pré-aquecimento; “calcining zone”: zona de calcinação; “cooling zone”: zona de resfriamento)

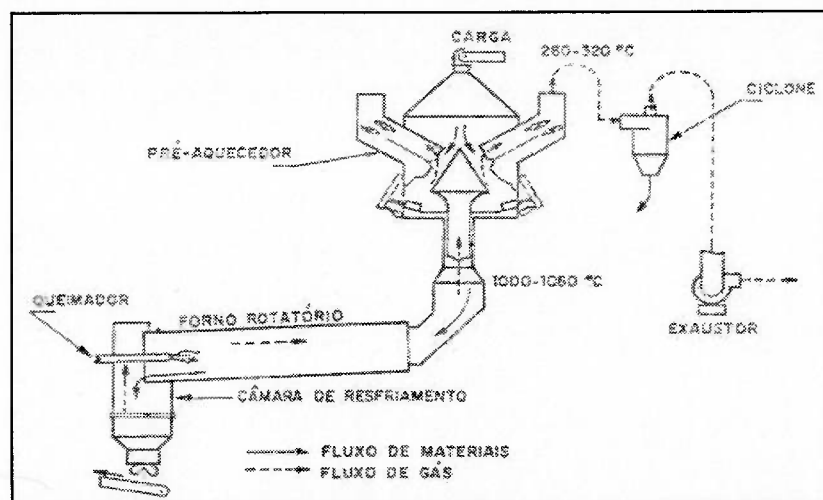


Figura 29 – Diagrama esquemático de um forno de calcinação rotativo⁹³

As principais questões, do ponto de vista ambiental, dos processos de calcinação são:

- Consumo de combustíveis;
- Geração de material particulado;
- Manuseio e consumo de matérias primas naturais;
- Geração de gases de efeito estufa (CO₂);
- Geração de resíduos líquidos/lamas (lavagem das matérias primas, poeiras fugitivas, tratamento de efluentes, etc.);
- Elevação do pH do solo e da água, decorrente da lixiviação dos carbonatos, óxidos e formação de hidróxidos (hidróxido de cálcio e/ou magnésio);
- Geração de resíduos sólidos, proveniente da captação de material particulado pelos sistemas de controle ambiental (filtros e precipitadores eletrostáticos).

O calcário, consumido no processo metalúrgico pode ser classificado como: calcítico, dolomítico, magnesiano ou aragonítico (este último sendo relativamente raro); possuindo como principais impurezas a sílica, a alumina e a hematita. O controle do nível de impurezas é de extrema importância na garantia de cales de elevada qualidade (elevado teor de CaO, baixo nível de sílica, elevada reatividade química, resistência mecânica e uniformidade granulométrica, etc.).

3.2.2.5 – Fornos elétricos

A primeira notícia sobre a utilização da energia elétrica na fabricação de aço é de 1878, quando WILHELM VON SIEMENS patenteou o processo constituído de um forno a arco indireto contendo dois eletrodos dispostos horizontalmente através da parede de um cadinho. As primeiras patentes de fornos que teriam um futuro industrial se deveram a EMÍLIO STASSANO (em 1898), PAUL L. TOUSSAINT HÉROULT (em 1888) e KJELLIN (em 1900). Sendo que no Brasil em 1902 AUGUSTO B. da SILVA foi o primeiro a protocolar um pedido de patente industrial (Patente 3541) intitulada: “Memorial descritivo para processo de fabricação de ferro gusa, aço, ferro e suas ligas e forno elétrico para este fim”. Já em 1909 surgiu o primeiro forno elétrico trifásico⁸⁵.

A partir da década de 1980, várias implementações tecnológicas têm possibilitado a elevação da competitividade da produção dos aços via aciaria elétrica, estas evoluções podem ser observadas na figura 30.

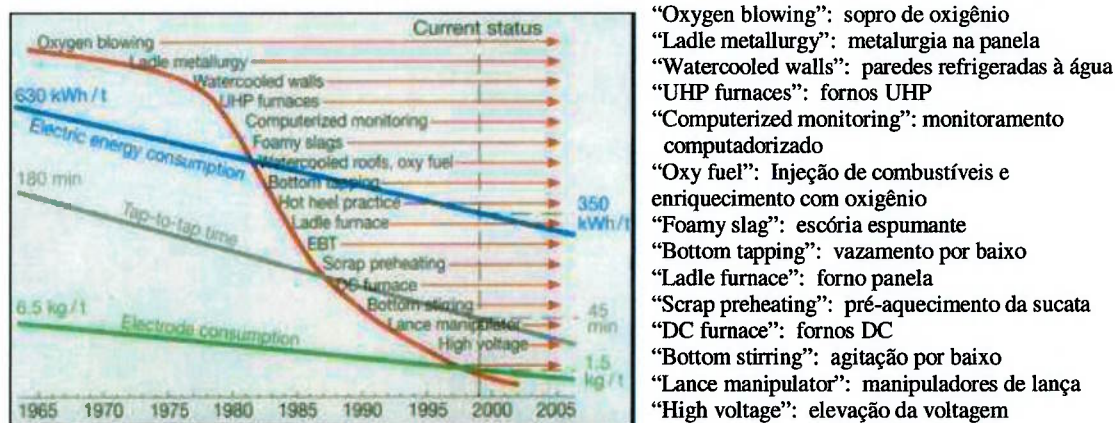


Figura 30 – Avanços na tecnologia de produção de aços em fornos elétricos⁷¹, com diminuição do consumo de energia, de eletrodos e do “tap-to-tap” – período de 1965 a 2000

As reações que se processam no forno elétrico são basicamente as mesmas do processo LD, exceto pelas reações de descarburização. Nos fornos elétricos, a fusão se dá pela passagem da corrente elétrica pela carga metálica.

Porém, o processo de produção de aço em fornos elétricos difere do processo LD em dois fatores: tipo de carga metálica e fonte de calor. Enquanto o processo LD utiliza gusa líquido, uma pequena proporção de carga sólida (em torno de 15%) e o de aquecimento se dá através de reações químicas. Já o processo em forno elétrico utiliza-se principalmente carga metálica sólida e o aquecimento se dá pela ação do arco elétrico.

O aumento significativo em relação à produção de aço pela rota em forno elétrico está associado a vários fatores cada um dos quais são mais ou menos limitantes e são decorrentes das próprias estruturas de consumo da sociedade: geração, disponibilidade e preço das sucatas ferrosas, desenvolvimento de novas fontes de cargas metálicas: DRI e HBI, matriz energética: disponibilidade e preço da energia elétrica, avanços tecnológicos do processo e a utilização do forno elétrico como um reator químico combinado: fusão de carga metálica e operações de refino.

Tabela XVIII – Produção mundial de aço: FEA (Forno elétrico a arco) versus processo LD e suas variantes¹²

Ano	LD	FEA	Total	%LD	% FEA
1976	544	125	669	81	19
1989	600	186	786	76	24
1990	580	190	770	75	25
1991	537	200	737	73	27
1992	503	220	723	69	31
1994	500	240	740	67	33
1998	519	255	774	67	33
2000	505	315	820	61	39
2005 (previsão)	527	391	919	57	43

Do ponto de vista de equipamentos, os fornos elétricos podem ser divididos em duas classes:

- Fornos elétricos a arco com alimentação em corrente contínua: EAF-DC
- Fornos elétricos a arco com alimentação em corrente alternada: EAF-AC

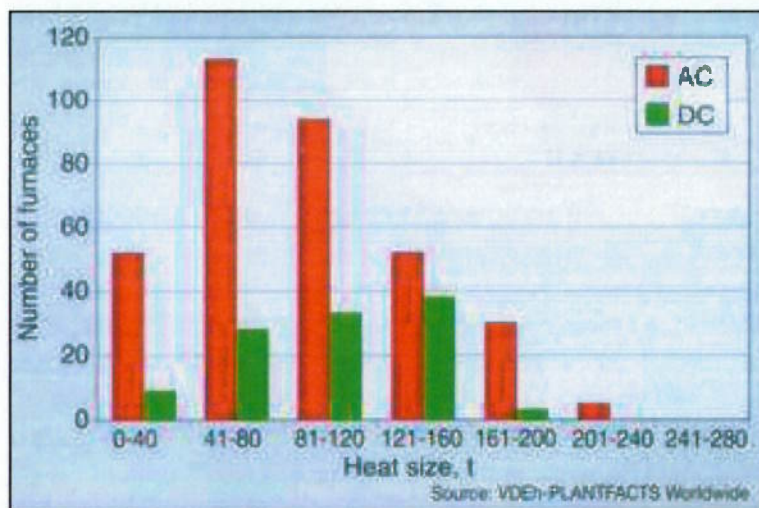


Figura 31 - Capacidade mundial comissionada de fornos elétricos (EAF: AC e DC) no período de 1988 a 1998⁷¹ – (“Number of furnaces”: número de fornos; “Heat size”: capacidade)

Atualmente, várias adaptações em “lay-out”, modificações nos processos e desenvolvimento de novas tecnologias têm possibilitado a produção de aço utilizando-se como carga metálica: sucatas, sucatas e pré-reduzidos (HBI/DRI) ou ambas com gusa líquido, como nos processos DRI/HBI-HM-EAF ou CONARC[®].

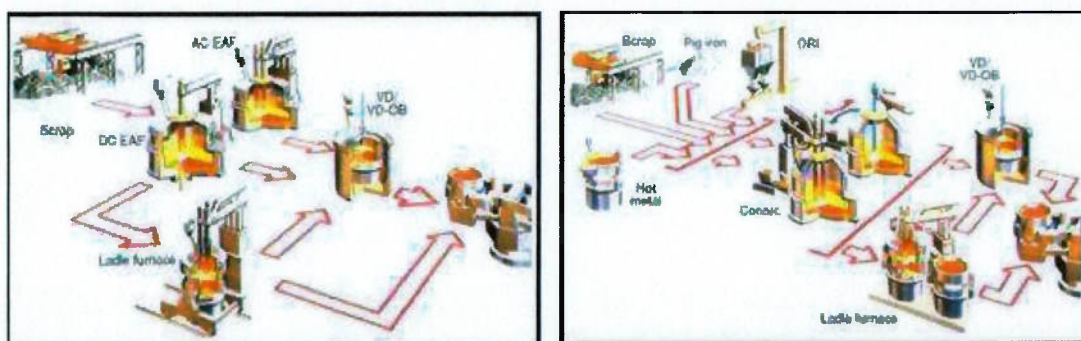


Figura 32 – Algumas rotas de produção de aço via fornos elétricos, em função do tipo de carga metálica utilizada⁸⁰

Resíduos siderúrgicos do processamento do aço em fornos elétricos

Os resíduos gerados durante o processamento do aço em fornos elétricos são mais perigosos e nocivos para o meio ambiente, quando comparados com os resíduos gerados no processo de refino LD. Esta diferença se dá pela maior presença de metais pesados (cádmio e cromo*), contaminantes inorgânicos e orgânicos (tintas, vernizes, plásticos, borrachas, óleos, outros metais como o zinco e óxidos diversos).

Tabela XIX – Composição química de algumas poeiras captadas em sistemas de despeiramento de fornos elétricos e do processo BOP (BOF/LD)^{81,82}

Elementos (%)	Pós de aciaria elétrica (aço carbono)	Pós de aciaria elétrica (aço inoxidável)	Pós de BOP (BOF/LD) SSAB Tunplânt
Zinco	11,12 – 26,9	1,77 – 6,22	0,197
Chumbo	1,09 – 3,81	0,23 – 0,78	0,099
Cádmio	0,03 – 0,15	0,006 – 1,79	-
Cromo	0,06 – 0,58	2,01 – 10,1	-
Níquel	0,01 – 0,12	0,15 – 3,34	0,167
Molibdênio	< 0,02 – 0,08	0,37 – 1,46	-
Manganês	2,46 – 4,60	2,36 – 4,59	0,575
Magnésio	0,77 – 2,93	1,70 – 4,74	1,66
Cobre	0,06 – 2,32	0,09 – 1,26	-
Cálcio	1,85 – 10,0	1,76 – 6,93	8,54
Silício	1,35 – 2,49	1,36 – 4,83	-
Cloro	0,51 – 2,36	0,47 – 1,17	-
Flúor	0,01 – 0,88	1,36 – 4,83	-
Potássio	0,06 – 1,12	0,80 – 5,07	0,228
Sódio	0,29 – 2,31	0,47 – 4,60	0,155
Ferro total	24,9 - 46,9	22,2 – 35,9	55,7

* **Cromo:** O cromo é um elemento essencial à vida humana; porém de acordo com o tipo de exposição: tempo, forma química, tipo de transporte (inalação, ingestão, absorção cutânea); alguns compostos de cromo podem ser classificados como tóxicos: toxidades crônicas, agudas ou carcinogênicas. Estudos demonstraram conclusivamente que a forma hexavalente do cromo é responsável por induzir quaisquer um dos estados descritos, o mesmo não ocorrendo com o cromo trivalente.¹¹⁵

A presença de metais pesados deve ser um dos pontos mais relevantes quando do monitoramento ambiental destes materiais, uma vez que a possibilidade de contaminação de lençóis freáticos ou da água superficial pode causar graves problemas aos seres vivos¹⁵⁹, decorrente dos problemas de bioconcentração* e bioacumulação** destes metais nas cadeias tróficas.***

Outro grave problema dos resíduos gerados principalmente nos processos metalúrgicos, em especial: sinterização de minérios e calcinação, mas também na aciaria elétrica é a produção de VOC's (Compostos orgânicos voláteis) tais como as dioxinas⁹². As dioxinas ganharam notoriedade pública após o grave acidente ocorrido em Seveso/Itália, quando 2,5 kg de 2,3,7,8-tetracloro-dibenzo(p)-dioxina; escaparam para o meio ambiente. A partir daí, o nome dioxina passou a ser sinônimo de veneno. Porém apenas 17 compostos da família das dioxinas e dos furanos (PCDD e PCFF composta por 210 compostos com semelhante base molecular), os que possuem átomos de cloro nas posições 2,3,7 e 8 apresentam maior toxicidade.

Estudos recentes^{86,87,88,92} têm sido conduzidos para quantificar a geração destas substâncias e relacionar o tipo de sucata às condições de operação dos fornos elétricos e a formação e destruição destes compostos.

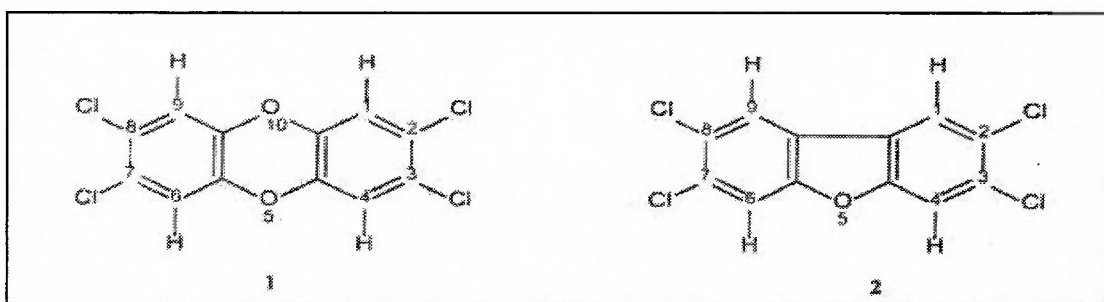


Figura 33 – Estrutura química de uma dioxina (1): 2,3,7,8- tetraclorodibenzo-(p)-dioxina e de um furano (2): 2,3,7,8 – tetracloro-dibenzo-furano⁸⁸

* **Bioconcentração:** Absorção direta de um componente químico no organismo.

** **Bioacumulação:** Acumulação de espécie química, por exposição direta à água ou a alimento contaminado.

*** **Cadeias tróficas:** Seqüência de inter-relações alimentares entre os seres vivos, iniciando pelos organismos mais simples até os seres mais complexos.

3.2.2.6 – Lingotamento do aço líquido e laminações de placas, chapas e bobinas

A etapa de lingotamento do aço líquido com suas etapas de resfriamento (primário e secundário), corte, resfriamento em leito, tratamento superficial (escarfagem manual e/ou automática) e, as posteriores etapas de conformação e tratamentos termoquímicos nas unidades de laminações de placas, chapas grossa, bobinas a quente e a frio e de tiras, geram basicamente água contaminada e calor com os seguintes resíduos e componentes:

- Carepas. Placas/escamas metálicas, parcialmente ou totalmente oxidadas, contendo contaminações como pós fluxantes*, óleos, graxas;
- Lamas: proveniente das unidades de tratamento de águas ácidas das laminações, contendo carepas finas, óleos, graxas, íons metálicos (manganês solúvel), poliacrilatos e outros polímeros usados na dispersão/floculação durante o tratamento das águas;
- Óleos e graxas, provenientes da utilização de lubrificantes durante as etapas de conformação mecânica.

O consumo de água também é um aspecto ambiental importante nas unidades de laminações chegando, por exemplo, a 30 mil m³/h (Laminador de tiras a quente da CST), com capacidade de recirculação¹¹⁶ de 98% e “make-up” de 500 m³/h.

Fluxantes⁴: lubrificantes inorgânicos utilizados no molde do lingotamento contínuo visando diminuir o desgaste, defeitos superficiais e aumentar a taxa de transferência de calor. Normalmente a base de: SiO₂, CaO, Al₂O₃, Na₂O e CaF₂.

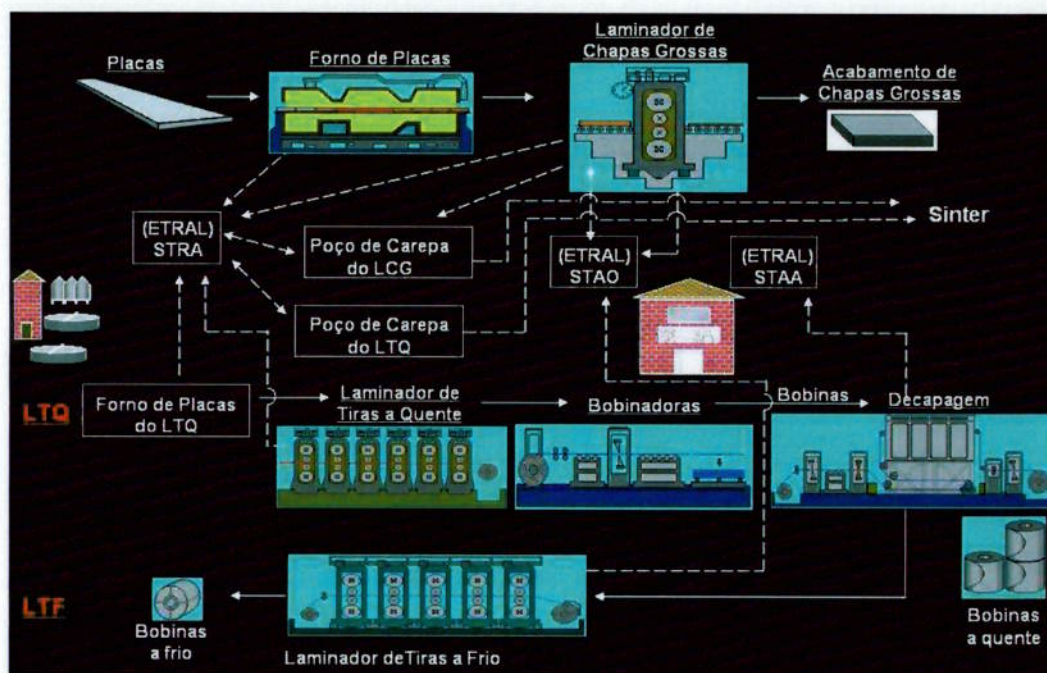


Figura 34 - Forma esquemática do ciclo de geração dos principais resíduos/subprodutos dos processos de laminações da COSIPA

Dentre estes resíduos, as carepas são normalmente recuperadas e utilizadas nas unidades de sinterização, mas, também podem ser briquetadas e utilizadas na aciaria, os óleos são reprocessados e vendidos visando sua recuperação como óleo base. Já as lamas dos processos de tratamento e recirculação de águas das unidades de laminações apresentam maior criticidade em sua recuperação, em decorrência da contaminação com óleos e sua menor granulometria o que gera problemas de manuseio, secagem complexa, estocagem e perda de permeabilidade quando adicionada no leito de sinterização, além da formação de VOC's. Estudos têm sido conduzidos visando seu co-processamento em fornos de cimento⁵⁰, e para a produção de pigmentos, metalurgia do pó e cerâmicas magnéticas¹¹⁶.

Os gráficos a seguir, apresentam alguns dados sobre a geração e redução objetivada pela COSIPA em suas emissões de poluentes, decorrente dos investimentos realizados após sua privatização na década de 1990.

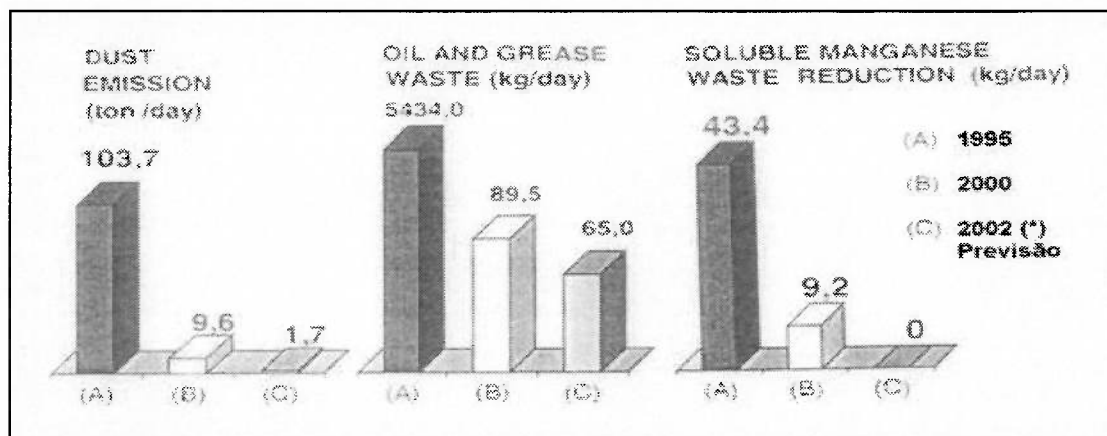


Figura 35 – Evolução da redução de descarga de poluentes da COSIPA, período de 1995 – 2002; (Adaptado de PAES⁵⁰) – (“Dust emission”: emissão de particulados; “oil and grease waste”: resíduos oleosos e graxas; “soluble manganese waste reduction”: redução dos resíduos contendo manganês solúvel)

Em função da especificidade de cada processo metalúrgico em uma usina siderúrgica, a reciclagem dos próprios subprodutos gerados durante as várias etapas de transformação do aço é um processo complexo e que exige um conhecimento profundo das transformações metalúrgicas, fenômenos de transporte, termodinâmica e cinéticas das reações químicas, equilíbrio químico, capacidade dos reatores, sistemas de controle ambiental acoplados bem como o tipo e quantidade de material a ser reciclado. A tabela XX resume as principais variáveis a serem controladas nos 3 principais reatores metalúrgicos de uma usina integrada: alto-forno, sinterização e conversor a oxigênio.

Tabela XX – Resumo com as principais características de controle para a reciclagem de subprodutos siderúrgicos em uma usina integrada (adaptado de LÜNGEN⁹⁴)

Equipamento	Variável de controle	Conseqüência ao processo metalúrgico
Sinterizações	Umidade (utilização de resíduos “in natura”)	Descontrole térmico; Gasto energético; Perda de rendimento; Dificuldade de manuseio e mistura.
(continua)		

	Carbono	Em teores elevados pode acentuar a redução dos minérios de ferro, formando fase líquida no bolo de sinter e afetando o balanço térmico; adicionado de forma controlada e homogênea disperso diminui o consumo de combustíveis economizando “coke breeze” (moinha de coque);
	Cloretos	Formação de dioxinas catalisadas pela presença de ferro, cobre e materiais orgânicos em elevadas temperaturas. Aumento da corrosão junto aos sistemas de limpeza de gases;
	Óleos e graxas	Possíveis formadores de dioxinas quando em presença de compostos contendo cloro, ferro e cobre; Formadores de fuligem quando o processo de queima não está controlado;
	Ganga	Elevação do volume de escória e formação de fases de baixo ponto de fusão interferindo na permeabilidade e na resistência mecânica do sinter, bem como no descontrole da basicidade do mesmo;
	Elementos deletérios: fósforo e enxofre	Transferência dos mesmos para a carga do alto-forno com elevação destes elementos no gusa líquido;
	Carepas	Normalmente não produzem efeitos deletérios sobre o bolo de sinter, deve-se avaliar a presença de óleo e graxas;
Alto-forno	Umidade	Descontrole balanço do térmico com conseqüências na temperatura do guso, teor de silício do gusa e consumo de combustíveis (“coke and fuel rate”);
	Ganga	Volume de escória e descontrole da basicidade e da composição química do leito (efeitos na redutibilidade da carga, rendimento metálico do forno, consumo energético e ciclo operacional);
(continua)	Resistência mecânica a verde	Elevação da quantidade de finos e materiais recirculando ou sendo capitada pelos sistemas de despoeiramento;

	Resistência mecânica em elevadas temperaturas	Colapso da carga, com formação de pós e modificação da permeabilidade do forno;
	Carbono	Inchamento com perda da resistência mecânica das pelotas ou briquetes que se tornam auto-redutores (redução do ferro com formação de agulhas e filamentos metálicos);
	Alcalis e zinco	Recirculação e formação de cascões diminuindo o volume útil e a descida da carga. Ataque do revestimento refratário;
Conversores a oxigênio (LD/BOF)	Umidade e perda ao fogo (voláteis e produtos gasosos de reações químicas)	“splashing”, explosão, descontrole do balanço térmico e do volume de gases gerados e captados;
	Ganga	Volume, composição, viscosidade e tipo de escória.
	Basicidade	Formação de escória, partição de fósforo e enxofre, corrosão dos refratários e mudança da temperatura “liquidus” da escória;
	Metais (Zn, Cu, Sn, Pb, etc.)	Contaminação do aço e dos subprodutos e escória formada podendo gerar incrustações no sistema de lavagem de gases;
	Elementos deletérios: fósforo e enxofre	Contaminação do aço, aumento de consumo de escorificantes, ressopros de oxigênio, aumento do “tap-to-tap”, etc.
	Material particulado	Saturação do sistema de captação de pós e lavagem de gases, descontrole da composição química e perturbações no sistema de tratamento de água;
	Carga metálica	Rendimento do aço líquido, oxidação do banho (metal-escória), balanço térmico, volume e formação da escória.

3.3 – Processos de aglomeração de resíduos

Os processos de aglomeração fazem parte das principais tecnologias de reciclagem e reaproveitamento de materiais particulados, pós e matérias primas finas. Estas tecnologias e os principais métodos de aglomeração foram desenvolvidos no início do século XX⁹⁵. Nesta época, as chaminés e as fumaças negras provenientes das incipientes indústrias de redução, refino de minérios e fundição de metais⁹⁶ eram consideradas um grande avanço e sinal de sucesso e prosperidade, conforme mostrado na figura 36.

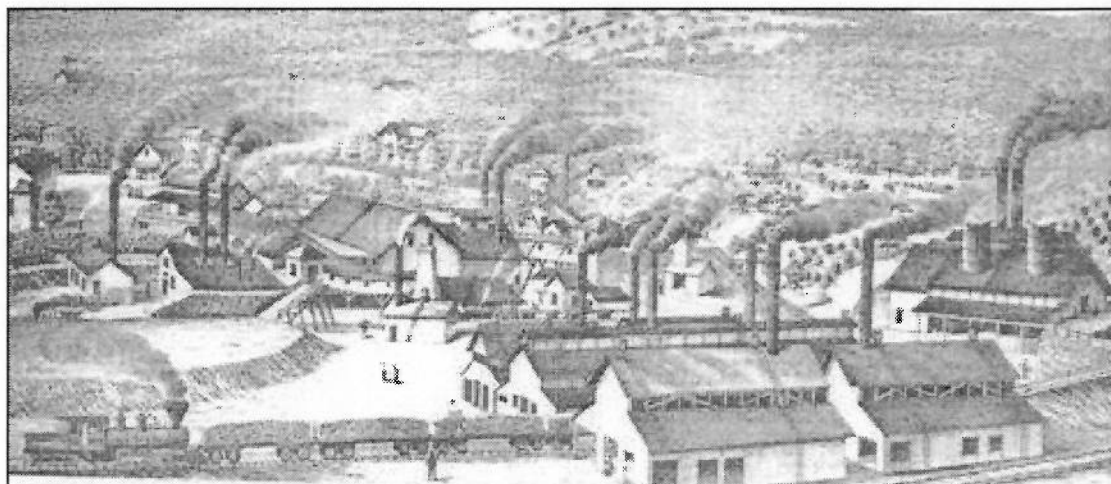


Figura 36 – Próspero distrito de redução e refino de minérios “smelter town” a mais de 120 anos atrás⁹⁶

Somente depois dos anos 40 é que estudos mais rigorosos foram realizados para revelar os fenômenos envolvidos nestas operações de aglomeração. Os principais processos de aglomeração de particulados podem ser divididos em três categorias de acordo com o tipo de força aplicada no processo de conformação:

- Compactação: Briquetagem, extrusão e prensagem;
- Agitação: Pelotização e granulação;
- Tratamento térmico: Sinterização, nodulização e “spray drying”.

Atualmente, uma grande quantidade de produtos é produzida por aglomeração, como os fertilizantes, minérios de ferro, formas de coque, rações

animais, plásticos e medicamentos. Já o termo aglomeração primeiramente foi utilizado por BAKER e HEARNE em 1905 na patente americana⁹⁷ intitulada: “Agglomerating Finely Divided Iron Ore Minerals and Residues”.

A evolução do processo de aglomeração nos anos 40 e 50 se baseiam em estudos de minérios e concentrados de ferro e, nos anos 60 a aglomeração de metais, combustíveis, cerâmicas e produtos químicos. Nos anos 70 os processos de aglomeração foram extremamente influenciados pelos fatores ambientais e métodos de aglomeração têm sido destinados à disposição adequada, recuperação e reciclagem de materiais.

3.3.1 – Pelotização e granulação

O processo de pelotização foi inventado no período de 1912-13; onde A. G. ANDERSEN⁹⁵ na Suécia em 1912 foi o primeiro a propor o processo; porém, sem receber uma aceitação comercial para seu invento. C. A. BRACKELSBURG na Alemanha, em 1913 obteve maior sucesso com seu método utilizando a adição de ligantes e obtendo elevada resistência das pelotas a altas temperaturas.

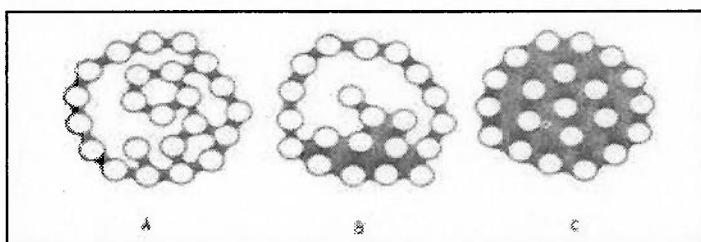
A transformação de bolas ou pelotas (“balling”) é a base tecnológica do processo de aglomeração, transformando finos em pelotas. Existe uma variedade de teorias utilizadas para determinar quais são os mecanismos de ligação entre as partículas e quais as forças coesivas envolvidas no processo.

Quanto ao tamanho das pelotas produzidas, pode-se classificar os produtos em três classes distintas⁹⁵:

- Micropelotas ou pelotas pequenas: diâmetro entre 3 e 8 mm, normalmente destinadas à sinterizações e processos hidrometalúrgicos;
- Pelotas normais: diâmetro entre 10 e 15 mm diâmetro padrão para altos-fornos;
- Pelotas grandes: diâmetro entre 20 a 30 mm, destinadas a processos de aciarias e matérias primas da manufatura de cimentos.

Teoria do processo de formação de bolas

Quando materiais particulados finos são umedecidos, um filme fino de líquido desenvolve-se sobre a superfície de cada um dos grãos, formando pontes entre as partículas que passam a ter vários pontos de contatos entre si. As partículas em movimentos rotacionais vão transformando-se em bolas, onde as forças de ligação desenvolvem gradualmente.



- A) Ligação inicial entre as partículas;
 B) Coalescência do filme de líquido, com cavidades de ar entre os grânulos;
 C) Estágio capilar, sem ar enclausurado.

Figura 37 – Mecanismo de formação de bolas ou pelotas⁹⁵

A primeira teoria da descrição do processo de pelotamento foi desenvolvida por C. V. FIRTH⁹⁵ em 1944, na qual a união entre as partículas molhadas por um líquido era gerada pela ação das forças mecânicas proporcionadas pelo dispositivo em rotação. A teoria da capilaridade, proposta por M. TIGERSKJÖLD e P. A. ILMONI⁹⁵, na qual a coesão é decorrente da formação de um sistema de capilares, com bases interligadas por poros e vazios saturados com água. As expressões que descrevem as forças deste sistema são:

$$\sigma = (r\rho gh)/(2\cos\delta); \text{ onde:} \quad (41)$$

σ - tensão superficial do líquido (N. cm^{-1})

δ - ângulo de contato entre o líquido e a fase sólida ($^{\circ}$)

r - raio do capilar (cm)

h - altura capilar (cm)

ρ - densidade do líquido (g.cm^{-3})

g - aceleração da gravidade (cm.s^{-2})

Sendo o raio do capilar dependente da superfície específica das partículas, conforme descrito pela equação apresentada a seguir:

$$r = (2 \varepsilon) / [S R_2 (1 - \varepsilon)]; \text{ onde:} \quad (42)$$

r - raio capilar (cm)

ε - porosidade da pelota (%)

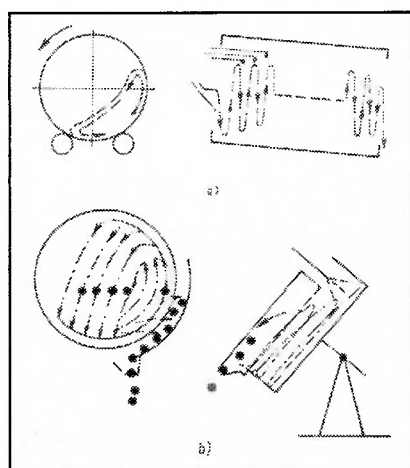
S - área superficial das partículas ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$)

R_2 - densidade real do material (g cm^{-3})

Verifica-se diretamente que o fenômeno capilar responsável pela resistência das pelotas depende diretamente da área superficial do material. Para materiais superfinos ($< 5 \mu\text{m}$) a equação não expressa suficientemente as forças coesivas do sistema, uma vez que tais materiais possuem características coloidais que atuam no sistema como ligantes. Assim, as ações das forças capilares são acrescidas dos efeitos de viscosidade do líquido (modelo da visco-capilaridade).

Cinética do processo de pelotamento

A pelotização de finos é um processo contínuo, onde partículas de material são movimentadas por rotação, umedecidas e aglomeradas. Os mais comuns equipamentos deste processo são os discos de pelotização, os cones e os tambores rotativos mostrados na figura 38.



a) tambor rotativo;

b) disco pelotizador;

Figura 38 – Dispositivos de aglomeração por pelotamento⁹⁵

O processo de formação de aglomerados esféricos possui duas fases: a formação de núcleos e o crescimento das pelotas. Na primeira fase predominam os efeitos das forças capilares, já no crescimento das pelotas atuam significativamente forças decorrentes do movimento destes núcleos. Este processo é dinâmico e não ocorre isoladamente, mas frequentemente colisões entre as partículas e aglomerados produzem uma grande variedade de combinações de ligação.

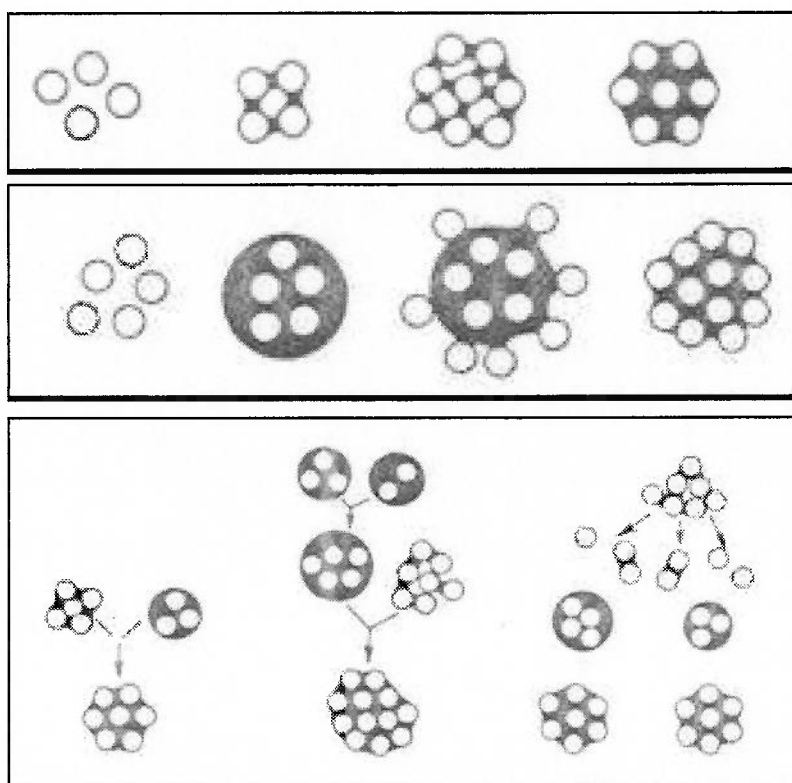


Figura 39 – Vários mecanismos de formação de núcleos em diferentes condições de disponibilidade de líquido e formação de filme ao redor das partículas aglomeradas (Adaptado de SRB⁹⁵)

Várias propriedades intrínsecas dos materiais interferem na capacidade de se produzir pelotas com satisfatória resistência a compressão; entre elas temos: o tamanho de partículas, a distribuição granulométrica, a forma das partículas, a área superficial, a molhabilidade, a composição química e mineralógica do material.

Do ponto de vista extrínseco, ou seja, das variáveis de processo que interferem na qualidade e nas propriedades das pelotas formadas, a quantidade de água, a velocidade, a inclinação dos dispositivos (disco ou tambores), a taxa de alimentação e a adição de ligantes/aglomerantes são as mais importantes⁹⁸.

Ligantes adicionados para a melhoria das propriedades das pelotas

Os ligantes/aglomerantes são utilizados de forma a aumentar a flexibilidade durante o processamento dos materiais a serem pelletizados, tendo basicamente três funções^{95,99,100}:

- 1) Aumentar a capacidade de formação das pelotas;
- 2) Garantir as propriedades mecânicas à verde, após-secagem e após queima das pelotas processadas;
- 3) Ajustar as consistências químicas e mineralógicas das pelotas.

Do ponto de vista industrial os principais ligantes/aglomerantes incluem substâncias como: bentonita, cal, argilas, vidro solúvel ($R_2O \cdot nSiO_2$), cimentos, dextrina, resíduos de sulfonatos (indústria de papel e celulose), piche e especialmente compostos alcalinos.

3.3.2 - Granulação

A granulação é o processo que se destina aglomerar materiais finamente divididos, normalmente na forma de pastas ou lamas em produtos granulados de pequenas dimensões, em faixas granulométricas semelhantes a das micropelotas (3 a 8 mm).

A técnica de granulação se distingue da pelletização de micropelotas por não utilizar discos, cones ou tambores no processo de formação e crescimento das pelotas, neste tipo de processamento se utiliza dispositivos de mistura de alta intensidade e eficiência (misturadores intensivos ou planetários) ajustando-se o teor

de umidade das matérias primas através de um balanço de massa da umidade (teor de água) de entrada, juntamente com o controle do tempo de mistura, da adição de substância higroscópicas (cal, finos de dolomita calcinada, pós-secos, etc.) e de aglomerantes/ligantes utilizados durante o processo de mistura.

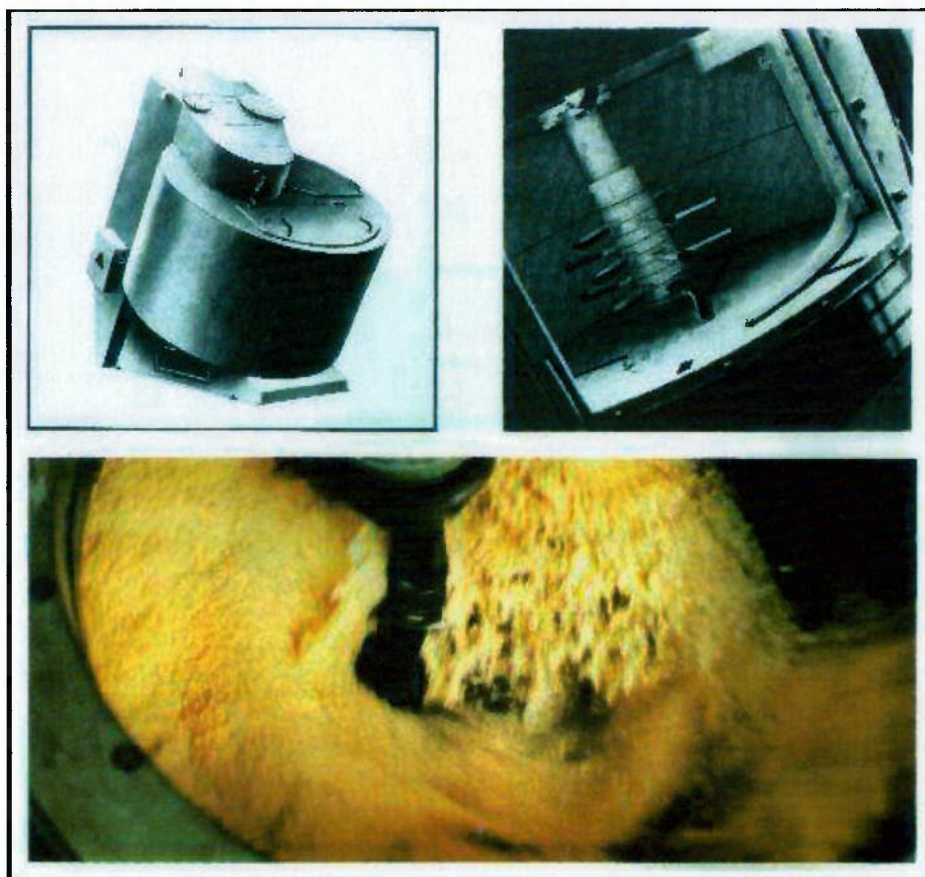


Figura 40 – Equipamentos de granulação de pastas, através de misturadores intensivos¹⁰¹

A homogeneidade da mistura entre os materiais pode ser analisada, através da introdução de elementos traçadores (elemento de coloração ou uma espécie química distinta). Durante a operação de mistura, retira-se e analisam-se alíquotas de material visando à quantificação destes traçadores que são então comparados à quantidade inicialmente adicionada. A figura 41 apresenta a evolução da homogeneidade da mistura ao longo do tempo (traçador químico).

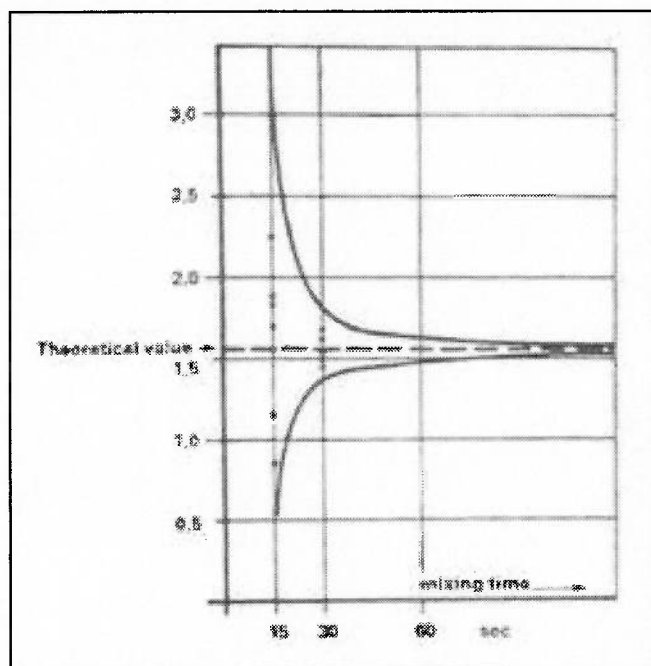


Figura 41 – Uniformidade/eficiência da mistura como função do tempo¹⁰² – (“theoretical value”: valor teórico; “mixing time”: tempo de mistura; “sec”: segundos)

A combinação dos elementos móveis de mistura (agitadores e cuba) torna quase impossível a formação de zonas mortas (material sem movimentação), uma vez que dentro do volume do reator, todo o material é lançado em contra fluxo na direção do agitador mecânico de forma intensiva e rápida.

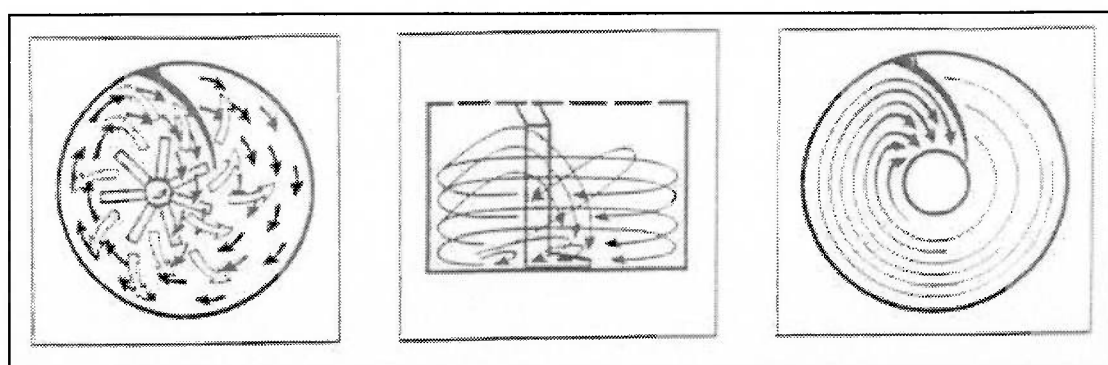


Figura 42 – Linhas de fluxo na movimentação do material no interior de um misturador intensivo¹⁰²

3.3.3 – Processos de compactação em rolos de compressão (Briquetagem)

Briquetagem é o método mais antigo de aglomeração de materiais finos, em 1848 a patente obtida por WILLIAN EASBY intitulada: “Method of converting fine coal into solid lumps” foi a primeira a fazer uma breve descrição do processo⁹⁷, porém somente 50 anos depois o processo de briquetagem de carvão passou a ter importância econômica, aumentando a produção destes insumos a níveis de até 6.000.000 de toneladas briquetadas anualmente nos Estados Unidos da América até o final do período da II Guerra mundial. Após este período, o carvão passou a ser substituído por petróleo e gás natural cada vez mais barato.

Na siderurgia, já em 1903 se produziam briquetes de minério de ferro para altos-fornos, que chegaram a representar 75% da carga dos altos fornos suecos. Após 1922, os briquetes de minérios de ferro foram gradualmente sendo substituídos pelo sinter até seu completo desaparecimento em 1936. As causas que levaram ao abandono da tecnologia de briquetagem de minérios foram os elevados custos do processamento e dos equipamentos envolvidos.

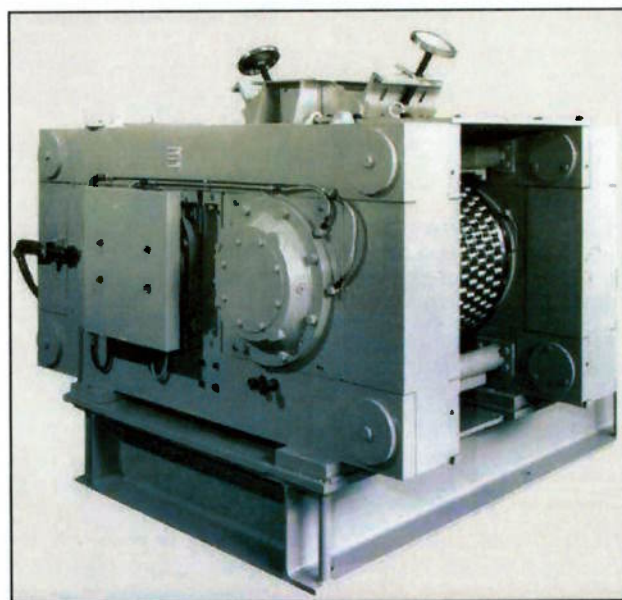


Figura 43 – Briquetadora marca Hosokawa-Bepex, modelo: MS 300 para briquetagem de pós abrasivos¹⁰⁶

Atualmente, a briquetagem tem sua importância reconhecida na indústria metalúrgica para a produção de produtos metalizados (HBI) e na reciclagem de resíduos provenientes de sistemas de despoejamento e controle ambiental. Alguns aspectos técnicos sobre as características dos materiais a serem processados são necessários para a correta definição das condições de operação e produção de briquetes a base de resíduos siderúrgicos^{108,109,110,111,112}; tais como: composição química (teor de cal livre, teor de óleos, teor de álcalis, basicidade, umidade), tipo de aditivo/aglomerante/lubrificante, distribuição granulométrica, empacotamento, densidade e dureza dos materiais.

3.3.3.1 - Processo de briquetagem

A briquetagem é uma variante do processo de compactação entre rolos de pressão; onde o material particulado é alimentado e pressionado com auxílio de parafusos para o interior dos rolos com sulcos, normalmente estes sulcos possuem a forma de “travesseiros ou amêndoas”.

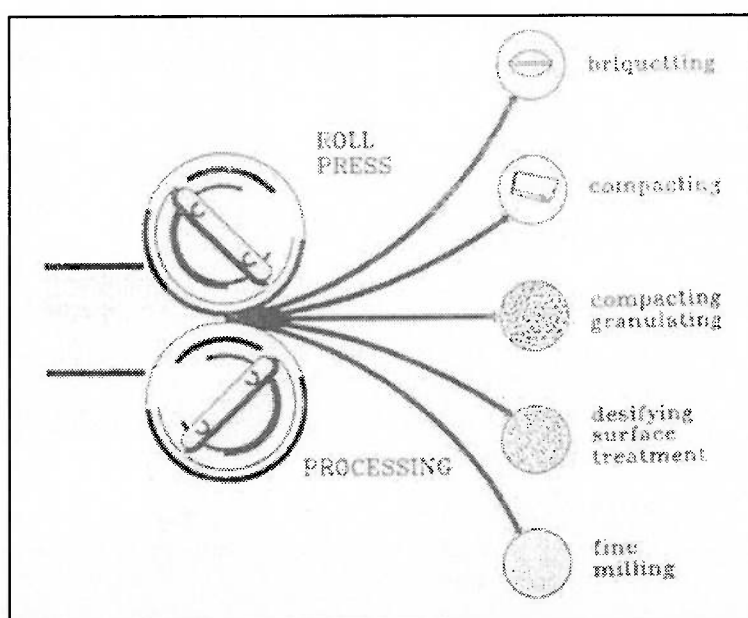


Figura 44 – Exemplos de processamentos em rolos de compressão¹⁰³

De uma maneira geral o processo de compactação entre rolos de pressão é um processo complexo e caracterizado por uma grande variedade de fatores. Entretanto, três são os mais importantes:

- Fricção entre a superfície do rolo e o material compactado;
- Característica de tensão–deformação do material;
- Permeabilidade do material particulado.



“Specific pressing force”: força de compactação específica

“Ores”: minérios

“Metallurgical dust”: pós/particulados metalúrgicos

“Burnt lime”: cal

“Sponge iron”: ferro esponja

“Caustic MgO”: Magnésia cáustica

“NPK Mixed fertilizers”: fertilizantes a base de sódio, fósforo e potássio

“Rock salt”: salgema

“Soda”: carbonato de sódio

“FGD gypsum”: gipsita FGD

“Ores, minerals (with binders)”: minérios e minerais (com adição de ligantes)

“Potash”: potassa

“Ceramic raw material”: matérias-primas cerâmicas

“Maleic anhydride”: anidrido maleico

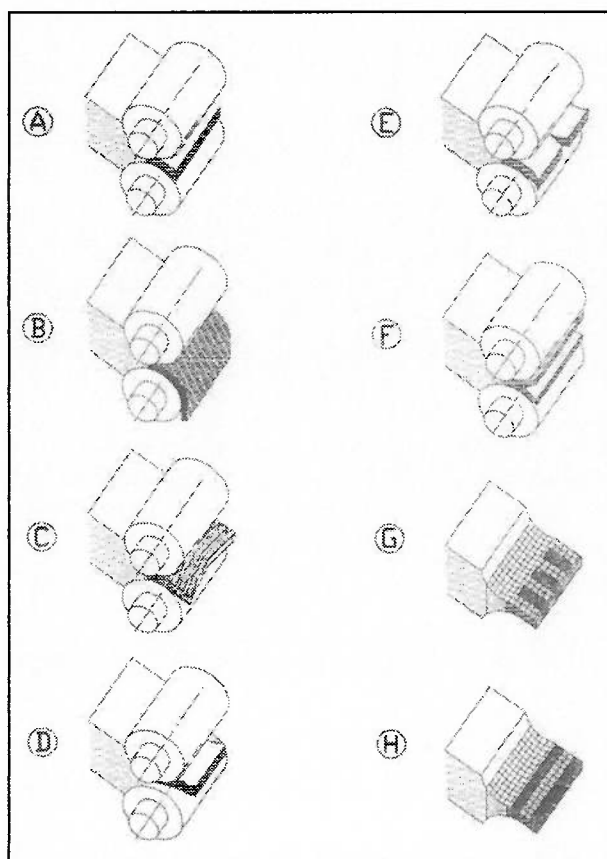
“Coal with binders”: carvão com ligantes

Figura 45 – Força necessária para a compactação de diferentes materiais particulados¹⁰⁴

3.3.3.1.1 - Efeitos da alimentação de material particulado no desempenho do processo de compactação em rolos de pressão

O processamento por compactação de materiais particulados (pós-finos ou muito finos) pode apresentar uma série de problemas decorrente da distribuição de forças, movimentação e fluxo das partículas finas durante a densificação. As configurações esquemáticas mais comuns que podem ocorrer durante a compactação de pós finos são indicadas na figura 46 apresentada a seguir.

Já a figura 47 mostra de forma quais os métodos podem ser utilizados para o aumento do desempenho durante a operação de compactação de pós.



- A- Situação normal, compacto denso e de boa qualidade;
- B- Material deixa os rolos na forma de pó, porém em um estado de maior densificação;
- C- O material compactado se rompe em pedaços regulares com característica e formato em “v”;
- D- Material heterogêneo, onde o centro está uniformemente compactado e as bordas estão fracamente ou não estão compactadas;
- E- Separação central em duas tiras longitudinais;
- F- Abertura transversal com separação em duas superfícies;
- G- Compactação não uniforme ao longo da extensão dos rolos, este fenômeno quando na forma de tiras longitudinais de alta e baixa densidade está geralmente relacionado com a largura dos rolos;
- H- Mesmo efeito anterior, porém a não uniformidade das densidades aparece na direção transversal.

Figura 46 - Casos mais comuns dos efeitos da alimentação de material particulado em rolos de compactação¹⁰³

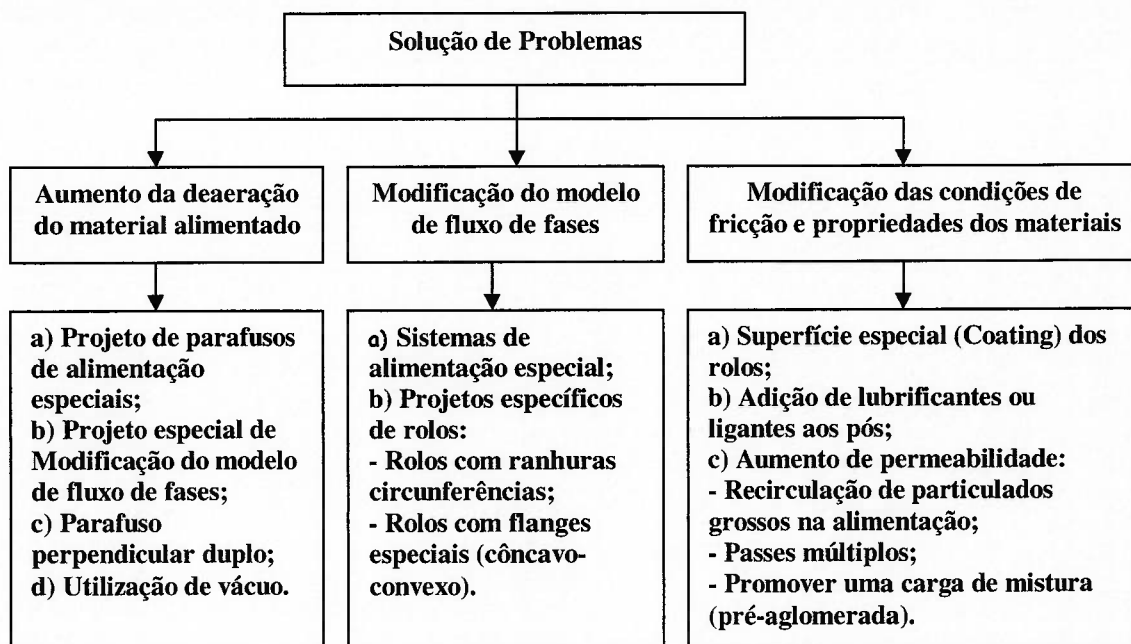


Figura 47 – Métodos para melhoria do desempenho de compactação de materiais particulados¹⁰³

3.3.3.1.2 - Efeito da distribuição granulométrica sobre o empacotamento das partículas

Diversas propriedades dos materiais (cerâmicos, metálicos ou poliméricos) quando na forma de sólidos particulados estão associados ao empacotamento das partículas que os constituem^{120,121,127}. Empacotamentos densos são de interesse no processo de briquetagem, pois elevam a produtividade, diminuem a porosidade, a permeabilidade e aumentam a resistência mecânica dos produtos briquetados. Uma excelente revisão sobre o assunto é descrita nos trabalhos de DINGER e FUNK¹²²⁻¹²⁷.

a) Modelos de empacotamento de partículas

Basicamente os estudos sobre empacotamento de partículas possuem duas abordagens básicas: uma discreta (FURNAS¹²⁰) considerando as partículas

individuais e outra abordagem, proposta por ANDREASEN¹²⁰, que aborda as partículas com distribuições contínuas.

a.1 – Modelo de Furnas:

FURNAS trabalhando em sistema de misturas binárias e multicomponentes demonstrou que a proporção dos vários tamanhos de partículas envolvida na elaboração de uma distribuição de máxima densidade de empacotamento forma uma progressão geométrica, que satisfaz a seguinte equação:

$$CPFT = (D_P^{\log r} - D_S^{\log r}) / (D_L^{\log r} - D_S^{\log r}) \times 100 ; \quad (43)$$

Onde:

CPFT - Porcentagem acumulada de partículas menores que D_P ;

D_P - Diâmetro da partícula;

D_S - Diâmetro da menor partícula;

D_L - Diâmetro da maior partícula;

r - Quociente entre o volume das partículas retidas em uma malha de peneira e o volume na malha imediatamente inferior.

a.2 – Modelo de Andreasen:

O modelo de Andreasen, baseado no fato de que em distribuições reais, todos os tamanhos (diâmetros) podem estar presentes. Indicando que a distribuição de tamanho das partículas segue o comportamento representado pela seguinte equação matemática.

$$CPFT = (D_P / D_S)^q \times 100 \quad (44)$$

Onde:

q - Módulo ou quociente da distribuição

a.3 – Modelo de Alfred:

O modelo de Alfred é um aperfeiçoamento dos modelos de Furnas e de Andreasen, introduzindo o termo referente ao tamanho mínimo da partícula ao modelo de Andreassen.

$$CPFT = (D_P^q - D_S^q) / (D_L^q - D_S^q) \times 100 ; \quad (45)$$

Conforme determinado por DINGER e FUNK¹²⁵, o valor da variável q (quociente da distribuição) que maximiza a densidade de empacotamento vale: 0,37. Outros fatores também influenciam o empacotamento das partículas como a morfologia, a porosidade e a densidade das partículas.

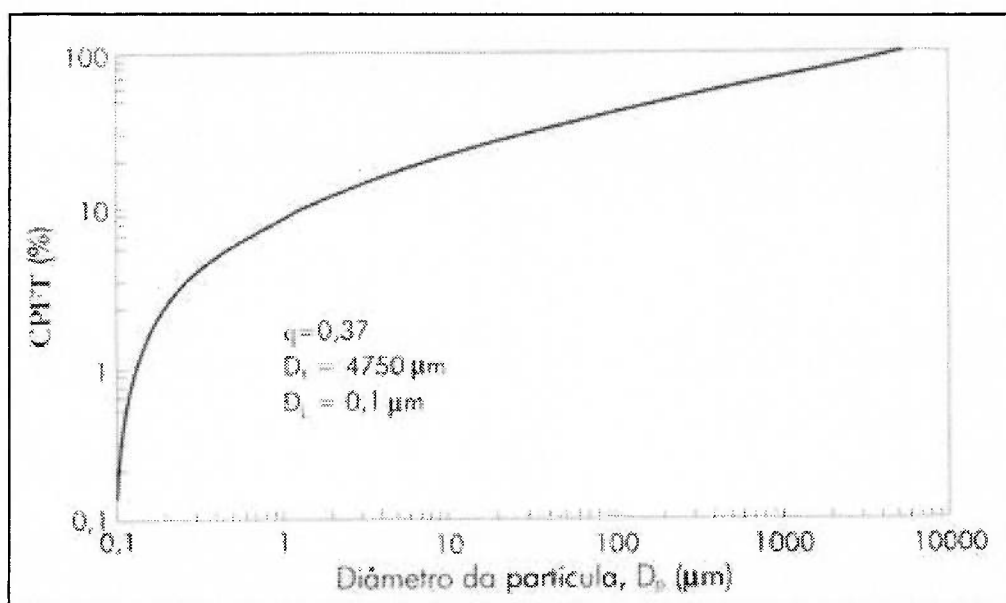


Figura 48 – Distribuição granulométrica de densidade máxima ($q = 0,37$) segundo o modelo de Alfred¹²⁰

3.3.3.1.3 - Seleção de aditivos: aglomerantes e lubrificantes para os processos de aglomeração

Aglomerantes são aditivos que aumentam a deformação dos materiais particulados, enquanto os lubrificantes diminuem o coeficiente de fricção entre as partículas individuais no aglomerado ou entre a superfície do aglomerado e dos rolos de compactação. Logo, uma mesma substância pode funcionar tanto como aglomerante e como lubrificante. A construção de equipamentos de compactação em rolos que trabalham cada vez mais sob condições de extrema pressão tem eliminado a necessidade de se utilizar aglomerantes. Porém, como regra prática, a medida que se aumenta a dureza dos materiais a serem briquetados deve-se avaliar a utilização dos aglomerantes (como regra prática, pode-se considerar a dureza Mohr >3 , como o limite indicativo para sua utilização¹¹⁰).

Os aglomerantes podem ser classificados em 3 grupos gerais, conforme apresentado pela tabela XXI.

Tabela XXI – Principais classes e exemplos de aglomerantes^{107,109}

Tipo: Matrix	Tipo: Filme	Tipo: Aglomerante químico
Piche-Betume	Água	$\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2$
Alcatrão	Silicato de sódio	$\text{Ca(OH)}_2 + \text{Melaço}$
Asfalto	Resinas plásticas	$\text{MgO} + \text{Fe}_3\text{O}_4$
Cimento Portland	Colas	$\text{MgO} + \text{MgCl}_2$
Cera de carnaúba	Gomas	Silicato de sódio + CaCl_2
Parafina	Bentonita	Silicato de sódio + CO_2
Argila	Tapioca	
Açúcar	Sacarose	
Celulose	Dextrina	
Lignosulfonato (sódio ou magnésio)	Lignosulfonatos	
Alcatrão de madeira	Melaço	

- a) **Aglomerantes do tipo Matriz:** Sua atuação depende da efetividade de seu embutimento entre as partículas; logo; maiores quantidades destes aglomerantes são requeridas porque a deformação depende da formação de uma fase contínua do aglomerante ao redor das partículas. A quantidade de aglomerantes pode chegar a até 10% de adição (8% de aglomerante asfáltico pode ser necessário para a briquetagem de finos de carvão; enquanto, apenas 2 % deste mesmo aglomerante é necessário para a produção de briquetes de minérios de ferro).
- b) **Aglomerante tipo Filme:** Estes são geralmente, mas não necessariamente, utilizados na forma de soluções ou em dispersões. Água é o mais comum solvente, mas álcool etílico, acetona, tetracloreto de carbono e outros solventes podem ser empregados. A resistência mecânica a verde dos briquetes produzidos com estes aglomerantes pode ser baixa, porém ela aumenta após etapas de secagem. As quantidades requeridas destes aglomerantes dependem da densidade das partículas e de sua superfície específica (área superficial). Satisfatória molhabilidade da superfície das partículas pode ser obtida utilizando-se 0,5 a 2% destes aglomerantes (líquido ou em solução), porém partículas finamente divididas (micron e sub-microns) podem requerer até 10% em massa destes aglomerantes.
- c) **Aglomerantes Químicos:** A efetividade destes aglomerantes depende da extensão e do poder das reações químicas formadas entre os componentes e o aglomerante. Minérios de ferro podem ser briquetados após a adição de um pré-mix de melão e hidróxido de cálcio utilizando a reação entre a cal e o açúcar para produzir uma forte ligação. Óxido de magnésio pode ser aglomerado utilizando a solução de cloreto de magnésio que forma um oxiclreto ligando as partículas. Os ligantes químicos podem atuar como aglomerantes do tipo filme ou matrix.

d) Lubrificantes:

Os Lubrificantes podem ser líquidos ou sólidos e podem funcionar internamente quando misturados com o material a ser processado ou serem utilizados externamente nas superfícies de conformação. Os lubrificantes sólidos são utilizados em processos de conformação em elevadas pressões.

Tabela XXII – Principais lubrificantes de compactação¹⁰⁷

Lubrificantes sólidos	Lubrificantes líquidos
Talco	Água
Grafite	Óleos lubrificantes
Ácido esteárico	Glicerina
Estearato de magnésio	Etilenoglicol
Estearatos metálicos	Silicones
Bissulfito de molibdênio	Óleos solúveis em água
Amido/fécula	
Parafinas	
Ceras	

A principal diferença entre a laminação de placas metálicas e os processos de compactação de pós, está na não conservação do volume inicial do material após o processo de conformação (elevada variação volumétrica após a etapa de compactação), havendo um aumento de densidade e a necessidade de saída dos gases entre os vazios da massa de material em processo de compactação.

Quando a permeabilidade é baixa, o ar aprisionado dentro do material comprimido influencia as características de tensão-deformação do material. A diferença da quantidade de ar ao longo da compactação é decorrente das melhores condições de fluxo e saída dos gases no centro dos cilindros (desaeração) enquanto ao longo da seção as laterais apresentam mais ar e menor densificação.

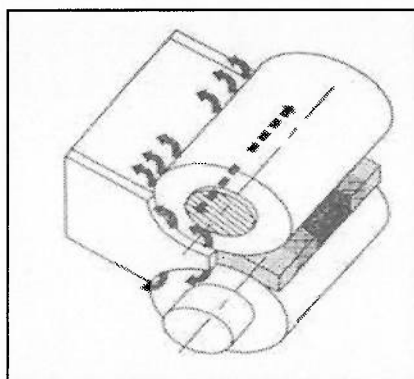


Figura 49 – Modelo de saída de gases durante a compactação de pós na região do ângulo de contato¹⁰³

3.3.2.1.4 - Distribuição de tensões durante a compactação

O modelamento matemático deste processo ainda não foi completamente desenvolvido, pois uma das maiores dificuldades é a determinação da característica de tensão-deformação do material como função da densidade. A figura 50 apresenta a determinação experimental e a simulação de um modelo matemático proposto por DEC¹⁰⁵ para a determinação da curva de compactação do cloreto de sódio.

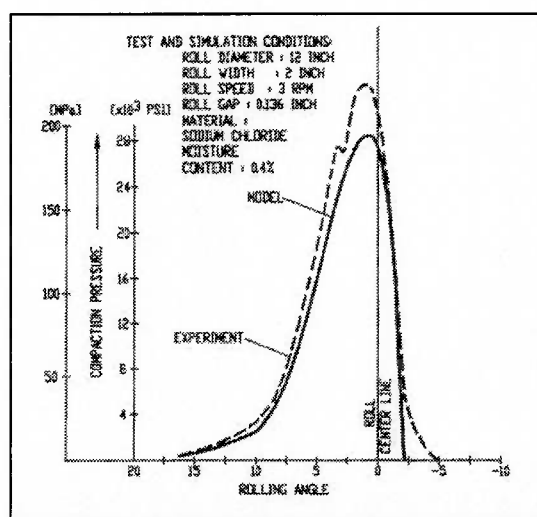


Figura 50 – Comparação entre resultados simulados (linha cheia) e dados observados (linha pontilhada) da distribuição de pressão em rolos durante o processo de compactação¹⁰⁵ – (“test and compaction condictionns”: condições de compactação do teste; “compaction pressure”: pressão de compactação: “rolling angle”: ângulo de ataque)

O processo de compactação dos materiais particulados entre rolos de compressão, pode ser dividido em 4 zonas distintas:

- a) **Zona de fluxo livre:** Na qual o material particulado desloca-se sob efeito da força gravitacional;
- b) **Zona de alimentação:** o material particulado a ser dragado para baixo pela fricção da superfície dos rolos e a densificação depende do rearranjo das partículas. A densidade do material cresce até se atingir um máximo no final desta zona. A zona de alimentação é definida por 2 ângulos: α_F e α_E ; conforme indicado na figura 51;
- c) **Zona de compactação:** O início desta zona é definido pelo ângulo de compactação (ângulo de agarramento ou ângulo de conformação: α_E). Nesta zona, as forças permanecem efetivas e a massa de particulado permanece coerente;
- d) **Zona de deformação:** Zona na qual a deformação se processa; acredita-se que a resistência a verde é primariamente desenvolvida nesta zona. Esta zona se sobrepõe com a zona de compactação.

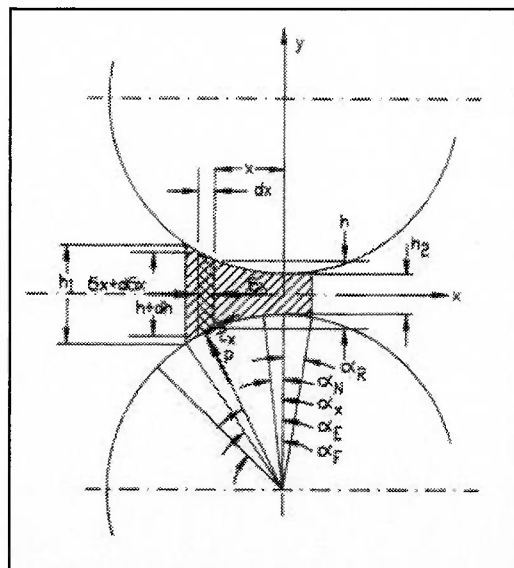


Figura 51 – Várias zonas e ângulos existentes na compactação de material particulado entre rolos de compressão¹⁰⁵

Nos últimos anos, uma grande evolução tem sido conseguida com a utilização de modelos computacionais de simulação numérica (elementos finitos) e fluidodinâmica computacional (CFD), visando simular o comportamento dos sólidos particulados em sistemas sob escoamento em compressão; porém a variação das propriedades dos sólidos particulados em função do grau de compactação (propriedades elásticas, fenômenos de fricção e de viscosidade, densidade, módulo de elasticidade, razão de Poisson, etc.), ainda necessitam de determinações mais precisas para a alimentação e validação destes modelos mais complexos.

Através de um consórcio de pesquisas (CRADA: Cooperative research and development agreement) ente o Laboratório Nacional Los Alamos, Sandia Nacional Laboratories e a AACCMCI^{117,118} tem-se buscado a obtenção de modelos computacionais para a simulação de compactação de materiais particulados.

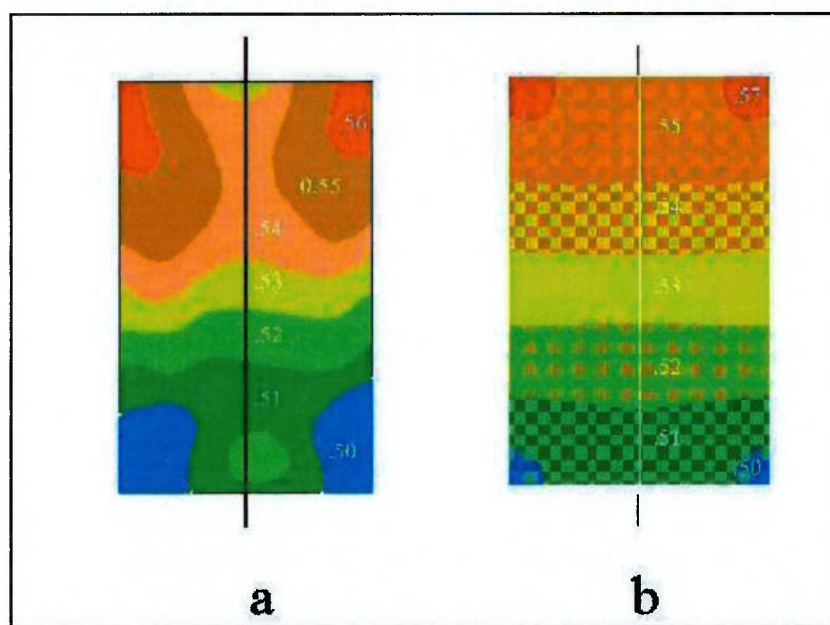


Figura 52 – (a) Gradientes de densidade medidos através de ultra-som um corpo cerâmico de alumina prensado uniaxialmente; (b) Modelo de simulação computacional para a prensagem uniaxial de alumina utilizando coeficiente de atrito igual a 0,25¹¹⁹

3.4 – Metodologias e ferramentas para a construção do modelo de suporte à tomada de decisões

A tomada de decisões é um processo usual no nosso cotidiano, podendo envolver questões simples (disputar um “cara ou coroa” em um lançamento de uma moeda) com poucas conseqüências ou questões complexas como as que envolvem aspectos econômicos, tecnológicos, políticos, sociais e ambientais.

Porém, a tomada de decisões por pessoas e/ou organizações tem-se tornado um desafio cada vez maior, conforme descrito por RUSSO e SHOEMAKER¹²⁸, decorrente de uma série de características que interagem no ambiente de tomada de decisão, tais como: sobrecarga de informações, ritmo acelerado de mudanças, incerteza crescente, poucos precedentes históricos, decisões mais freqüentes, decisões mais importantes, metas conflitantes, mais oportunidades de falha de comunicações, apostas mais altas, menos oportunidades de corrigir os erros.

3.4.1 – Tipos de problemas de tomada de decisão

Os problemas de tomada de decisão, pode ser classificados em três categorias^{129,130}:

- A) Estruturado: Suas definições de fase de operação para chegar aos resultados desejados estão bem claras e, sua execução repetida é sempre possível (algoritmo bem definido);
- B) Semi-estruturados: São os problemas com operações bem conhecidas, mas que contêm algum fator ou critério variável que pode influir no resultado;
- C) Não estruturados: tanto os cenários, como os critérios de decisão, não estão fixados ou conhecidos a priori.

3.4.2 – Formulação de um modelo de decisão

O primeiro passo a ser tomado no processo decisório, é a correta formulação do problema. Conforme definido por CAMPOS^{131,132} “Problema é um resultado indesejável de um processo”, sendo que uma formulação inadequada do problema pode levar a redução da eficiência e da eficácia do resultado¹³⁰.

O processo de decisão, conforme indicado por MONKS¹³³ deve seguir os seguintes passos, conforme mostrado na figura 53.

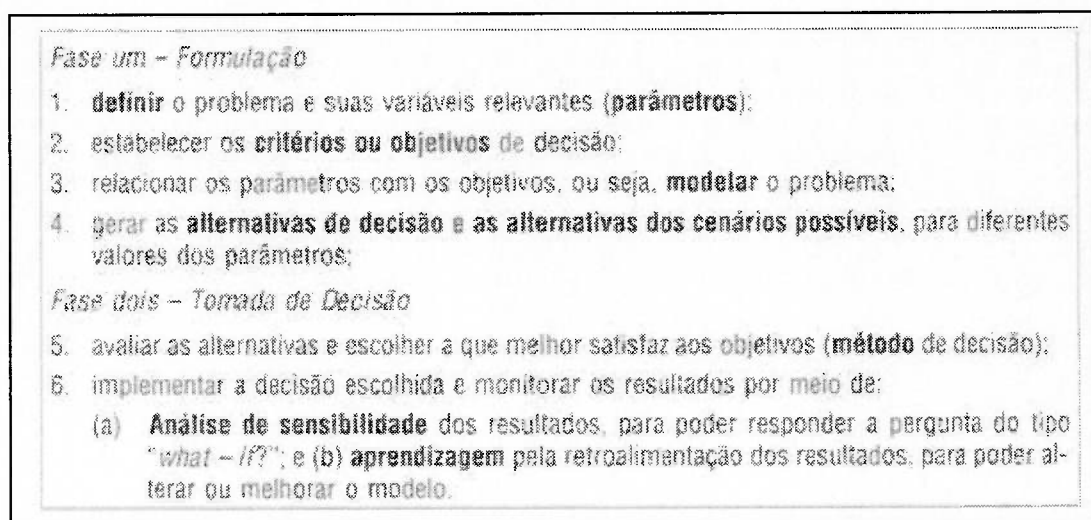


Figura 53 – Passos para o processo de tomada de decisão¹³⁰

3.4.2.1 - Metodologias de decisão

A escolha de um modelo ou de uma metodologia depende da finalidade da decisão, da limitação do tempo, custo e da complexidade do problema em análise. Pode-se considerar um problema complexo quando:¹³⁰

- O número de variáveis e/ou objetivos são elevados;
- A ocorrência das variáveis e/ou objetivos está sujeita a risco ou incerteza;
- As variáveis e/ou objetivos são definidos de modo impreciso, nebuloso ou difuso;

3.4.2.2 – Sistema de apoio à decisão

Sistemas de suporte à decisão (DSS – “Decision Support System”) são conjuntos de procedimentos baseados em modelos para processar dados e analisar problemas¹²⁹, tendo a finalidade de dar assistência aos administradores e tomadores de decisão, procurando obter resultados eficazes no planejamento de longo, médio e curto prazos.

Basicamente, um sistema de apoio à decisão é composto por 3 módulos básicos: um sistema de linguagem, um sistema de conhecimento e um sistema para processar problemas. Porém um ponto importante de um DSS é que a finalidade deste sistema não é tomar decisões¹³⁰; mas sim, auxiliar a missão de decidir, com informações para se identificar, formular, conhecer e avaliar alternativas, visando melhorar a tomada de decisão.

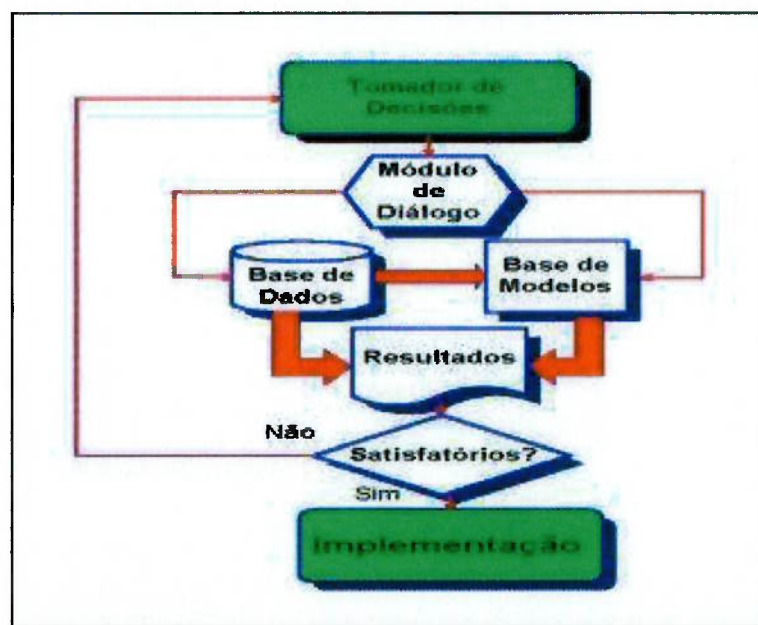


Figura 54 – Estruturação de um sistema DSS (Sistema de Suporte a Decisão)¹³⁰

3.4.2.3 - Tipos de modelos¹³⁴:

- **Modelos icônicos:** Modelos em que se varia a escala para representar um sistema;
- **Modelos analógicos:** As propriedades do sistema são representadas por outras equivalentes (por exemplo, a representação de um sistema mecânico por um correspondente sistema elétrico);
- **Modelos simbólicos ou abstratos:** Quando a semelhança com o sistema em estudo é apenas conceitual ou simbólica:
 - **Matemáticos:** Quando são analisados por um conjunto de equações matemáticas;
 - **Diagramáticos:** Que as características do sistema em estudo são representadas por diagramas (como nos modelos de simulação).

Os problemas de cunho ambiental, em decorrência das questões normalmente envolvidas em sua estruturação, são considerados problemas complexos com várias questões envolvidas (aspectos tecnológicos, logísticos, administrativos, econômicos e ambientais), logo, uma abordagem científica apoiada em ferramentas das áreas de pesquisa operacional*, ciência da administração e engenharia da qualidade, obtém resultados de compromisso que sejam convergentes e que satisfaçam à maioria das condições de contorno impostas.

* **Pesquisa operacional:** Este termo foi cunhado durante a II Guerra mundial, dos esforços Britânicos para otimizar as instalações de radar; tendo sua origem nos termos “operational research” ou “operations research” sendo que o termo “management science” também é um sinônimo.^{134,142,152}

3.4.3 – Modelo de programação linear, visando a otimização de resultados na tomada de decisões

A programação linear é uma técnica de planejamento, e de apoio a tomada de decisão, sendo atualmente uma das mais utilizadas em pesquisa operacional, se consolidando pelo trabalho desenvolvido por GEROGÉ DANTZIG^{136,137,138} que trabalhando na empresa RAND Corporation (Santa Mônica, CA) em 1947, desenvolveu o método Simplex (algoritmo Simplex*), capaz de solucionar os problemas de programação linear.

Do ponto de vista histórico, as bases matemáticas dos modelos lineares foram estabelecidas a mais de 100 anos atrás¹⁴³ por JORDAN (em 1873), MINKOWSKI (em 1896) e FARKAS (em 1903). Porém, com o surgimento do computador¹³⁵ em 1951 a programação linear encontrou o instrumento capaz de torná-la acessível e popular.

Em metalurgia, a utilização de programação linear tem um vasto campo de aplicações indo desde problemas de abastecimento, logística de manuseio de minérios, determinação de composições ótimas de misturas (blendagem) de sínteres ou de cargas de altos-fornos passando por cálculos de adição de ligas e cálculos de balanços energéticos^{139,140}.

* **Método Simplex:** O algoritmo simplex é um dos mais eficientes métodos para a resolução de problemas de programação linear; sendo que a descrição detalhada dos passos deste método é apresentada em vários livros de pesquisa operacional e otimização de processos^{134,136,137}

3.4.3.1 - Definições

Matematicamente, uma função é dita linear¹³⁷, se a função $f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ de $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$; possa ser expressa na forma: $f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + \dots + c_nx_n$; onde: $c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$ são constantes.

Para qualquer função linear $f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ e para qualquer número b ; as inequações: $f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \geq b$ e $f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \leq b$, são denominadas de inequações lineares.

Os problemas de programação linear possuem as seguintes configurações e podem ser representados matematicamente de 4 maneiras equivalentes como mostrado a seguir.

- Se maximize (ou minimize) uma função linear contendo variáveis de decisão. A função a ser maximizada ou minimizada é denominada de função objetivo;
- Os valores das variáveis de decisão devem satisfazer uma série de limites, onde cada restrição é uma equação ou inequação linear.
- Uma restrição de sinal está associada com cada variável, indicando para cada variável x_i se esta é positiva ou nula ($x_i \geq 0$) ou se ela é negativa ($x_i < 0$).

a) Formulação algébrica ou canônica:

$$\text{Maximize: } f(x) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (46)$$

$$\text{Sujeito a: } a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \quad (47)$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2 \quad (48)$$

(...)

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n = b_m \quad (49)$$

$$x_i \geq 0 \text{ para } i = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$b_j \geq 0 \text{ para } j = 1, 2, 3, \dots, m$$

b) Forma cartesiana:

$$\text{Maximize: } \sum_{j=1}^n c_j x_j ; \text{ sujeito a :} \quad (50)$$

$$\text{Sujeito a: } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i ; \text{ para } i = 1, 2, 3, 4, \dots, m \quad (51)$$

$$x_j \geq 0 \text{ para } j = 1, 2, 3, \dots, n$$

c) Formulação matricial:

$$\text{Maximize: } f = \mathbf{c}^T \mathbf{x} \quad (52)$$

$$\text{Sujeito a: } \mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (53)$$

$$\mathbf{x} \geq 0, \mathbf{b} \geq 0$$

d) Forma vetorial

$$\text{Maximize : } f = \mathbf{c}^T \mathbf{x} \quad (54)$$

$$\text{Sujeito a: } x_1 P_1 + x_2 P_2 + \dots + x_n P_n \leq P_0 \quad (55)$$

$$x_j \geq 0 \text{ (} j = 1, 2, 3 \dots n \text{)}$$

$$\mathbf{c} = (c_1, c_2, \dots, c_n)$$

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$$P_j = (a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{mj})$$

$$P_0 = (b_1, b_2, \dots, b_m)$$

Observação: Para a minimização, basta multiplicar $f(x)$ por (-1)

3.4.3.2 – Algoritmo Simplex

O método Simplex pode ser esquematicamente descrito através de um algoritmo de comandos e procedimentos que busca a obtenção de soluções ótimas de problemas lineares. Esquematicamente, pode-se representar o algoritmo da seguinte forma conforme apresentado pelo fluxo da figura 55.

Sejam $N = (1, 2, 3, \dots, n)$ o conjunto dos índices das colunas da matriz $A (a_{ij})$ e $M = (1, 2, 3, 4, \dots, m)$ o conjunto dos índices das linhas de A ; então:

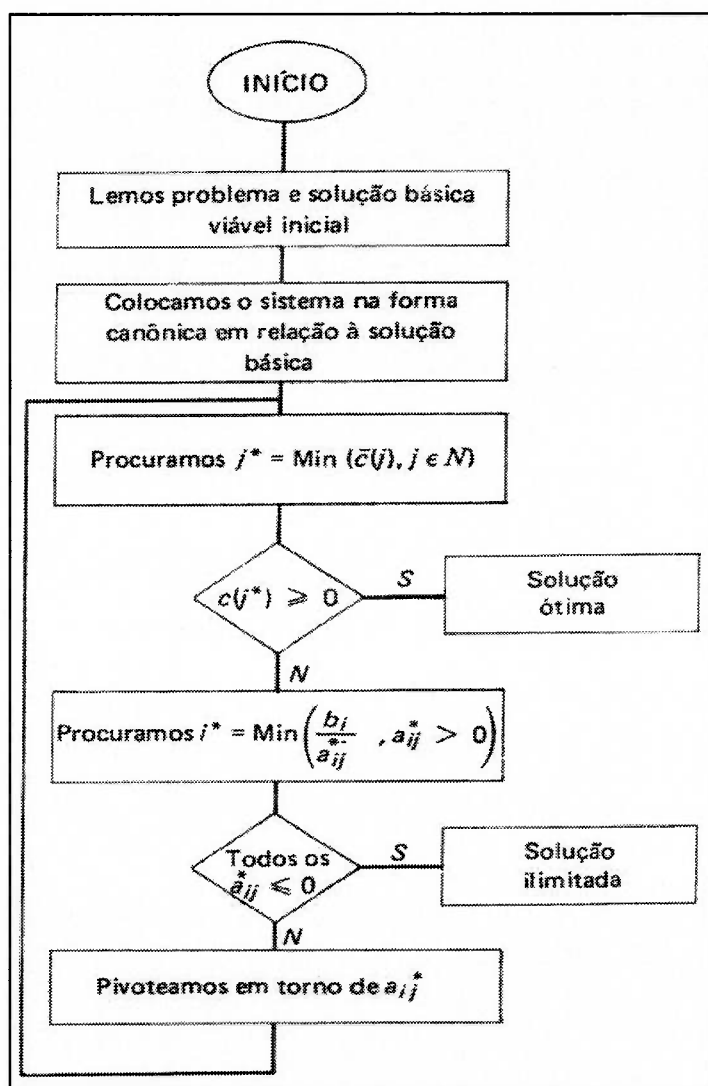


Figura 55 – Fluxograma de comandos para implementação do algoritmo Simplex¹³⁸

O Simplex parte de uma solução básica viável, para isto é necessário realizar os seguintes passos, conforme descrito por FILHO e PEREIRA.¹³⁸

- a) Estabelece as equações lineares que representam o problema de programação linear (PPL);
- b) Adicione uma variável artificial x_j a cada equação (existem, portanto, m novas variáveis: x_j varia de x_{n+1} a x_{n+m}). Essas variáveis são, em geral, distintas das variáveis de folga da equação;
- c) Coloca-se uma nova função objetivo: (por exemplo)

Min $w = x_{n+1} + x_{n+2} + \dots + x_{n+m}$, ficando o problema assim descrito:

$$\text{Min } w = \left\{ \begin{array}{ll} & x_{n+1} + \dots + x_{n+m} \\ a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n & x_{n+1} \quad (\dots) \\ a_{m1}x_1 + \dots + a_{mn}x_n & (\dots) x_{n+m} \\ c_1x_1 + \dots + c_nx_n & + (-z) \end{array} \right\} \quad (56)$$

As variáveis básicas iniciais seriam: $(x_{n+1} + \dots + x_{n+m}, -z)$. Como o sistema ainda não está na forma canônica (os coeficientes das variáveis básicas na função objetivo são diferentes de zero) é necessário realizar o pivotamento em torno da variável básica, para eliminá-las da função objetivo. Desta forma a função objetivo pode ser escrita como:

$$(-w) - \sum_{i=1}^m a_{i1}x_1 - \sum_{i=1}^m a_{i2}x_2 - (\dots) - \sum_{i=1}^m a_{in}x_n = - \sum_{i=1}^m b_i \quad (57)$$

A solução inicial, portanto, é:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Variáveis} \\ \text{Básicas:} \end{array} \right\} \begin{array}{l} x_{n+1} = b_1; x_{n+2} = b_2; (\dots) ; x_{x+m} = b_m \end{array} \quad (58)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Variáveis} \\ \text{não básicas:} \end{array} \right\} \begin{array}{l} - z = 0 \end{array} \quad (59)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Variáveis} \\ \text{não básicas:} \end{array} \right\} \begin{array}{l} x_1 = x_2 = (\dots) = x_n = 0 \end{array} \quad (60)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Valor de w:} \end{array} \right\} \begin{array}{l} w = \sum_{i=1}^m b_i \end{array} \quad (61)$$

Se o problema original tiver solução viável, as variáveis artificiais são desnecessárias nas equações podendo ser eliminadas no decorrer do algoritmo Simplex. Portanto, a solução ótima do problema modificado é: $w^* = 0$. Em resumo, temos:

- Se: $w^* > 0$; Pelo menos uma das variáveis artificiais permaneceu na base; logo o problema não tem solução;

- Se: $w^* = 0$; As variáveis artificiais são não básicas ou básicas e degeneradas (valor igual a zero). Logo o problema terá solução.

3.4.3.3 - Matriz MPS (Mathematical Programming System)

Uma outra forma bastante utilizada para representar um problema de programação linear é pelo uso da chamada representação matricial MPS¹³⁴ (Mathematical Programming System), que possui um formato universal para a entrada de dados do tipo MPS. A construção desta matriz facilita e organiza a entrada de dados do modelo e sua utilização em softwares comerciais como o LINDO[®], MPSX-IBM ou mesmo planilhas como a função Solver do MS Excel[®].

Tabela XXIII – Estrutura típica de uma matriz MPS

Variáveis	Y_1	Y_2	(...)	Y_m	Sinal	RHS	Range
Custo	C_1	C_2	(...)	C_m	=		
Produção	P_1	P_2	(...)	P_m	< ou >	Z_0	R_0
X_1	A_1	A_2	(..)	A_m	< ou >	Z_1	R_1
X_2	B_1	B_2	(..)	B_m	< ou >	Z_2	R_2
(...)			(...)		< ou >	(...)	(...)
X_n	K_1	K_2	(...)	K_m	< ou >	Z_n	R_n
Mínimo	Mi_1	Mi_2	(...)	Mi_m			
Máximo	Ma_1	Ma_2	(...)	Ma_m			

Onde:

- Y_1, Y_2, \dots, Y_m - são variáveis (ex. tipos de minérios, tipos de ligas, etc.);
- C_1, C_2, \dots, C_m - são respectivamente os custos das variáveis Y_1 a Y_m ;
- P_1, P_2, \dots, P_m - são respectivamente as produções das variáveis Y_1 a Y_m ;
- X_1, X_2, \dots, X_n - são componentes das variáveis Y_1 a Y_m (ex. composição química, número de peças, etc.);
- Mi_1, Mi_2, \dots, Mi_m - são as condições de contorno (valor mínimo possível para as variáveis Y_1 a Y_m);
- Ma_1, Ma_2, \dots, Ma_m - são as condições de contorno (valor máximo possível para as variáveis Y_1 a Y_m);
- Sinal: são as condições de igualdade ou desigualdade para uma dada condições de contorno dos componentes X_1 a X_n ou da produção;
- RHS (right hand side) - são os valores de Z_0 a Z_n , limites das equações ou inequações (valor máximo respectivamente para X_1 a X_n);
- Ranges - são os valores de R_0 a R_n , valores os quais se devem subtrair os valores máximos (Z_0 a Z_n respectivamente) para se determinar os valores mínimos de uma dada condição de contorno dos componentes X_1 a X_n e/ou P_1 a P_n .

3.5 - Seleção de métodos multicriteriais para a priorização dos resíduos siderúrgicos

A análise multicriterial tem sua origem nos estudos desenvolvidos por PARETO em 1896 que examinou um problema de agregação de critérios em um critério simples, definindo também o conceito da eficiência entre duas alternativas de decisão¹⁴³. Seus estudos determinaram a separação/priorização das muitas causas triviais das poucas causas principais, através da construção gráfica padronizada e ordenada das variáveis em função de sua frequência estatística.

Atualmente há algumas dezenas de métodos e programas computacionais de auxílio à tomada de decisões^{142,143,146}. De acordo com ZUFFO APUD PARDALOS et al. pode-se classificar os métodos de análise multicriterial em 4 grupos:

- Programação matemática multiobjetivo (PMM): busca-se a determinação de soluções ótimas (maximização ou minimização) das funções objetivos sujeitas a uma série de restrições;
- Teoria da utilidade multiatributo (MAUT): busca-se modelar as preferências do decisor através de uma função de valor ou de uma função de utilidade (modelamento através de incertezas);
- Relações das aproximações hierárquicas: esta classe baseia-se na representação relacional das preferências do decisor (DM);
- Métodos baseados na desagregação de preferências: esta família utiliza freqüentemente a análise, modelamento e estimação das preferências do tomador de decisão.

Tabela XXIV – Alguns dos principais métodos multicriteriais de auxílio à tomada de decisão¹⁴³

Classe	Sigla/Nomes dos métodos
Programação matemática multiobjetivo (PMM):	MRPA – Multiple reference point approach; LMM – Linear multiobjective method (simplex de Philip); LMOIP – Linear multiple objective integer programming; PPC – Programação por compromisso; FCP-I – Fuzzy compromise programming; MSM – Multiobjective statistic method; CGT – Cooperative game theory.
Teoria da utilidade multiatributo (MAUT):	MAUT – Multiattribute utility theory; PROTRADE – Probabilistic tradeoff development Method ARIADNE – Alternative ranking interactive aid based on dominance structural information elicitation; AHP – Analytical hierarchy process.
Relações das aproximações hierárquicas:	PROMETHEE (I a V) – Preference ranking organization methods for enrichment evaluations; ELECTRE (I a IV) – Elimination et coix traduisant la réalité.
Métodos baseados na desagregação de preferências:	UTA – Utility additive; MORALS – Multiple optional regression by alternating least squares; CORALS – Canonical optimal regression by alternating least squares.

3.5.1 - Método AHP (Processo de hierarquização analítica)

O método AHP teve seu desenvolvimento iniciado por THOMAS L. SAATY no início da década¹⁴⁴ de 1970, quando SAATY trabalhava em problemas de planejamento de contingências no departamento de defesa dos EUA. O método passou a ganhar notoriedade quando da publicação do livro: “The Analytic Hierarchy Process” em 1980 pela editora McGraw-Hill*.

Segundo MORITA¹⁴⁴ pode-se caracterizar o método AHP segundo algumas características básicas:

- A abordagem da solução é do tipo “dividir para conquistar”;
- Usam-se julgamentos dos fatores de decisão por comparação aos pares;
- O resultado final permite definir uma seqüência cardinal (com graduações: nota, pontuação ou medida);
- É aplicável aos problemas orientados por múltiplos critérios ou objetivos estruturados hierarquicamente;
- É aplicável a questões complexas ou que envolvem julgamentos subjetivos;
- É capaz de lidar ou absorver julgamentos inconsistentes;
- O resultado não extrapola os limites do conjunto de alternativas pré-estabelecidas;
- Não obriga que os fatores sejam necessariamente representados em termos de valores econômico-financeiros, técnicos ou físicos;
- Sua aplicação prática é baseada em cálculos relativamente simples.

* Na década de 1990, uma coletânea de VI volumes denominada: “The Analytic Hierarchy Process Series” foi publicada pela editora RWS Publications de Pittsburgh, contendo uma extensa descrição do método, exemplos de aplicações e cópias de artigos indexados.^{149,150,151,155,156}



Figura 56 - Vantagens do processo de hierarquização analítica¹⁴⁴

3.5.2 - Passos para a construção e solução de um problema de priorização usando-se o método AHP

As etapas necessárias para a construção de um modelo de priorização e a solução deste modelo de priorização envolvendo critérios múltiplos através do método AHP, segue os seguintes passos conforme descrito por SAATY¹⁴⁹ e ANDERSON et al.¹⁴²

1º Passo: Definição do problema e especificação da solução desejada;

2º Passo: Construção do modelo de hierarquização, definição dos objetivos, critérios e alternativas de forma hierárquica. Estruturação da hierarquia do ponto de vista global (partindo dos pontos de maior nível para níveis inferiores, os quais se pode intervir para a solução do problema);

3º Passo: Construção de uma matriz de comparação paritária, que apresenta as contribuições relevantes, ou impactos de cada elemento que governa os critérios nos níveis mais elevados:

- Comparação paritária de cada critério (seguindo uma escala de comparação para as preferências);
- Construção da matriz de comparação;
- Síntese dos julgamentos;
- Determinação da consistência dos julgamentos;
- Estimativa da razão de consistência;

4º Passo: Definição da escala de prioridades dos critérios ou alternativas.

3.5.3 - Comparações paritárias: escala, consistência e autovetores

A teoria básica do processo de análise hierárquica é baseada em teoremas, corolários e definições matemáticas que tratam da comparação paritária (dois a dois) dos julgamentos e dos critérios definidos na construção do modelo de priorização. Uma extensa descrição e desenvolvimento destas bases matemáticas são definidas por SAATY^{149,151} e foram estudadas por MORITA¹⁴⁴. Neste trabalho iremos apresentar de forma mais simplificada as bases teóricas do método AHP.

a) Descrição matemática do processo de comparação paritária

Em comparações paritárias onde se utiliza uma escala de números absolutos, para se estimar o quão mais importante ou maior é um atributo ou critério em relação ao outro, pode se representar estas comparações da seguinte forma:

Sejam:

- C_1, \dots, C_n – critérios hierárquicos;
- n – número de critérios;
- a_{ij} , um valor numérico indicando o grau de preferência do critério C_i sobre o critério C_j ;
- w_i e w_j - peso relativos.

Teremos então:

- $a_{ij} = w_i / w_j$, com $(i, j) = 1, 2 \dots n$;
- $a_{ji} = 1 / a_{ij}$ seu recíproco.

Logo: a comparação paritária entre vários critérios pode ser expressa na forma matricial, onde:

$$Aw = nw \tag{62}$$

$A = (a_{ij})$ matriz quadrada de comparação aos pares (elementos a_{ij})

w - vetor dos pesos relativos ou de prioridades

critérios	C_1	C_2	(...)	C_n			
C_1	w_1/w_1	w_1/w_2	(...)	w_1/w_n	w_1		w_1
C_2	w_2/w_1	w_2/w_2	(...)	w_2/w_n	w_2	=	w_2
(...)			(...)		(...)		(...)
C_n	w_n/w_1	w_n/w_2	(...)	w_n/w_n	w_n		w_n

Ou

Critérios	C_1	C_2	(...)	C_n			
C_1	1	a_{12}	(...)	a_{1n}		w_1	
C_2	$1/a_{12}$	1	(...)	a_{2n}		w_2	
(...)			(...)			(...)	
C_n	$1/a_{1n}$	$1/a_{2n}$	(...)	1		w_n	

$$= n \begin{array}{|c} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_n \end{array}$$

b) Escala linear de comparação paritária

Em 1846 ERNEST H. WEBER formulou sua lei através das observações de medidas de magnitudes dos estímulos (s) e seus incrementos (Δs) capazes de indicar a discriminação entre um estímulo (s) e o acréscimo deste ($s + \Delta s$). Uma variação na sensação (percepção do estímulo ou fato) só é observada quando o estímulo é acrescido por uma quantidade mínima (Δs) constante do próprio estímulo anterior, onde a razão $r = \Delta s / s$ não depende do estímulo (s). Esta lei é válida somente quando o estímulo não é exageradamente grande ou muito pequeno.

Em 1860, FECHENER apresenta uma equação onde o estímulo mínimo percebido é s_0 e o primeiro estímulo seguinte distinguível é s_1 , podendo ser descrita da seguinte forma.

Estímulo inicial: s_0

$$\text{Estímulo distinguível: } s_1 = s_0 + \Delta s_0 \quad (63)$$

$$s_0 + (\Delta s_0 / s_0) s_0 \quad (64)$$

$$s_0 + (r) s_0 \quad (65)$$

$$s_0 (1+r) \quad (66)$$

$$\text{Estímulo distinguível seguinte: } s_2 = s_1 + \Delta s_1 \quad (67)$$

$$s_1(1 + r) \quad (68)$$

$$s_0 (1 + r)^2 \cong s_0 k^2 \quad (69)$$

$$\text{Generalizando: } s_n = s_{(n-1)} k = s_0 k^n, n= 0,1,2,3 \dots \quad (70)$$

$k = \text{constante}$

$$\text{Resolvendo para } n \text{ temos: } n = (\log s_n - \log s_0) / \log k \quad (71)$$

Onde se obtém a relação de WEBER-FECHNER, expressa por:

$$M = a \log (s) + b, a \neq 0 \quad (72)$$

Portanto, a sensação é uma função linear do logaritmo do estímulo, onde: M é a sensação, (s) o estímulo, a e b são constantes.

SAATY¹⁵¹ deduziu que a escala de julgamentos a ser utilizada é unitária para quando os elementos comparados são iguais entre si, 2 para a primeira distinção possível entre os elementos comparados e assim por diante até o número 9.

* **Weber:** Observou, por exemplo, que pessoas quando seguravam em suas mãos diferentes massas, podiam diferenciar uma massa de 20 g de outra de 21 g. Por outro lado, estas pessoas não conseguiam diferenciar massas de 40 g das massas de 41 g, estas somente percebiam a diferença quando se aumentava a massa para 42 g ou mais.

Tabela XXV – Escala de comparações semânticas (inglês e português) da metodologia AHP (adaptado de SAATY¹⁴⁹)

Intensidade de importância	Definições	Tradução
1	Equal importance	Semelhantes ou iguais
3	Weak or moderate importance	Importância moderada ou fraca (pouco melhor)
5	Strong importance	Forte importância
7	Very strong or demonstrated importance	Importância comprovada ou importância muito forte
9	Extreme importance	Extremamente importante (absoluto)
2,4,6,8,	Intermediate values between adjacent scale values	Valores intermediários entre as escalas adjacentes

c) Consistência

A metodologia AHP permite trabalhar com subjetividades das preferências, entretanto, a qualidade da decisão final depende da consistência entre os julgamentos. Uma matriz de comparação é consistente se seus elementos respeitam a seguinte relação de transitividade: $a_{ik} * a_{kj} = a_{ij}$.

De uma forma geral, não é esperado que as pessoas tenham julgamentos totalmente consistentes. Porém a metodologia AHP requer um nível mínimo de consistência para que resultado final seja significativo.

A medida da consistência é determinada pelo cálculo da razão de consistência, definida como RC. Este indicador fornece ao tomador de decisão (DM)

a necessidade ou não de revisão dos julgamentos para cada matriz de comparação formulada.

$$RC = IC/IR, \text{ onde:} \quad (73)$$

RC – Razão de consistência

IC – Índice de consistência

IR – Índice aleatório (random index)

Temos:

$$\left\{ \begin{array}{l} IC = (\lambda_{\text{máx.}} - n) / (n-1) \\ A w = \lambda_{\text{máx.}} w \end{array} \right. \quad (74)$$

$$A w = \lambda_{\text{máx.}} w \quad (75)$$

$$IR = 1,98(n-2)/n = 1,98(1-(n-1)/(n(n-1)/2)) \quad (76)$$

Tabela XXVI – Índice aleatório (IR) em relação ao número total de critérios analisados

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
IR	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49	1,51

Como o método AHP usa o valor do autovetor para determinar os pesos dos elementos de um grupo (determinar os pesos de uma matriz de comparação aos pares), o vetor de prioridades w é definido pela solução da equação matricial.

$$A w = \lambda_{\text{máx}} w, \text{ onde:} \quad (77)$$

$\lambda_{\text{máx}}$ – é o maior autovalor*** da matriz A

* JOHN DESCHUTER¹⁵¹ conjecturou a formulação do índice aleatório equação (76)

d) Autovetores e autovalores^{148,153}

Definições:

- **Autovetor:** Um autovetor de uma matriz \mathbf{A} , ($n \times m$), é um vetor não nulo x , tal que $\mathbf{A} x = \lambda x$, para qualquer escalar λ .

$$\mathbf{A} x = \lambda x \quad (78)$$

Os autovetores também são chamados de vetores próprios, característicos ou latentes;

- **Autovalor:** Um escalar λ é denominado de autovalor para \mathbf{A} se existe solução não trivial x para $\mathbf{A}x = \lambda x$, esta variável x é chamado de *autovetor associado a λ* .

Os autovalores também são chamados de valores próprios, característicos ou latentes;

- **Equação característica:** Seja $f(\lambda) = |\lambda \mathbf{I}_n - \mathbf{A}| = 0$; (79)
onde λ é um escalar e \mathbf{I}_n a matriz identidade.

- **Polinômio característico da matriz \mathbf{A} :**

$$f(\lambda) = |\lambda \mathbf{I}_n - \mathbf{A}| = \lambda^n + a_1 \lambda^{n-1} + a_2 \lambda^{n-2} + (\dots) + a_{n-1} \lambda + a_n \quad (80)$$

Alguns programas de computador como o Mathematica e o Maple, podem usar cálculos simbólicos para determinar o polinômio característico de uma matriz de tamanho moderado (algoritmo QR ou o algoritmo de Jacobi). Mas, não existe fórmula nem algoritmo finito que resolva a equação característica de uma matriz genérica $n \times n$, para n maior ou igual a 5. Já o programa MATLAB utiliza métodos numéricos iterativos para cálculo de autovetores e autovalores. Existem também, outros métodos matemáticos para a solução do polinômio característico, como o método das potências e o método das potências inversas^{148,154}.

Em função da complexidade de se realizar cálculos matriciais, para a determinação de autovalores; pode-se aplicar o algoritmo apresentado por SAATY e KEARNS¹⁵⁶ ou ANDERSON, SWEENEY e WILLIAMS¹⁴² para as determinações da síntese de julgamentos e análise de consistência, conforme descrito pelos passos a seguir.

1º Passo: Soma dos valores de cada coluna de uma matriz de comparações paritárias; onde A,B, e C sejam critérios de comparações.

Seja a matriz A (matriz de comparações paritárias), definida por:

	A	B	C
A	$a_{11} = 1$	a_{12}	a_{13}
B	$a_{21} = 1/a_{12}$	$a_{22} = 1$	a_{23}
C	$a_{31} = 1/a_{13}$	$a_{32} = 1/a_{23}$	$a_{33} = 1$
Total	$S_a = a_{11} + a_{21} + a_{31}$	$S_b = a_{12} + a_{22} + a_{23}$	$S_c = a_{13} + a_{23} + a_{33}$

(81)

2º Passo: Dividir cada elemento a_{ij} da matriz de comparações paritárias pelo valor da soma das colunas: S_a , S_b e S_c , respectivamente.

	A	B	C
A	$a_{11} / (a_{11} + a_{21} + a_{31})$	$a_{12} / (a_{12} + a_{22} + a_{23})$	$a_{13} / (a_{13} + a_{23} + a_{33})$
B	$a_{21} / (a_{11} + a_{21} + a_{31})$	$a_{22} / (a_{12} + a_{22} + a_{23})$	$a_{23} / (a_{13} + a_{23} + a_{33})$
C	$a_{31} / (a_{11} + a_{21} + a_{31})$	$a_{32} / (a_{12} + a_{22} + a_{23})$	$a_{33} / (a_{13} + a_{23} + a_{33})$
Total	$S'_a = 1$	$S'_b = 1$	$S'_c = 1$

(82)

(*) Nota-se que todas as colunas ficam normalizadas, com as somas (S'_a ; S'_b e S'_c)=1

3º Passo: Computa-se a média das linhas da matriz de comparação paritária, esta nova coluna será denominado de vetor de consistência.

	A	B	C	Média
A	a_{11} / S_a	a_{12} / S_b	a_{13} / S_c	$M_A = (a_{11}/S_a + a_{12}/S_b + a_{13}/S_c)/3$
B	a_{21} / S_a	a_{22} / S_b	a_{23} / S_c	$M_B = (a_{21}/S_a + a_{22}/S_b + a_{23}/S_c)/3$
C	a_{31} / S_a	a_{32} / S_b	a_{33} / S_c	$M_C = (a_{31}/S_a + a_{32}/S_b + a_{33}/S_c)/3$
Total	$S'_a = 1$	$S'_b = 1$	$S'_c = 1$	

$$M = \begin{bmatrix} M_A \\ M_B \\ M_C \end{bmatrix} \quad (84)$$

4º Passo: Estimando a razão de consistência: Multiplicar cada valor da primeira coluna da matriz de comparações paritária (A), pela prioridade relativa do primeiro item considerado e assim sucessivamente. A soma destes vetores será o novo vetor de pesos (P), conforme indicado a seguir.

$$P = M_A \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ a_{31} \end{bmatrix} + M_B \begin{bmatrix} a_{12} \\ a_{22} \\ a_{23} \end{bmatrix} + M_C \begin{bmatrix} a_{13} \\ a_{23} \\ a_{33} \end{bmatrix} \quad (85)$$

$$P = \begin{bmatrix} M_A a_{11} + M_B a_{12} + M_C a_{13} \\ M_A a_{21} + M_B a_{22} + M_C a_{23} \\ M_A a_{31} + M_B a_{23} + M_C a_{33} \end{bmatrix} \quad (86)$$

5º Passo: Dividem-se os elementos do vetor (P) - (equação: 86); pelo correspondente valor das prioridades (M_A , M_B e M_C), produzindo o novo vetor P'.

$$P' = \begin{bmatrix} (M_A a_{11} + M_B a_{12} + M_C a_{13}) / M_A \\ (M_A a_{21} + M_B a_{22} + M_C a_{23}) / M_B \\ (M_A a_{31} + M_B a_{23} + M_C a_{33}) / M_C \end{bmatrix} \quad (87)$$

6º Passo: Calcula-se o valor de λ_{\max} . (autovalor), onde:

$$\lambda_{\max} = \left| \begin{array}{l} \{[(M_A a_{21} + M_B a_{22} + M_C a_{23}) / M_B + (\dots) + \\ (M_A a_{21} + M_B a_{22} + M_C a_{23}) / M_B + (\dots) + \\ (M_A a_{31} + M_B a_{23} + M_C a_{33}) / M_C]\} / n \end{array} \right| \quad (88)$$

(*) n é a ordem da matriz quadrada (nxm) de comparações paritárias; n=3.

7º Passo: Calcula-se o índice de consistência IC (equação: 74), onde:

$$IC = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) = (\lambda_{\max} - 3) / (3 - 1) = (\lambda_{\max} - 3) / 2 \quad (89)$$

8º Passo: Calcula-se o valor de RC, (equação: 73, tabela XXVI), onde:

$$RC = IC / IR = [(\lambda_{\max} - 3) / 2] / 0,58 \quad (90)$$

9º Passo: Avalia-se o valor RC, que deve ser inferior a 0,10 (10%). Caso contrário, deve-se reavaliar as notas das comparações paritárias a_{ij} , uma vez que a inconsistência máxima permitida^{142,147} no método AHP é de 10%.

Uma aproximação para o cálculo da síntese dos julgamentos paritários a_{ij} , é o cálculo direto da raiz n-ésima do produto das notas a_{ij} das comparações entre os critérios, como mostrado na figura 57. Neste caso, podemos simplificar o cálculo onde:

$$P = \left| \begin{array}{l} (a_{11} \times a_{12} \times a_{13})^{(1/n)} \\ (a_{21} \times a_{22} \times a_{23})^{(1/n)} \\ (a_{31} \times a_{23} \times a_{33})^{(1/n)} \end{array} \right| \quad (86)$$

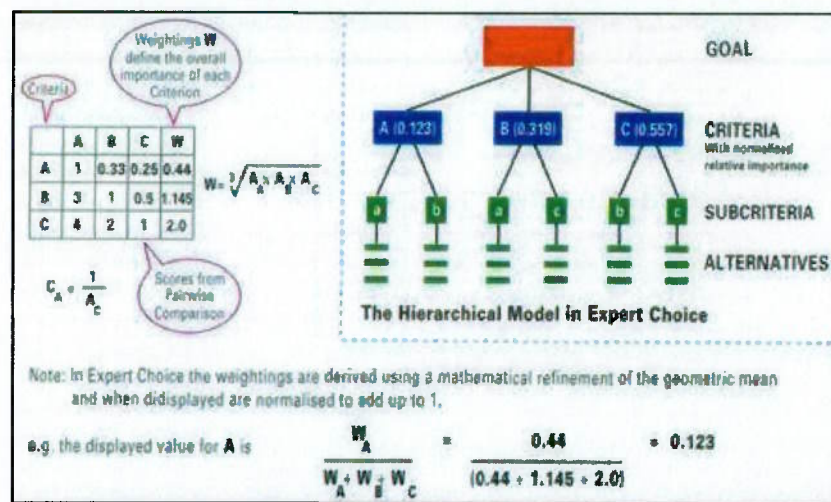


Figura 57 – Resumo da metodologia de cálculo do método AHP com as comparações paritárias realizada de forma simplificada¹⁴⁵ – (“Goal”: meta e objetivos; “criteria”: critérios; “subcriteria”: subcritérios ou critérios secundários; “alternatives”: alternativas”)

3.5.4 – Modelos Conjugados AHP e PL

A utilização de métodos conjuntos para a criação de ferramentas de tomada de decisão, já foi utilizado por O'BRIEN e GHODSYPOUR¹⁴⁷ na criação de uma sistema de suporte a decisão para a seleção de fornecedores. No caso de decisões que envolvem questões ambientais, a análise de custo-benefício ou de otimização linear, que buscam soluções ótimas nem sempre são as mais adequadas,¹⁴¹ em especial devido aos problemas de valoração das variáveis e/ou critérios envolvidas na tomada de decisões.

Em função disto, iremos apresentar no próximo capítulo, o desenvolvimento de um modelo de auxílio a tomada de decisão, empregando hierarquização analítica (AHP) e programação linear (PL) para a reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos contendo ferro, provenientes das etapas de elaboração, refino e transformação do aço em uma usina siderúrgica integrada.

4 - METODOLOGIA

4.1 - Introdução

A metodologia abordada neste trabalho pode ser dividida em 4 fases principais, visando obter algumas das respostas formuladas no primeiro capítulo deste trabalho. Estas 4 fases são apresentadas a seguir:

1ª Fase: Construção da base de dados para alimentação do modelo de reciclagem;

2ª Fase: Construção da base matemática do modelo de reciclagem dos resíduos sólidos siderúrgicos contendo ferro;

3ª Fase: Simulação de misturas e validação do modelo através de teste industrial com briquetes adicionados aos conversores LD's da COSIPA;

4ª Fase: Projeto (básico e detalhado) de uma unidade de reciclagem de resíduos industriais gerados durante as etapas de produção, refino e conformação do aço a partir das simulações realizadas.

Quanto à escolha das ferramentas utilizadas para a construção do modelo de reciclagem, vários aspectos devem ser analisados. Todos estes aspectos buscam levar em consideração parâmetros como: facilidade de uso, disponibilidade de informações sobre os métodos, aplicabilidade ao problema, robustez, utilidade, familiaridade, etc. A tabela XXVII apresenta as fases e ferramentas utilizadas no modelo em estudo.

Tabela XXVII - Macro descrição das fases do modelo proposto

Fase	Objetivos	Ferramentas utilizadas
1º Fase: Construção da base de dados para alimentação do modelo de	Levantamento de dados: - Processos metalúrgicos; - Resíduos siderúrgicos: (geração, equipamentos, ciclo de produção, etc.);	Análise estatística dos processos existentes: (histogramas, totalizações, dados históricos, média, desvios

reciclagem;	- Caracterizações químicas, estruturais e morfológicas dos resíduos siderúrgicos disponíveis para a reciclagem.	padrões); - Análise química e estrutural (difração de raios-X, MEV/EDS, análise granulométrica, etc.);
2º Fase: Construção da base matemática do modelo de reciclagem dos resíduos sólidos siderúrgicos contendo ferro;	- Desenvolver o produto e o processo de obtenção do mesmo; - Priorização dos resíduos; - Otimização das formulações (definições de condições de contorno das rotas tecnológicas de reciclagem).	- Metodologia AHP (processo de hierarquização analítica); - Otimização de sistemas lineares (Solver MS-Excel®).
3º Fase: Simulação de misturas e validação do modelo através de teste industrial com briquetes adicionados aos conversores LD's da Cosipa;	- Obter misturas de resíduos otimizadas, capazes de serem processadas em uma unidade de reciclagem industrial; - Avaliar os resultados obtidos; - Validar o modelo proposto;	Solução do modelo de reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos construído;
4º Fase: Projeto (básico e detalhado) de uma unidade de reciclagem de resíduos industriais gerados durante as etapas de produção, refino e conformação do aço a partir das simulações realizadas.	- Desenvolver uma solução integrada e integral para a reciclagem dos resíduos siderúrgicos sólidos contendo ferro (escopo do projeto básico e detalhado da unidade de reciclagem)	Ferramentas de administração de projetos, estatísticas e financeiras: - Balanços de massa, de energia; - Orçamentos de equipamentos, cálculos financeiros, taxa interna de retorno, etc.

Todas estas ferramentas interagem entre si de modo permitir a construção de um modelo de reciclagem de resíduos siderúrgicos robusto, otimizado e confiável; respeitando as condições de contorno impostas pelos processos metalúrgicos e de processamento dos materiais particulados. A figura 58 apresenta de forma esquemática as inter-relações entre as ferramentas utilizadas no modelo.

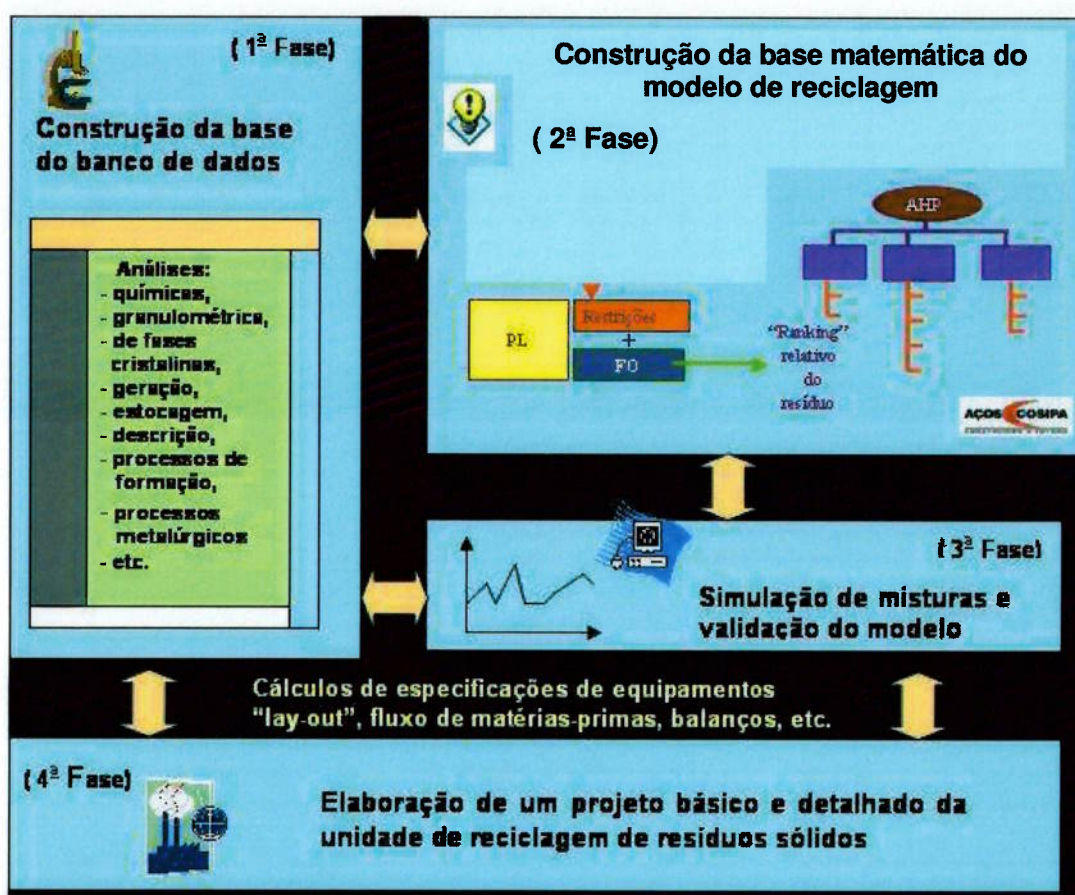


Figura 58 – Modelo de reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos

5 – DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

5.1 - 1ª Fase: Construção da base do modelo de reciclagem dos resíduos siderúrgicos sólidos contendo ferro

5.1.1 – Descrição e caracterização dos resíduos siderúrgicos contendo ferro

Os resíduos siderúrgicos sólidos disponibilizados pela COSIPA para a realização deste estudo de reciclagem são gerados durante as várias etapas dos processos metalúrgicos de produção, tratamento e transformação do gusa em aço e deste, em produtos acabados (placas, chapas, boinas e tiras). As várias tabelas apresentadas nesta seção trazem informações importantes não só para descrever os resíduos, mas, sobretudo porque estas informações irão alimentar o modelo de priorização construído e também irão delinear as condições de contorno das simulações através de programação linear.

Tabela XXVIII - Resíduos: nomenclatura e siglas

Sigla	Descrição	Unidade de Geração
LOGFF	Lama da estação de tratamento de águas da aciaria #2 (fração fina)	Aciaria #2
LOGFG	Lama da estação de tratamento de águas da aciaria #2 (fração grossa)	Aciaria #2
CMEA	Carepa da máquina de escarfagem automática	Aciaria #2
CMLC	Carepa da máquina de lingotamento contínuo	Aciaria #2
POSEC	Pós do sistema de despoejamento secundário da aciaria	Aciaria #2
PEDG2	Pós da estação de dessulfuração de gusa da aciaria#2	Aciaria #2
POCAL	Pó de cal	Calcinações 1 e 2
CALADR	Cal do ADR (área de disposição de resíduos)	Calcinação 1, 2 e 3
PODOL	Pó de dolomita	Calcinação 3
SOLCAL	Solução de cal (lama)	Calcinação 1 e 2
(continua)		

LETL	Lama da estação de tratamento de lama	aciaria #1
POCOL	Pó do coletor do alto-forno	altos-fornos
LAFFF	Lama do sistema de tratamento do alto-forno fração fina (U5A2)	altos-fornos
LAFFG	Lama do sistema de tratamento do alto-forno fração grossa (U5A2)	altos-fornos
PDCCOR	Pós do sistema de despoeiramento da casa de corrida	altos-fornos
PDCSIL	Pós do sistema de despoeiramento da casa de silos	altos-fornos
CLTQ	Carepa da laminação de tiras à quente	laminações
CLCG	Carepa da laminação de chapas grossas	laminações
LSTRA	Lama da estação de tratamento e recirculação de águas das laminações	laminações
LSTAA	Lama do sistema de tratamento de águas ácidas	laminações
LCC3	Lama do canal C-3	(baia de sedimentação da usina)
ETLIII	Lama da estação de tratamento de lamas da calcinação 3	calcinação 3
CIII	Finos e dolomita/cal	calcinação 3

a.1) Lamas processadas na estação de tratamento de águas da aciaria #2

As lamas da estação de tratamento da águas da aciaria #2 são produzidas durante a etapa de refino primário do aço dos conversores LD #5, #6 e #7, onde os gases e partículas sofrem um processo de lavagem e resfriamento com água. A lama é transferida para um tanque de decantação (figura 59 – a) onde através de um separador helicoidal (figura 59 – b) se remove a fração grossa caindo por gravidade em caçambas (figura 59 – d). A fração fina é separada através de um sistema de decantação e espessamento (figura 59 – c) sendo transferida para um filtro prensa de onde é transportada através de caçambas após remoção de parte da água contida (figura 59 – e).

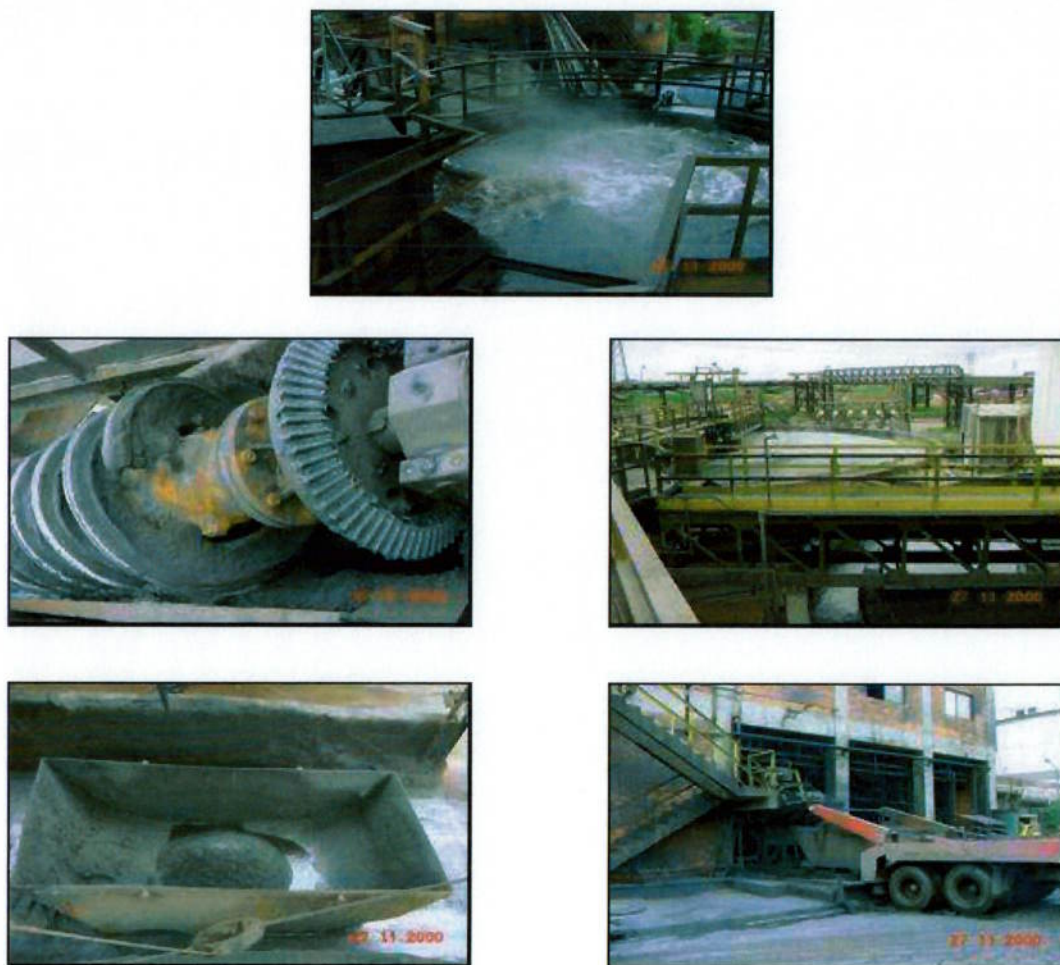


Figura 59 – Seqüência do tratamento dos gases do sistema OG*:

- a) Recebimento a água do sistema OG (água+ lamas)
- b) Separador helicoidal (fração grossa)
- c) Sistemas de tanques de decantação (fração fina)
- d) Caçamba de coleta do separador helicoidal (fração grossa)
- e) Caçamba de coleta do filtro prensa (fração fina)

* Após a atualização tecnológica e expansão da capacidade de produção na Aciaria #2 (dez 2001), um novo conversor LD #7 foi instalado com sistema de lavagem de gases a úmido (Sistema Baumco/VAI).

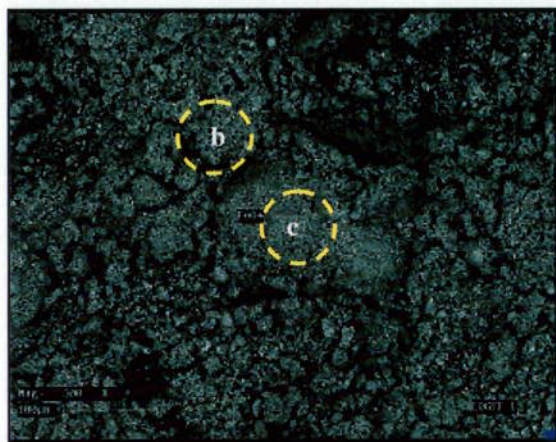
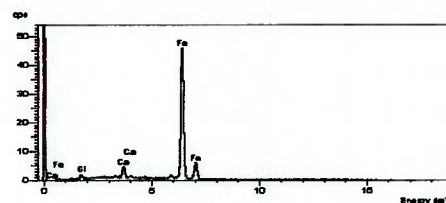
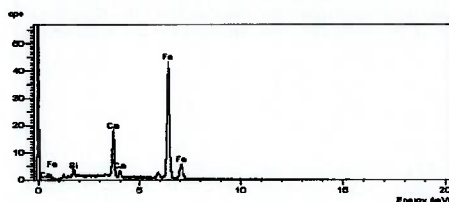


Figura 60 – a, b, c - LOGFF

a) Foto de elétrons secundários da lama da Aciaria (LOGFG);

b/c) Espectros de energia dispersiva de EDS, indicando a presença de Fe/Ca/Si/O;

(aumento 300 x)



a.2) Pó do coletor do alto-forno (POCOL)

O coletor também denominado de balão é um dos principais sistemas de tratamento de gases dos altos-fornos, os pós coletados neste sistema não apresentam umidade significativa sendo formados basicamente por carbono e óxido de ferro (hematita-magnetita), com algumas outras fases acessórias em menor proporção (figura 61).

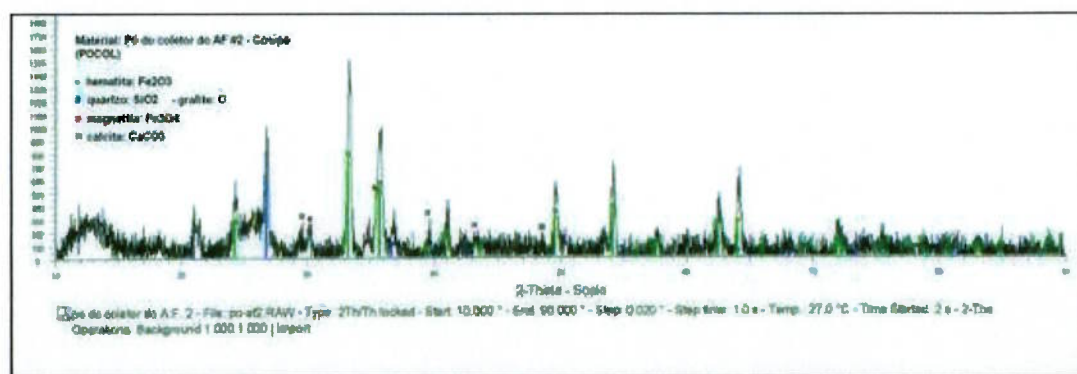


Figura 61 – Difratoograma de raios-X (método do pó) – Amostra: Pó do coletor do alto-forno da COSIPA: Fases detectadas: hematita, quartzo, grafita, magnetita, calcita.

a.3) Carepa da máquina de escafagem automática (CMEA)

A carepa da máquina de escafagem automática, como o próprio nome indica provém da etapa de tratamento térmico (fusão) destinada à remoção de trincas superficiais geradas durante o lingotamento contínuo das placas de aço. Os fumos, pós e respingos metálicos são captados e transportados até o sistema de limpeza de gases (precipitador eletrostático a úmido). Posteriormente estes resíduos são transferidos para um tanque de decantação de onde são recolhidos e enviados para a planta de beneficiamento de carepas gerenciada pela empresa Sobremetal.

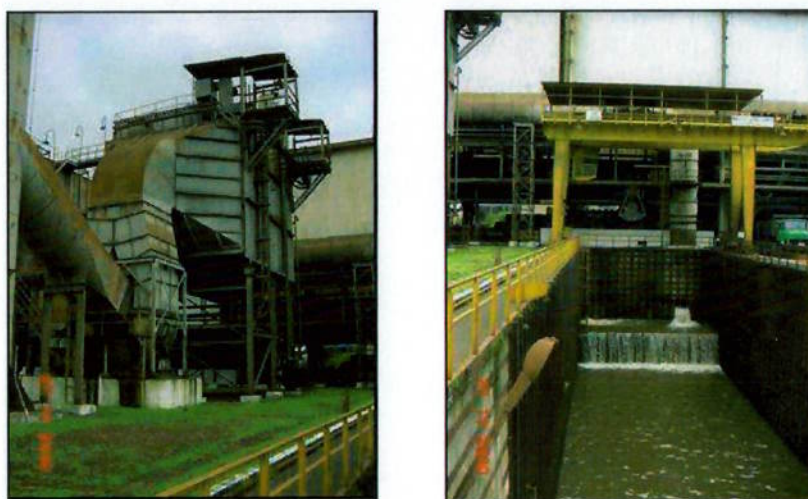


Figura 62 – Sistema de limpeza de gases (precipitador eletrostático a úmido) e poço de decantação de carepas do processo de escafagem automática de placas.

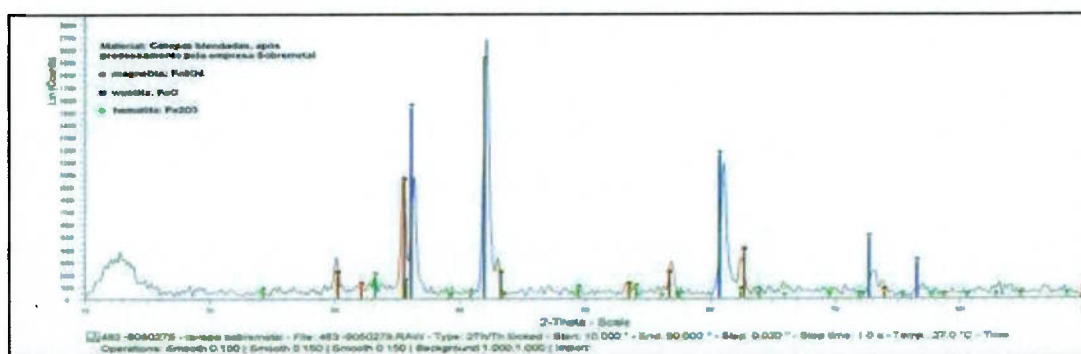


Figura 63 – Difratoograma de raios-X (método do pó) – Amostra: Carepa blendada pela empresa Sobremetal: Fases detectadas: wustita, magnetita e hematita

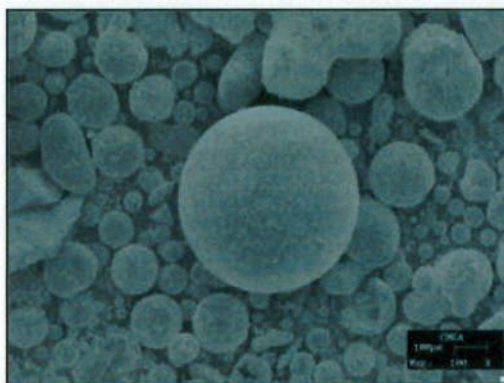


Figura 64 – Aspecto morfológico das partículas que constituem a carepa da máquina de escarfação automática (CMEA) – Microscopia eletrônica de varredura – elétrons secundários / USP

a.4) Carepa da máquina de lingotamento contínuo (CMLC)

As carepas geradas nas máquinas de lingotamento contínuo são formadas em 3 etapas do lingotamento de placas: No resfriamento primário, durante o resfriamento secundário e na etapa de corte das placas. Estas 3 etapas apresentam várias transformações físico-químicas: fusão dos pós fluxantes durante o lingotamento, oxidação da superfície das placas durante o resfriamento secundário (utilização de água /ar) e fusão durante a etapa de corte das placas lingotadas.



Figura 65 – Máquina de lingotamento contínuo MLC#2 (aciaria #2 / COSIPA) e poço de decantação de carepas das MLC (#1, #2 e #3)

a.5) Pós do sistema de despoejamento secundário da aciaria (POSEC)

O sistema de despoejamento secundário da aciaria #2 é responsável pelo tratamento dos fumos, gases e particulados produzidos nas etapas de transferência de gusa líquido dos carros torpedos para as panelas de gusa, dessulfuração de gusa na panela, remoção de escória, carregamento e vazamento dos conversores LD (carregamento de gusa líquido, sucatas, vazamento de aço e da escória). O sistema de controle ambiental é composto por filtros tipo manga.



Figura 66 – Sistema de despoejamento secundário da aciaria #2

a.6) Pós da estação de dessulfuração de gusa da aciaria#2 (PEDG2)

Estes material particulado é proveniente do processo de dessulfuração de gusa, através da injeção de agentes dessulfurante à base de misturas (cal+borra de alumínio) ou (cal+magnésio metálico) que visam garantir a transferência e fixação do enxofre em solução no gusa líquido para a escória produzida. Este sistema de limpeza de gases é composto por mangas filtrantes.



Figura 67 – Sistema de despoeiramento da estação de dessulfuração de gusa da aciaria #2 (mangas filtrantes)

a.7) Pós de cal e dolomita calcinada e cales do ADR (CALADR)

Os pós de cal e de dolomita calcinada são captados por sistemas de despoeiramento distintos, uma vez que a COSIPA possui 3 unidades de calcinação. São elas: calcinações #1 e #2 onde se produzem preferencialmente cales e a calcinação #3 que produz predominantemente dolomita calcinada. Os pós são captados por sistemas de tratamento de gases (precipitador eletrostático e filtros de manga).

Normalmente, parte das cales captadas são recicladas nas sinterizações ou vendidas, parte deste material também é estocado na área de disposição de resíduos (ADR). Em função de esta estocagem ser a céu aberto e sujeita às intempéries naturais (figura 69-b), as cales vão se transformando em seus hidróxidos, conforme pode ser observado pelo difratograma de raios-X, apresentado na figura 68.

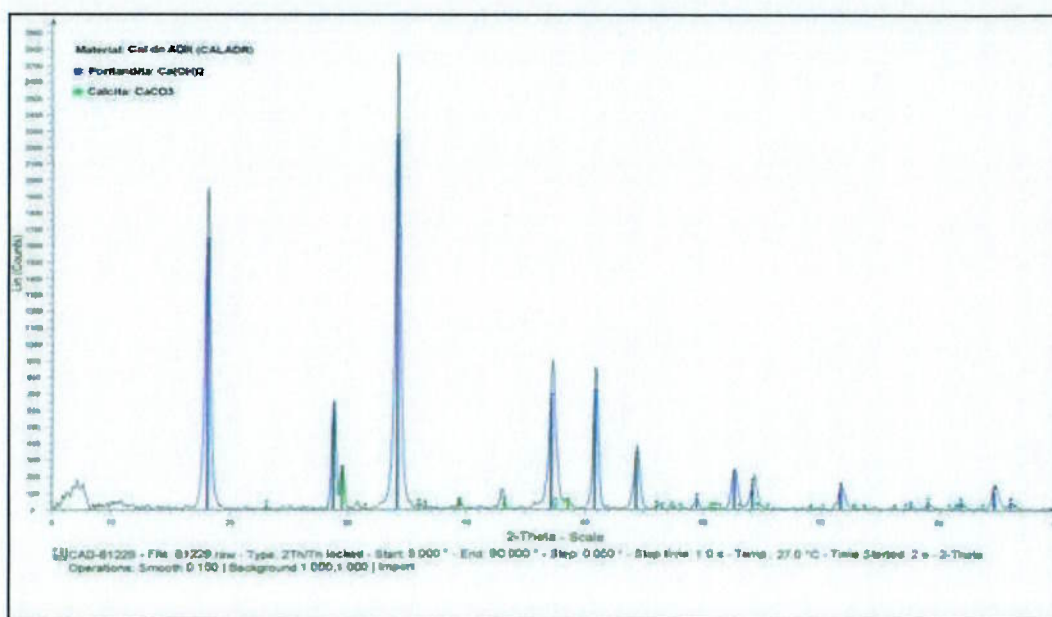


Figura 68 – Difratograma de raios-X (método do pó) – Amostra: Cal do ADR (área de disposição de resíduos); Fases detectadas: portlandita e calcita



Figura 69 – a) Sistema de filtragem da calcinação #3 (filtros tipo manga)
b) Área de disposição de resíduos industriais (cales armazenadas)

a.8) Lama da estação de tratamento de lama (ETL III) e solução de cal (SOLCAL)

As lamas geradas na estação de tratamento da calcinação #3, são decorrentes de processos de estocagem/lavagem de matérias primas sendo constituída por carbonatos de cálcio e cálcio-magnésio. No caso das calcinações #1 e #2, estas lamas são denominadas de solução de cal em decorrência do elevado teor de água contido.

a.9) Lama da estação de tratamento de lamas (LETL)

As lamas da estação de tratamento da aciaria #1, denominadas de lamas da ETL, atualmente estão estocadas na área de disposição de resíduos (ADR), não sendo mais geradas em função da desativação da aciaria #1. Basicamente são materiais contendo óxidos de ferro em um grau mais elevado de oxidação quando comparado com as lamas da aciaria #2, pois o sistema de capitação e tratamento dos gases da aciaria #1 era do tipo combustão completa.

a.10) Lama do sistema de tratamento dos altos-fornos (U5A2): fração fina e fração grossa (LAFFF e LAFFG)

O sistema de tratamento de águas e lamas dos altos fornos #1 e #2 da COSIPA é denominado de sistema U5A2, sendo responsável pela captação e tratamentos dos resíduos de lavagem de gases a úmido. Basicamente fornecem dois tipos de resíduos que são as frações fina e grossa da lama separada através de filtro a vácuo.



Figura 70 – Sistema U5A2 – Lamas dos altos-fornos (frações fina e grossa)

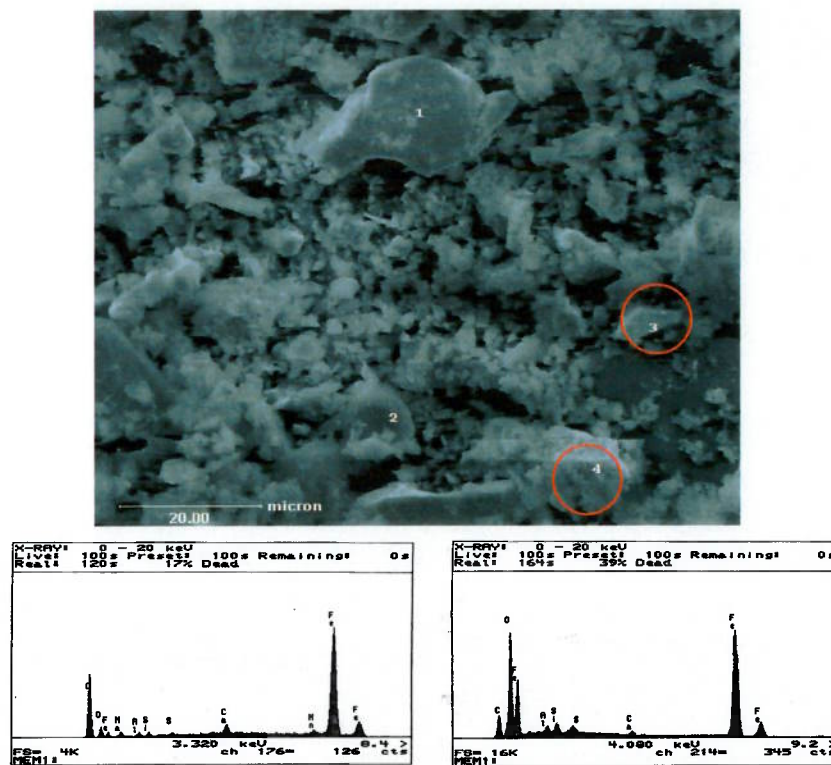


Figura 71 – Micrografia de elétrons retroespalhados indicando a morfologia da lama do U5A2 (Lamas dos altos fornos fração fina). Os espectros de EDS são respectivamente das partículas circuladas #3 (elementos: Fe, C, O, Ca, Al, Si, Mn e Na) e #4 (elementos: Fe, O, C, Si, Al, S e Ca)

a.11) Pós do sistema de despoeiramento da casa de corrida e pós do sistema de despoeiramento da casa de silos dos altos-fornos (PDCSIL e PDCCOR)

Estes pós apresentam baixo teor de umidade, coletado pelo sistema de despoeiramento da casa de silos e da casa de corridas dos altos-fornos, basicamente sendo óxidos de ferro contendo uma pequena quantidade de carbono.

a.12) Lama da estação de tratamento e recirculação de águas das laminações (LSTRA)

As lamas coletadas no sistema de tratamento e recirculação de águas das laminações são basicamente compostas por carepas finas geradas nos processos de laminação. A grande diferença em relação a outros tipos de lamas é a maior presença de óleos contido, fazendo com que estes materiais sejam classificados como resíduos classe I (norma ABNT 10004).



Figura 72 – Sistema de tratamento e recirculação de águas das laminações (LSTRA)
(a) Tanques de decantação, (b) sistemas de filtros, (c) filtro a vácuo, (d) caçambas de recolhimento da lama.

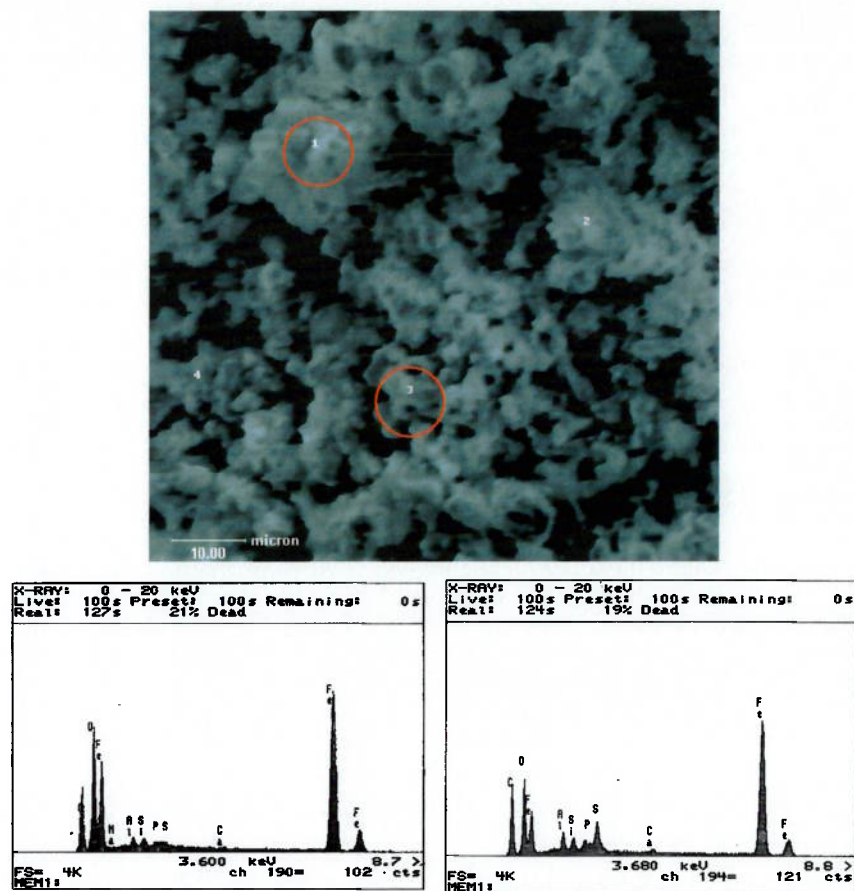


Figura 73 – Micrografia de elétrons retrospalhados da lama do sistema de tratamento e recirculação de lamas das laminações (STRA). Espectros de EDS das regiões #1 (elementos: Fe, O, C, Al, Si, P, S, Ca, Na) e #3 (elementos (Fe, O, C, S, Al, Si, Ca)

a.13) Carepas das laminações: carepa da laminação de tiras à quente (CLTQ) e carepa da laminação de chapas grossas (CLCG)

As carepas são geradas em decorrência dos processos de oxidação superficial das placas/chapas metálicas em fornos de reaquecimento. Na COSIPA todas as carepas geradas sejam na aciaria ou nas laminações são recuperadas, processadas e recicladas nas unidades de sinterizações.



Figura 74 – Pátio de recuperação e processamento de carepas pela empresa Sobremetal nas dependências da COSIPA

a.14 - Lama do sistema de tratamento de águas ácidas (LSTAA)

A lama do sistema de tratamento de águas ácidas é obtida durante o tratamento das águas das laminações, provenientes das etapas de decapagem ácida das bobinas de aço laminadas. Na figura 34 foram mostrados anteriormente os principais equipamentos e fontes geradoras de resíduos e subprodutos durante as etapas de laminações de chapas, bobinas e tiras.

a.15 - Lama do canal C-3 (baía de sedimentação) (LCC3)

Os resíduos do canal C3 são decorrentes do processo de decantação de sólidos suspensos antes do deságüe no canal-mar (figura 75). Este material sedimentável é bastante heterogêneo apresentando uma elevada quantidade de ganga e umidade variável.

Este resíduo também apresenta aproximadamente 22 % de matéria orgânica, forte odor e presença de óleos.



Figura 75 – Vista aérea, indicando o ponto de amostragem B, localizado na saída do canal C3

5.1.2 - Características físico-químicas (análise química, granulométrica, fases cristalinas e presença de óleos e graxas) e levantamento da geração dos resíduos siderúrgicos sólidos contendo ferro

Os levantamentos referentes aos tipos, quantidades, local de tratamento, composição química, distribuição granulométrica, etc. dos resíduos foram disponibilizados pela COSIPA através do relatório do processo de licitação da planta de reciclagem de resíduos¹⁶⁰. Alguns dados foram complementarmente adicionados de maneira a garantir todas as informações necessárias para o projeto de uma planta de reciclagem de resíduos.

O completo levantamento da geração dos resíduos, caracterizações físico-químicas, estruturais e granulométricas, irão fornecer os dados necessários para a formulação das condições de contorno do modelo de programação linear, as ponderações das notas de comparações paritárias (priorização dos resíduos), desenvolvimento do projeto da planta de reciclagem de resíduos, bem como o planejamento e estudo de viabilidade econômica do empreendimento (planta de reciclagem de resíduos).

a) Geração e estocagem – Equação do balanço de massa;

A geração média de cada resíduo foi calculada para uma produção anual de 4,5 milhões de toneladas de aço líquido, capacidade esta obtida após o processo de modernização e expansão da usina culminando com a expansão da aciaria #2 no final do ano de 2001.

De uma forma mais geral, a única maneira de se recuperar de forma econômica e ambientalmente correta, os resíduos siderúrgicos é através da reciclagem ou de sua venda. Pela equação do balanço de massa da geração de resíduos e subprodutos (equação 92), pode-se observar claramente que sua solução passa pela maximização da taxa de reciclagem, uma vez que todas as outras 3 variáveis devem

ser minimizadas: geração interna, as perdas/poluição e a acumulação. Este balanço pode ser descrito figura a seguir.

$$\begin{array}{ccccccc} \text{Geração} & - & \text{Acumulação} & = & \text{Consumo} & + & \text{Perda} & (92) \\ \text{interna} & & \text{(disposição)} & & \text{(reciclagem/venda)} & & \text{(poluição)} & \end{array}$$

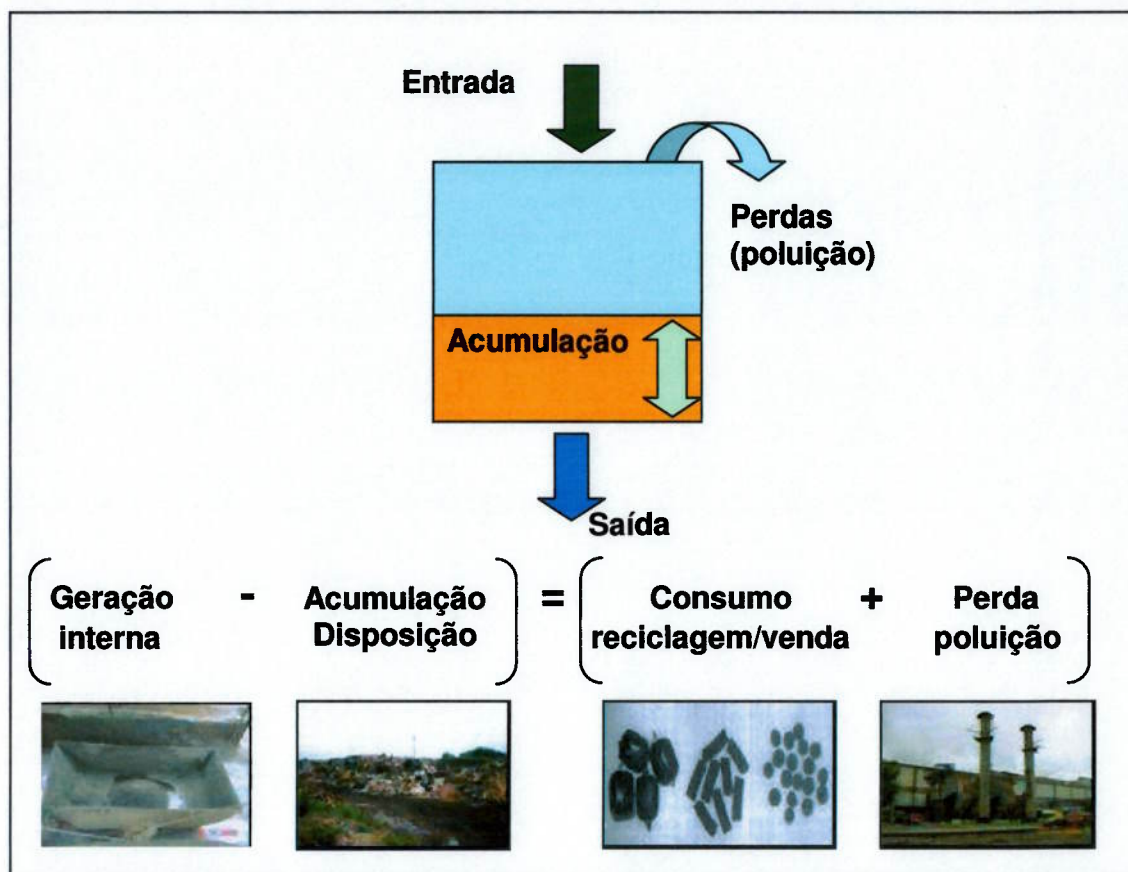


Figura 76 – Balanço de massa da geração dos resíduos em uma unidade industrial

Tabela XXIX – Geração e estoque de resíduos siderúrgicos sólidos (base: 4,5 milhões de toneladas de aço líquido)

Resíduo/ subproduto	Geração (base úmida) ton/ano - produção + estoque ADR	Geração (base úmida)-ton/ano - produção
LOGFF	94.423	67.200
LOGFG	13.750	13.750

(continuação)

CMEA	18.350	18.350
CMLC	17.740	17.740
POSEC	996	996
PEDG2	3.564	3.564
POCAL	6.000	6.000
PODOL	-	-
SOLCAL	4.800	4.800
CALADR	7.539	0
LETL	4.850	0
POCOL	96.000	96.000
LAFFF	43.071	30.000
LAFFG	12.000	12.000
PDCCOR	4.800	4.800
PDCSIL	10.200	10.200
CLTQ	36.000	36.000
CLCG	14.400	14.400
LSTRA	4.225	2.400
LSTAA	3.945	3.000
LCC3	10.800	8.000
ETLIII	5.400	5.400
Total (t/ano)	412.852	354.600

b) Teor de água – Umidade

O conhecimento do teor de água, além de fornecer dados para a elaboração dos balanços de massa dos reciclados, ajustes das condições de processamento e de movimentação de material, é importante para a especificação dos equipamentos necessários para a secagem dos resíduos, elaboração do balanço de energia, geração de vapor e determinação da eficiência de secagem, bem como a determinação da necessidade ou não de se instalar uma torre de resfriamento de água.

Tabela XXX – Umidade contida nos resíduos siderúrgicos (%)*

N	Resíduo/ subproduto	Umidade (%)
1	LOGFF	21,72
2	LOGFG	10,80
3	CMEA	12,60
4	CMLC	6,10
5	POSEC	0,30
6	PEDG2	0,10
7	POCAL	0,20
8	PODOL	0,23
9	SOLCAL	23,20
10	CALADR	25,37 **
11	LETL	29,80
12	POCOL	3,80
13	LAFFF	14,40
14	LAFFG	12,80
15	PDCCOR	0,89
16	PDCSIL	1,10
17	CLTQ	6,75
18	CLCG	4,49
19	LSTRA	19,00
20	LSTAA	65,80
21	LCC3	45,50
22	ETLIII	20,00
	Umidade média ponderada (%)	11,62

* Método gravimétrico: precisão de 0,05 gramas

** Zomag (Samples for briquetting tests, maio de 2000)

c) Densidades – Base úmida e base seca

Tabela XXXI – Densidade dos resíduos siderúrgicos (unidade: g/cm³)

N	Resíduo/ sigla	Densidade (base úmida)	Densidade (base seca)
1	LOGFF	1,40	1,59
2	LOGFG	2,95	2,33
3	CMEA	3,16	2,24
4	CMLC	3,40	2,13
5	POSEC	1,03	1,06
6	PEDG2	1,08	2,30
7	POCAL	0,49	0,50
8	PODOL	0,46	0,43
9	SOLCAL	1,61	0,70
10	CALADR	0,49	0,50
11	LETL	1,50	1,40
12	POCOL	1,80	1,86
13	LAFFFF	2,06	1,97
14	LAFFG	1,93	2,29
15	PDCCOR	1,43	1,64
16	PDCSIL	1,73	2,06
17	CLTQ	1,97	2,11
18	CLCG	2,49	2,06
19	LSTRA	1,78	1,67
20	LSTAA	0,70	1,17
21	LCC3	1,40	1,00
22	ETLIII	1,00	0,50

d) Composição química (%) – Análise padronizada em óxidos (base seca)

Tabela XXXII – Análise química (Base seca, % em massa)

N	Resíduos/ Sigla	C	Fe _t	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO
1	LOGFF	0,752	77,055	4,322	0,643	0,127	1,160
2	LOGFG	0,802	84,336	7,498	1,368	0,288	1,790
3	CMEA	0,327	84,871	1,168	0,292	0,117	0,117
4	CMLC	0,272	74,363	1,776	2,611	0,888	0,115
5	POSEC	1,641	63,105	16,003	1,203	0,580	1,838
6	PEDG2	3,596	29,440	44,485	6,098	1,009	2,860
7	POCAL	0,000	4,801	76,685	2,778	0,657	12,688
8	PODOL	0,000	3,193	56,812	2,717	0,999	34,553
9	SOLCAL	0,000	26,135	43,218	11,478	1,244	6,694
10	CALADR	0,000	4,801	76,685	2,778	0,657	12,688
11	LETL	0,647	65,311	4,367	1,723	0,219	3,314
12	POCOL	22,258	41,374	3,605	10,306	2,434	1,229
13	LAFFFF	21,768	39,828	3,848	9,831	3,932	1,194
14	LAFFG	22,009	42,779	3,205	8,761	2,778	0,919
15	PDCCOR	0,993	66,151	0,318	2,294	0,467	0,119
16	PDCSIL	8,412	62,677	0,912	0,228	0,091	0,091
17	CLTQ	0,120	81,515	0,000	0,577	0,174	0,033
18	CLCG	0,216	80,160	0,108	0,432	0,270	0,022
19	LSTRA	7,878	66,550	0,902	2,477	1,752	0,477
20	LSTAA	1,801	57,979	4,369	2,136	1,187	2,902
21	LCC3	2,322	56,387	1,214	5,203	2,441	1,238
22	ETLII	7,106	2,523	59,549	6,164	2,161	20,797

(continuação)

N	Resíduos/ Sigla	TiO₂	MnO	Na₂O	K₂O	Zn	S	P₂O₅
1	LOGFF	0,063	1,486	0,118	0,127	0,030	0,054	0,118
2	LOGFG	0,185	1,430	0,038	0,070	0,008	0,021	0,206
3	CMEA	0,000	0,654	0,041	0,039	0,000	0,035	0,047
4	CMLC	0,000	0,930	1,473	0,050	0,000	0,034	0,063
5	POSEC	0,000	0,503	0,000	0,000	0,000	0,503	0,109
6	PEDG2	0,000	0,831	2,197	1,829	0,158	0,526	0,200
7	POCAL	0,000	0,303	0,000	0,000	0,000	0,025	0,000
8	PODOL	0,000	0,311	0,000	0,000	0,000	0,043	0,000
9	SOLCAL	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10	CALADR	0,303	0,000	0,000	0,000	0,000	0,025	0,000
11	LETL	0,143	1,723	0,307	0,187	0,000	0,143	0,285
12	POCOL	0,151	0,417	0,000	0,000	0,000	0,383	0,064
13	LAFFF	0,000	0,463	0,239	0,154	0,295	0,562	0,772
14	LAFFG	0,000	0,353	0,075	0,163	0,075	0,246	0,256
15	PDCCOR	0,000	0,656	0,000	0,000	0,000	0,516	0,060
16	PDCSIL	0,000	0,511	0,000	0,000	0,000	0,109	0,036
17	CLTQ	0,022	0,544	0,000	0,000	0,000	0,016	0,011
18	CLCG	0,000	0,951	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000
19	LSTRA	0,000	0,487	0,000	0,000	0,000	0,145	2,426
20	LSTAA	0,000	0,129	0,000	0,000	0,000	1,294	0,949
21	LCC3	0,000	0,345	0,976	0,714	0,000	1,810	2,476
22	ETLIII	0,000	0,522	0,000	0,000	0,000	0,058	0,046

Análises químicas: Laboratório de materiais da Cosipa: equipamentos: LECO CS 44 LS, fluorescência de raios-X: Philips, ICP: Optima 3000 DV, análise via úmida.

e) Presença de óleos e graxas

A presença de óleos e graxas é um dos maiores indicativos da caracterização do resíduo como classe I (Norma ABNT 10004). Outro fator importante é a resolução¹⁶¹ CONAMA 20 que impõe valores bastante restritivos à presença de óleos e graxas aos efluentes descartados. (Artigos 4 a 8, onde a presença de óleos e graxas devem ser virtualmente ausentes para as classes de águas doces 1 a 3; tolerando-se iridescências para a água classe 4).

Tabela XXXIII – Quantificação do teor de óleos contidos nos resíduos siderúrgicos

Resíduo	CMLC	CMEA	CLTQ	LSTAA	LSTRA	LCC3	CLCG
Teor de óleos e graxas (%)	0,31	0,30	0,41	0,55	1,37	0,67	0,24

f) Variáveis de controle das estações de tratamento de águas

As principais variáveis controladas durante os processos de tratamentos das águas nas diversas estações na COSIPA (ETA's) são: o pH, o teor de sólidos em suspensão, temperatura e quantidade de polímeros (poliacrilatos) adicionados. Na tabela XXXIV são apresentados os principais dados levantados no período de janeiro a julho de 2000.

Tabela XXXIV - Principais condições e variáveis operacionais das estações de tratamentos de água da COSIPA

Estação / Variável	Posição	ETAL	U5A2	STRA	STAA	ETL / Calcinação 3
pH	entrada	8,6 - 11,5	5,7 - 7,4	6,2 - 9,0	1,2 - 3,3	11,2 - 12,2
	saída	9,2 - 11,6	6,9 - 7,9	6,3 - 8,1	5,0 - 8,3	11,6 - 12,1
Sólidos suspensos (ppm)	entrada	179-16.983	362 - 4.966	44 - 162	0 - 4.774	1.462 - 59.040
	saída	4-94	18 - 182	1,2 - 54	7 - 538	13 - 65
Polímero (kg/mês)	-	180	270	2.700	900	-

g) Análise microestrutural dos resíduos (difração de raios-X)

Tabela XXXV – Caracterização das fases cristalinas presentes nos resíduos através da técnica de difração de raios-X (método do pó)

Resíduos / Subprodutos	Fases Detectadas				Equipa- mento
	Maior	Intermediária	Menor	Traços	
LOGFF	Ferro (Fe) Wustita (FeO)	Magnetita (FeFe ₂ O ₄)	Calcita (CaCO ₃)		M C
LOGFG	Ferro (Fe) Wustita (FeO)	Calcita (CaCO ₃) Portlandita (Ca(OH) ₂)	Cal (CaO) Magnetita (FeFe ₂ O ₄)	“Forsterita” (Mg ₂ SiO ₄)	M C
CMEA	Magnetita (FeFe ₂ O ₄)	Magnesioferrita Wustita (FeO)			C
CMLC	Wustita (FeO) Magnetita (FeFe ₂ O ₄)				C
POSEC	Magnetita (FeFe ₂ O ₄)	Grafita (C)	Portlandita (Ca(OH) ₂) Hematita (Fe ₂ O ₃) Calcita (CaCO ₃)		M
PEDG2	Magnetita (Fe ₃ O ₄)	Calcita (CaCO ₃)	Hematita (Fe ₂ O ₃) Portlandita (Ca(OH) ₂) Katoita (Ca ₃ Al ₂ OH ₁₂)	Cal (CaO) Grafita (C)	M
POCAL (silo térreo)	Portlandita (Ca(OH) ₂) Periclásio (MgO)	Calcita (CaCO ₃)			C
PODOL (silo 84)	Cal (CaO) Periclásio (MgO) Calcita (CaCO ₃)	Dolomita (CaMg(CO ₃) ₂)	Quartzo (SiO ₂)	Portlandita Ca(OH) ₂	C
SOLCAL	Calcita (CaCO ₃) Dolomita (CaMg(CO ₃) ₂)	Quartzo (SiO ₂)		Hematita (Fe ₂ O ₃)	M C
CALADR (continua)	Portlandita (Ca(OH) ₂)		Calcita (CaCO ₃)		C

LETL	Maghemita (Fe_2O_3) Magnetita (FeFe_2O_4)		Hematita (Fe_2O_3) Calcita (CaCO_3)	Ferro (Fe)	M
POCOL	Hematita (Fe_2O_3)	Quartzo (SiO_2) Grafita (C)	Magnetita (Fe_3O_4)	Forsterita Mg_2SiO_4 Calcita (CaCO_3)	C
LAFFF	Hematita (Fe_2O_3)	Grafita (C)	Magnetita (Fe_3O_4)	Quartzo (SiO_2) Goetita ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)	C U
LAFFG	Hematita (Fe_2O_3)	Grafita (C) Goetita ($\text{FeO}(\text{OH})$)		Quartzo (SiO_2) Magnetita (FeFe_2O_4)	C U
PDCCOR	Magnetita (FeFe_2O_4)	Hematita (Fe_2O_3) Grafita (C)			M
PDCSIL	Magnetita (FeFe_2O_4)	Grafita (C)	Quartzo (SiO_2) Calcita (CaCO_3)	MgS ou CS_2	M
CLTQ	Wustita (FeO)	Magnetita (FeFe_2O_4)			C
CLCG	Wustita (FeO)	Magnetita (FeFe_2O_4)			C
LSTRA	Wustita (FeO)	Magnetita (FeFe_2O_4)			C
LSTAA	Magnetita (FeFe_2O_4) Maghemita (Fe_2O_3)			Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) Calcita ($\text{Ca}(\text{CO}_3)$) Wustita (FeO)	C
LCC3	Quartzo (SiO_2)	Calcita (CaCO_3) Hematita (Fe_2O_3)		Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)	C
ETLIII	Calcita (CaCO_3) e Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)$)	Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)		Quartzo (SiO_2) Coríndon (Al_2O_3)	C

Legenda:

M - (CPqD / Magnesita); Difratorômetro Philips, modelo: PW1730/10

C - (Laboratório de materiais / COSIPA); Difratorômetro Siemens, modelo: D 5000

U - (LCM / USP); Difratorômetro Philips, modelo: MPD 1880

h) Análise granulométrica (peneiramento vibratório a seco)

Tabela XXXVI – Distribuição granulométrica (% retida simples)

Tamanho (mm)	LOGFF	LOGFG	CMEA	CMLC	POSEC	POEDG2	POCAL	SOLCAL	CALADR
7,93		5,38	0,07	3,03	-	-	-	0,57	-
6,35		9,63	0,17	2,11	-	-	-	2,66	-
4,76		14,52	0,00	2,65	-	-	-	1,42	-
3,36	0,024	14,36	0,14	2,69	0,32	0,12	0,11	0,14	0,11
1,41	0,094	27,70	1,21	18,34	0,13	0,32	0,93	1,55	0,93
1,00	0,13	6,09	2,85	12,82	0,13	0,40	0,16	1,01	1,16
0,84	0,36	3,48	5,06	10,77	0,25	0,42	1,34	0,76	1,34
0,59	1,37	3,60	8,69	15,15	0,50	0,49	1,80	0,47	1,80
0,297	18,28	6,06	36,87	24,3	1,61	86,41	6,35	1,31	6,35
0,149	41,522	5,69	31,38	5,18	81,91	8,55	8,56	3,74	7,46
0,105	17,19	2,24	6,36	2,47	11,33	0,98	9,61	8,18	9,61
0,074	14,37	0,90	4,41	0,29	2,79	1,40	9,16	46,65	9,16
Fundo	6,66	0,35	2,79	0,2	1,03	0,91	61,98	31,54	62,09
soma	100	100	100	100	100	100	100	100	100

(Continuação)

Tamanho (mm)	LETL	POCOL	LAFFF	LAFFG	PDCCOR	PDCSIL	CLTQ	CLCG	LSTAA	LCC3
7,93	26,78	-	2,40	2,60	0,00	-	0,00	0,00	-	-
6,35	16,06	-	0,60	1,00	0,39	-	0,17	7,54	-	-
4,76	12,48	-	1,90	2,00	0,33	-	0,00	0,00	-	-
3,36	8,28	-	2,10	2,10	0,31	-	0,26	18,94	-	-
1,41	17,78	-	7,30	4,00	1,11	0,22	0,00	0,00	-	-
1,00	3,93	4,22	1,30	1,40	1,55	0,17	8,18	55,06	4,31	1,00
0,84	2,25	-	1,40	1,40	1,22	0,26	0,00	0,00	-	-

0,59	2,41	-	0,80	1,90	0,61	0,43	0,00	0,00	-	-
0,297	3,83	-	2,20	8,50	72,16	22,13	0,00	0,00	-	-
0,149	2,68	-	9,40	20,20	16,44	60,40	0,00	0,00	-	-
0,105	0,22	57,39	8,6	12,8	4,18	13,24	89,19	16,63	61,66	65,21
0,074	1,42	-	23,40	19,80	1,03	2,03	0,00	0,00	-	-
Fundo	1,88	38,39	38,60	22,30	0,67	1,12	2,20	1,83	34,03	33,79
soma	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

i) Composição química média (Resíduos Estocados – ADR)

Tabela XXXVII – Composição química média dos resíduos estocados e gerados (média ponderada com a quantidade existente), base úmida

Componentes	Resíduos gerados	Resíduos estocados
Umidade: (%)	11,11	17,01
C	7,94	2,61
Fe Total	55,93	46,74
CaO	5,20	21,28
SiO ₂	4,13	2,25
Al ₂ O ₃	1,14	0,73
MgO	1,26	4,08
TiO ₂	0,06	0,04
MnO	0,72	0,92
Na ₂ O	0,15	0,13
K ₂ O	0,08	0,11
Zn	0,03	0,04
S	0,21	0,19
P ₂ O ₅	0,18	0,30

5.1.3 - Levantamento de dados dos processos metalúrgicos

Os dados técnicos do controle de processo de refino primário nos conversores a oxigênio foram disponibilizados pela superintendência de aciaria da COSIPA. Neste relatório são apresentados os principais dados de controle das características do gusa líquido e a utilização de sucatas e escorificantes no processo.

Do ponto de vista das informações necessárias para as definições das condições de contorno para a adição de misturas de resíduos aglomerados como carga sólida nos conversores, as variáveis térmicas (temperatura, composição química do gusa, proporção de carga sólida e equivalente térmico em sucata das matérias primas adicionadas) são as mais importantes. Já do ponto de controle químico (reações de refino primário) a composição química das matérias primas (fósforo, enxofre, zinco e álcalis) devem possuir uma atenção especial.

Outros dados importantes, tais como as composições químicas das escórias metalúrgicas do processo de refino foram obtidas através de consulta ao banco de dados do sistema supervisório dos conversores #5 e #6, englobando corridas processadas no período de abril a outubro de 2000.

Controle estático: Cálculos de balanço térmico e de massa iniciais

Controle dinâmico: Cálculos do balanço térmico e ajuste de composição química a partir de amostras coletadas durante o sopro de oxigênio com o dispositivo de sub-lança

a) **Matérias primas (gusa líquido, sucatas e escorificantes)**

Tabela XXXVIII – Dados de processo: Balanço de massa do carregamento de matérias primas no conversor LD da COSIPA e características físico-químicas das variáveis de carregamento (período: abril a outubro de 2000, LD's #5 e #6)

Matéria prima	Média	Desvio padrão
Carga sólida		
Carga metálica – CM (t), onde: (CM = CL + CS)	167,609	5,148
Carga líquida – CL (t); onde: (CL = Massa de gusa líquido carregada)	141,601	7,447
Carga sólida média– CS (t)	25,658	4,441
Carga sólida média (%)	15,33	2,73
Escorificantes		
Peso de cal / corrida (t)	4,290	1,071
Peso de dolomita calcinada / corrida (t)	3,166	0,840
Peso de dolomita não calcinada / corrida (t)	0,683	1,341
Peso de sínter - controle estático (t)	1,595	0,986
Peso de sínter - controle dinâmico (t)	1,142	0,702

Tabela XXXIX – Composição química do gusa sólido e dos principais escorificantes (base de cálculo do STE)

Elementos (%)	Sínter	Dolomita não calcinada	Dolomita calcinada	Cal	Gusa sólido
Fe	-	-	-	-	94,00
Si	-	-	-	-	0,85
Mn	-	-	-	-	0,80
C	-	-	-	-	4,00
S	-	-	-	-	0,05

P	-	-	-	-	0,3
CaO	9,30	29,00	56,6	96,00	-
MgO	1,50	20,00	40,6	1,00	-
SiO₂	5,40	3,00	0,80	1,00	-
Fe₂O₃	66,92	0,30	0,20	0,20	-
Al₂O₃	1,25	0,60	0,40	0,50	-
FeO	15,00	-	-	-	-
P₂O₅	0,02	-	-	-	-
MnO	0,60	-	-	-	-
Outros	0,01	-	-	-	-
PF (%)	-	47,10	1,40	1,30	-
STE	2,50	2,33	1,33	1,21	0,62
STE (1670 °C) (Kcal/kg)	893	718	410	373	191

STE: Equivalente térmico em sucata

PF: Perda ao fogo (%)

- **Escória (final de sopro)**

Tabela XL – Composição química típica da escória do processo LD (abril a outubro de 2000) – Conversores #5 e #6

Elementos (%)	Média	Desvio padrão
CaO	38,45	3,30
SiO₂	11,13	2,18
MgO	9,84	1,62
Fe total	22,18	3,69
MnO	6,35	0,98
Al₂O₃	1,42	0,35
P₂O₅	1,45	0,25
BB	3,45	-

- **Gusa líquido carregado**

Tabela XLI – Evolução da composição química e temperatura do gusa líquido carregado, período de 1998 a 2000

Gusa líquido: janeiro a dezembro de 1998	Média	Desvio Padrão
Temperatura (°C)	1.296	42,9
Teor de silício (Si)	0,444	0,158
Teor de fósforo (P)	0,0964	0,012
Enxofre (S)	0,0102	0,0051
Gusa líquido: fevereiro a dezembro de 1999		
Temperatura (°C)	1.291	39,3
Teor de silício (%)	0,548	0,194
Teor de fósforo (%)	0,0905	0,006
Gusa líquido: abril a outubro de 2000		
Temperatura (°C)	1.286	44,6
Teor de silício (Si)	0,446	0,141
Teor de fósforo (P)	0,101	0,008
Enxofre (S)	0,0082	0,0032

5.2 - Construção da base matemática do modelo de reciclagem dos resíduos sólidos siderúrgicos contendo ferro

5.2.1 - Definições dos objetivos e da rota tecnológica de reciclagem

A definição dos cenários do modelo de reciclagem dos resíduos siderúrgicos sólidos seguiu as diretrizes impostas pela proposta técnica da planta de reciclagem de resíduos sólidos formulada pela COSIPA - Companhia Siderúrgica Paulista, de forma que o modelo de reciclagem tem a diretriz de alcançar os seguintes objetivos:

- Flexibilizar a reciclagem conjunta de quase a totalidade de resíduos sólidos gerados durante a produção e transformação do aço: capacidade de processamento adequada ao tipo e quantidade dos de resíduos gerados;
- Potencializar a recuperação energética dos redutores (coque e/ou seus subprodutos e outras fontes de carbono);
- O produto pode se transformar em aço (utilização nos conversores LD) ou “carga metálica” para a sinterização;
- Diminuir a demanda de matérias primas e insumos externos;
- Promover um ganho econômico e ambiental (internalização dos impactos ambientais);
- Empregar tecnologias consagradas e de base tecnológica madura, de forma a minimizar as operações unitárias durante o processamento dos resíduos;
- Promover a busca de um desenvolvimento mais sustentável do negócio;
- Minimizar alterações ou interferências sobre os processos produtivos;
- Ser viável: técnica e economicamente;
- Utilizar o passivo ambiental existente.

5.2.1.1 – Construção do Cenário:

A partir das diretrizes definidas, foi construído um cenário visando avaliar as melhores alternativas tecnológicas e rotas de reciclagem, esta escolha de duas rotas objetiva aumentar a flexibilidade operacional da planta de reciclagem, contornar o problema tecnológico decorrente da dificuldade de se pelletizar carepas e escolher uma tecnologia madura e difundida de processamento de resíduos de elevado teor de ferro destinado a aciarias (carga sólida). O cenário construído foi o seguinte:

- Briquetar os resíduos que contenham maior teor de ferro total, e maior tamanho de partículas (buscando-se obter um maior empacotamento das partículas) em especial das carepas; uma vez que estas são difíceis de serem aglomeradas a baixo custo por outros métodos. O briquete seria então destinado a aciaria, na forma de carga metálica sólida, sendo um substituto misto de sucata ferrosa e escorificantes (sinter, cal, calcário, dolomita, etc.).

Aglomerar os resíduos finos, de forma a minimizar a presença de frações abaixo de 0,150 mm; maximizando a recuperação do carbono nos produtos enviados as unidades de sinterizações.

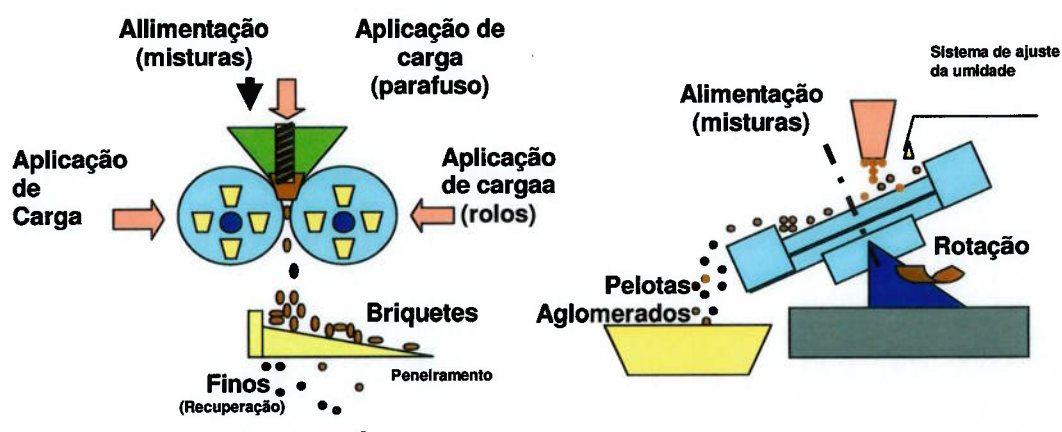


Figura 77 – Rota tecnológica do modelo de reciclagem: Briquetagem + Aglomeração (pelotização/micropelotização ou granulação)

O cenário escolhido procura privilegiar a recuperação do Fe_t e do carbono dentro dos limites de especificação de briquetes destinados à aciaria e de aglomerados (grânulos/micropelotas) destinados às sinterizações. Neste ponto é importante lembrar que a disponibilidade dos resíduos é limitada (geração e passivo ambiental existente), e a destinação de um dado resíduo a uma forma de aglomeração (pelotização, briquetagem, granulação/micropelotização) necessariamente afeta a distribuição de massa do sistema, ou seja, em uma otimização há uma relação de compromisso entre a disponibilidade dos resíduos, sua composição química e sua destinação.

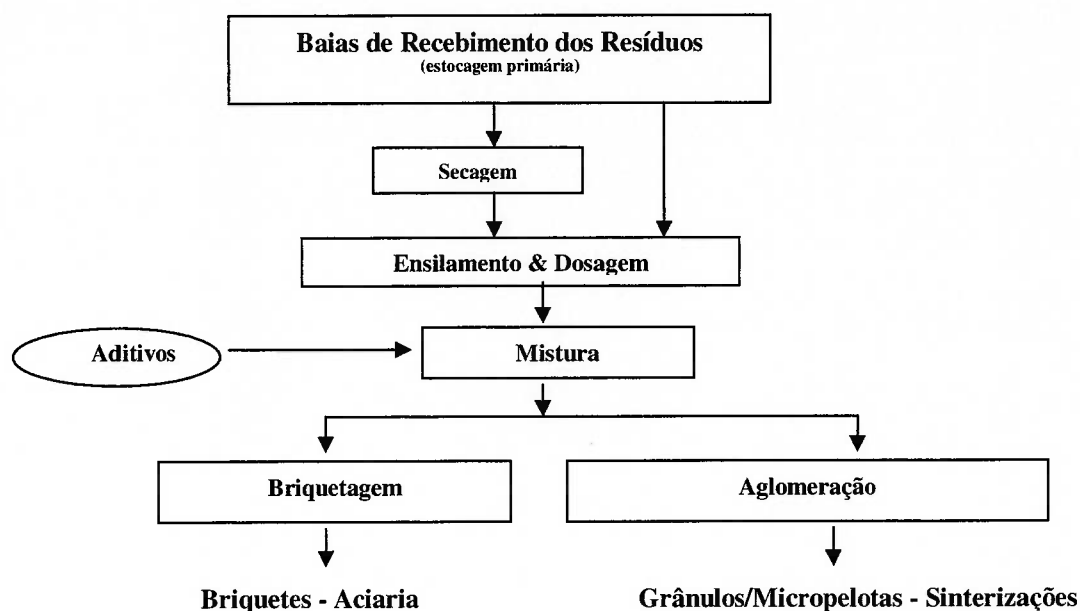


Figura 78 – Fluxo esquemático do processo de reciclagem proposto para a reciclagem dos resíduos da COSIPA

As principais vantagens deste fluxo de processo são:

- Reciclagem de todos os resíduos disponibilizados;
- Flexibilidade de processamento;
- Consumo de todo o passivo ambiental (resíduos estocados);
- Maximização da recuperação econômica (teor de ferro, carbono, escorificantes, etc.);

- Sendo a secagem realizada logo após da etapa de estocagem primária (bacias de recebimento dos resíduos) não será necessária a estocagem de lamas em silos ou a necessidade de sistemas complexos de manuseio, dosagem, pesagem das lamas;
- Utilização de sistemas pneumáticos de transporte de resíduos secos (minimização da poluição e da geração de poeiras fugitivas);
- Facilidade de manutenção;
- Minimização da necessidade de utilização de pás carregadeiras;
- Robustez e confiabilidade dos sistemas de armazenamento, transporte manuseio dos resíduos e dos materiais particulados;
- Reciclagem total dos resíduos gerados e captados nos sistemas de controle ambiental da própria unidade, etc.

Na definição das composições dos aglomerados projetados, as misturas de resíduos foram otimizadas através da utilização de programação linear e do processo de hierarquização analítica (AHP), conforme indicado pela figura 79. A seguir iremos indicar os passos realizados para a elaboração da escala de priorização dos resíduos siderúrgicos.

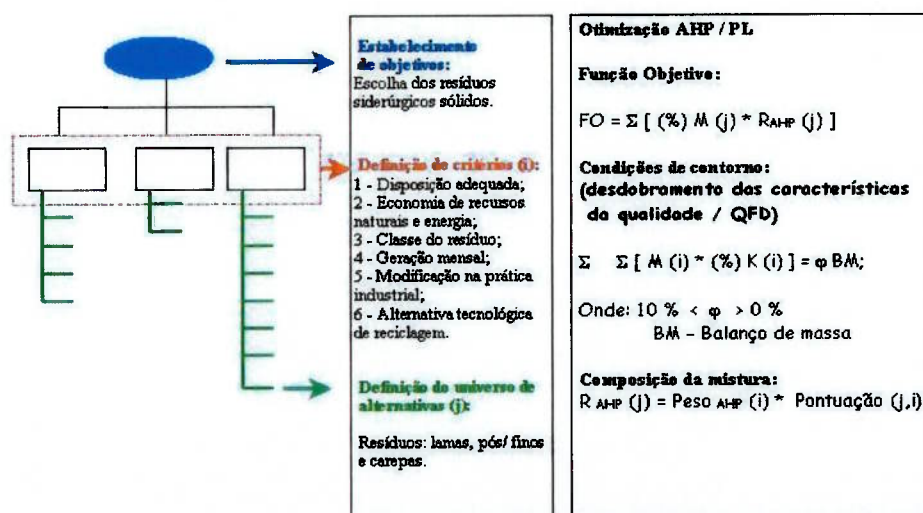


Figura 79 – Diagrama do modelo do processo de decisão multicritério usando AHP otimizado via programação linear

5.5.2 – Construção da escala de priorização para a reciclagem dos resíduos

Para a construção da escala de priorização foi utilizado o método AHP, sendo que os critérios foram definidos tendo como linha mestra duas vertentes: meio-ambiente e o processo industrial. Estes dois critérios foram sequencialmente desdobrados formando uma matriz de comparações paritárias, indicada na figura 81.

5.2.2.1 – Definição dos critérios primários

5.2.2.1.1 - Disposição mais adequada (C) – Este critério foi estabelecido visando possibilitar a melhor prática na disposição dos resíduos siderúrgicos; dentre as possibilidades temos: a inertização/incineração; disposição em aterro industrial; venda; o armazenamento temporário / definitivo e a reciclagem interna.

Onde: C1: Inertização/incineração (externo) > C2: Armazenamento temporário/definitivo > C3: Venda > C4: Reciclagem (interna)

Neste item vale uma observação, uma vez que se tratando de um modelo matemático que busca a maximização de uma função objetivo, a priorização visa a escolha dos resíduos que não estão tendo a melhor prática ambiental. Desta forma, o modelo deverá indicar uma preferência na escolha de um resíduo que está sendo inertizado/incinerado sobre um resíduo que já é reciclado.

5.2.2.1.2 - Economia de recursos naturais e energia (F) – Este critério está relacionado com o benefício econômico gerado pelo maior valor agregado decorrente da composição química dos resíduos, a saber: teores de ferro metálico contido (substituição de sucata de aço); teor de carbono (substituição de combustíveis); teor de ferro total (substituição de minérios); teor de cálcio e magnésio (substituição de escorificantes), onde:

F1: Teor de ferro metálico (% Fe⁰) > F2: Teor de combustíveis (% C) > F3: > minérios de ferro (Fe_s) > F4: escorificantes (% CaO + %MgO)

5.2.2.1.3 - Classe do resíduo (D) – Este critério foi definido em função da periculosidade e da reatividade dos resíduos, representada pela presença de elementos e substâncias químicas perniciosas ao biota, onde:

D1: tipo I ($\% \text{Zn} + \% \text{Óleos e graxas}$) **> D2: tipo II** ($\% \text{CaO} + \% \text{MgO} + \% \text{K}_2\text{O} + \% \text{Na}_2\text{O} + \% \text{P}_2\text{O}_5 + \% \text{S}$) **> D3: tipo III** ($\% \text{C} + \% \text{Fet} + \% \text{SiO}_2 + \% \text{TiO}_2 + \% \text{MnO} + \% \text{Al}_2\text{O}_3$)

5.2.2.1.4 - Geração mensal (E) – Este critério está relacionado com a quantidade relativa de resíduos gerados em função da produção / transformação do aço na usina siderúrgica conjuntamente com a quantidade de resíduos estocados a ser consumida no período de 2 anos, onde:

E1: Maior geração (Acima de 20.001 t./ano) **> D2: média geração** (10.001 a 20.000 t./ano) **> D3: menor geração anual até 10.000 t./ano)**

5.2.2.1.5 - Alternativa tecnológica da rota de reciclagem (B) - Este critério foi definido em função da facilidade e praticidade de se manusear, transportar e reciclar os resíduos, em decorrência da maior ou menor complexidade das operações unitárias necessárias para se transformar os resíduos em um novo produto (aglomerado), onde:

Manuseio “in natura” > granulação/micropelotização > pelotização > briquetagem

5.2.2.1.6 - Manutenção da prática industrial existente (A) – Este critério visa à classificação dos resíduos em função de suas propriedades deletérias quando retornados ao processo industrial; ou seja, pela presença de elementos e substâncias que podem modificar e/ou dificultar a prática operacional como: umidade, teor de enxofre, teor de fósforo, álcalis, perda térmica, etc. No modelo proposto deve-se minimizar os efeitos deletérios sobre o processo metalúrgico, onde:

Presença de umidade ($\% \text{H}_2\text{O}$) **> % ganga** ($\% \text{Al}_2\text{O}_3 + \% \text{TiO}_2 + \% \text{SiO}_2$) **> STE do resíduo** ($-\text{STE}$) **> % elementos deletérios** ($\% \text{P}_2\text{O}_5 + \% \text{S} + \% \text{Na}_2\text{O} + \% \text{K}_2\text{O} + \% \text{Zn}$)

* O símbolo (>) – indica maior grau de preferência na escolha (econômica, ambiental, industrial, etc.).

Cada critério avaliado recebeu uma nota (variando de 1 a 9 – tabela XXV, página 111), sendo possível calcular o peso relativo de cada critério definido (equações 81 a 87) mostrado pelo gráfico da figura 80. A tabela XLII apresenta a forma descritiva das notas atribuídas aos julgamentos e a tabela XLIII apresenta a descrição semântica utilizada nos julgamentos entre os critérios primários da matriz de comparações.

Tabela XLII – Matriz de comparação paritárias dos critérios primários do modelo hierárquico (critérios primários)

Critérios Primários	(C) Disposição mais adequada	(F) Economia de recursos naturais e energia	(D) Classe do resíduo	(E) Geração mensal do resíduo	(A) Manutenção da prática industrial	(B) Alternativa tecnológica de reciclagem	Peso CP %
(C) Disposição mais adequada	1	5	1/7	4	1/3	1/2	11,24
(F) Economia de recursos naturais e energia	1/5	1	1/6	1/2	1/6	1/4	3,72
(D) Classe do resíduo	7	6	1	9	1	3	36,49
(E) Geração mensal do resíduo	1/4	2	1/9	1	1/6	1/3	4,64
(A) Manutenção da prática industrial	3	6	1	6	1	4	31,25
(B) Alternativa tecnológica de reciclagem	2	4	1/3	3	1/4	1	12,66
						soma	100,00

Tabela XLIII – Análise da semântica das comparações paritárias ente os vários critérios principais (A, B, C, D, E, F)

Critério #i	Critério #j	Notas	Escala semântica de comparações
(C)	(F)	5	O critério (C) tem: "forte importância" quando comparado ao critério (F)
(C)	(D)	1/7	O critério (D) tem: "importância comprovada ou importância muito forte" quando comparado ao critério (C)
(C) (continua)	(E)	4	O critério (C) tem: "importância moderada a forte" quando comparado ao critério (E)

(C)	(A)	1/3	O critério (A) tem: "importância moderada ou fraca" quando comparado ao critério (C)
(C)	(B)	1/2	O critério (B) é: "quase semelhante" quando comparado ao critério (C)
(F)	(D)	1/6	O critério (D) tem: "forte a muito forte importância" quando comparado ao critério (F)
(F)	(E)	1/2	O critério (E) tem: "quase semelhante" quando comparado ao critério (F)
(F)	(A)	1/6	O critério (A) tem: "forte a muito forte importância" quando comparado ao critério (F)
(F)	(B)	1/4	O critério (B) tem: "importância moderada a forte" quando comparado ao critério (F)
(D)	(E)	9	O critério (D) é: "extremamente importante" quando comparado ao critério (E)
(D)	(A)	1	O critério (D) tem: "importância igual ou semelhante" quando comparado ao critério (A)
(D)	(B)	3	O critério(D) tem: "importância moderada ou fraca" quando comparado ao critério (B)
(E)	(A)	1/6	O critério (A) tem: "forte a muito forte importância" quando comparado ao critério (E)
(E)	(B)	1/3	O critério (B) tem: "importância moderada ou fraca" quando comparado ao critério (E)
(A)	(B)	4	O critério (A) tem: "importância moderada a forte" quando comparado ao critério (B)

Observação: A matriz quadrada (6x6) apresenta ao todo 36 comparações, sendo 6 unitárias (elementos da diagonal principal) e 15 comparações recíprocas.

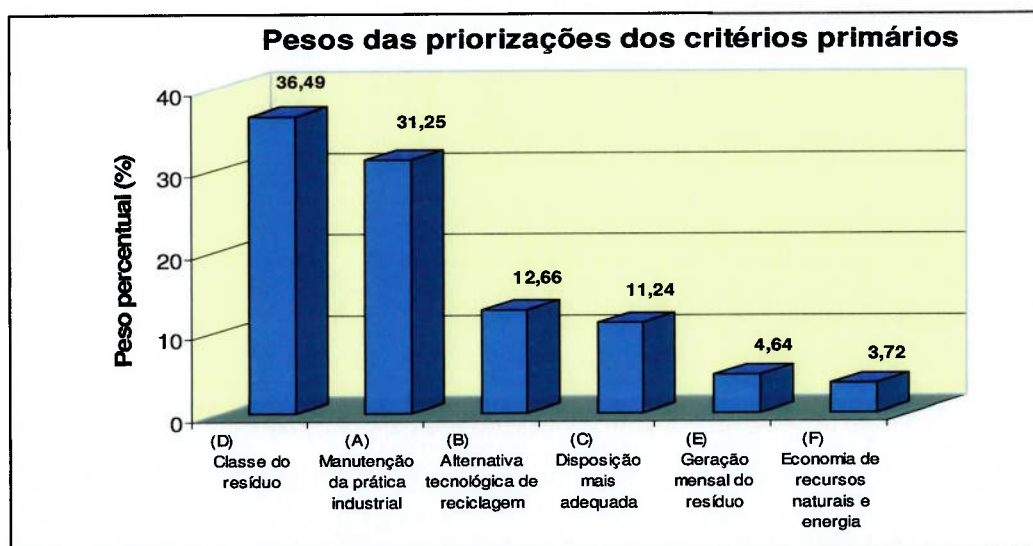


Figura 80– Pesos obtidos das priorizações entre os critérios (A a F da matriz dos critérios primários), utilizando-se da metodologia AHP

5.2.2.2 - Definição dos critérios secundários

Em seguida, os critérios primários foram desdobrados em critérios secundários, sendo comparados paritariamente, de modo a formar as respectivas matrizes de comparações indicadas na tabela XLIV. Então foi aplicado o mesmo procedimento de cálculo para a determinação da escala de priorização (equações 81 a 87).

Tabela XLIV – Matriz de comparação paritárias dos critérios do modelo hierárquico (critérios secundários)

A (manutenção da prática industrial)	STE A3	Umidade A4	Ganga A1	Deletérios A2	Peso CS%
A3 - STE	1	1/6	1/3	4	12,42
A4 - Umidade	6	1	4	9	58,96
A1 - Ganga	3	1/4	1	5	24,16
A2 - Deletérios	1/4	1/9	1/5	1	4,46
				soma	100,00
B (alternativa tecnológica)	Briquetagem B1	Pelotização B2	Granulação B3	Manuseio (in natura) B4	%
B1 - Briquetagem	1	1/5	1/7	1/9	4,17
B2 - Pelotização	5	1	1/3	1/5	13,30
B3 - Granulação	7	3	1	1/3	26,76
B4 - Manuseio (in natura)	9	5	3	1	55,77
				soma	100,00
C (disposição mais adequada)	Reciclagem C4	Venda C3	Acumulação C2	Inertização C1	%
C4 - Reciclagem	1	1/3	1/7	1/9	4,13
C3 - Venda	3	1	1/3	1/7	12,03
C2 - Acumulação	7	3	1	1/5	25,49
C1 - Inertização	9	7	5	1	58,36
				soma	100,00
F (economia de recursos naturais e energia)	Sucatas F1	Carbono F2	Minérios F3	Escorificantes F4	%
F1 - Sucatas	1	3	7	9	59,70
F2 - Carbono	1/3	1	3	6	25,32
F3 - Minérios	1/7	1/3	1	3	10,26
F4 - Escorificantes	1/9	1/6	1/3	1	4,73
				soma	100,00
(continua)					

D (classe do resíduo)	Tipo I D1	Tipo II D2	Tipo III D3	%
D1 - Tipo I	1	9	8	79,78
D2 - Tipo II	0.11	1	2	12,23
D3 - Tipo III	0.13	0.50	1	7,99
			soma	100,00
E (geração do resíduo)	Elevada E1	Média E2	Baixa E3	%
E1 - Elevada	1	5	9	74,82
E2 - Média	1/5	1	3	18,04
E3 - Baixa	1/9	1/3	1	7,14
			soma	100,00

5.2.3 - Razão de consistência (CR) e índice aleatório (RI)

A análise de consistência dos julgamentos (notas das comparações paritárias) foi realizada através do cálculo da razão de consistência, do índice de consistência e do índice aleatório (equações: 73, 74 e 76 respectivamente).

Os resultados destes cálculos são apresentados na tabela XLV, onde se observa que as notas dos julgamentos das matrizes foram consistentes, ou seja, apresentaram valores do parâmetro CR (razão de consistência) inferior a 10% (0,10).

Tabela XLV – Resumo dos parâmetros para a análise de consistência:

λ_{\max} , n, RI, CI, e CR

Critérios primários	A	B	C	D	E	F
λ_{\max}	λ_{\max}	λ_{\max}	λ_{\max}	λ_{\max}	λ_{\max}	λ_{\max}
6,40	4,18	4,17	4,21	3,08	3,03	4,09
n	n	n	n	n	n	n
6	4	4	4	3	3	4
RI	RI	RI	RI	RI	RI	RI
1,24	0,9	0,9	0,9	0,58	0,58	0,9
CI	CI	CI	CI	CI	CI	CI
0,080	0,061	0,058	0,071	0,038	0,015	0,030
CR	CR	CR	CR	CR	CR	CR
0,064	0,068	0,065	0,079	0,065	0,025	0,034

A partir da obtenção dos pesos obtidos pelas comparações entre os critérios primários e secundários, foi possível obter a árvore decisória do processo de priorização dos resíduos, apresentada a seguir na figura 81.

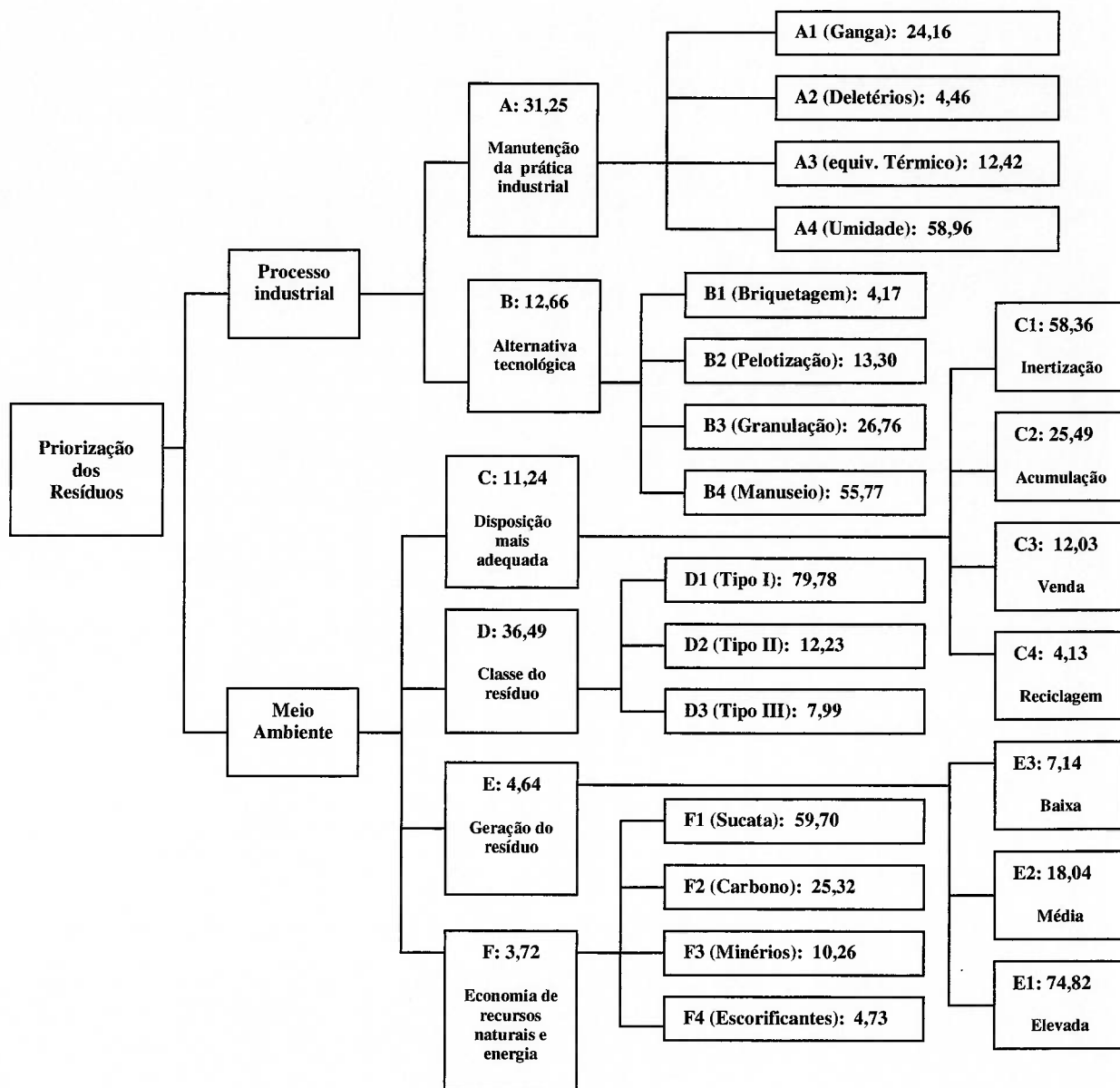


Figura 81 Árvore decisória do modelo multicritério priorização da escolha dos resíduos siderúrgicos

5.2.4 - Priorização da escolha dos resíduos siderúrgicos usando o método AHP

- **Escala de priorização dos Resíduos – $R_{AHP}(j)$:**

A pontuação dada para cada resíduo de acordo com as classificações dos critérios da metodologia de comparação relativa do método de tomada de decisão multicritério - AHP; descrita pelas fórmulas apresentadas a seguir; possibilitou a criação de uma escala de valores relativos que expressa com base no modelo proposto o benefício seja do ponto de vista ambiental, seja do ponto de vista do processo industrial de se reciclar cada um dos resíduos industriais.

$$R_{AHP}(j) = \text{Peso AHP}(i) * \text{Pontuação}(j,i); \text{ onde:} \quad (93)$$

Peso AHP (i) – vetor de síntese dos resultados (colunas Peso CP % e Peso CS%, das tabelas XLII e XLIV)

Pontuação (j,i) – Resultado da nota do resíduo (j) no desdobramento do critério (i) obtido através dos levantamentos realizados para a construção da base de dados do modelo

- **Modelo matemático de priorização:**

$$R_{AHP}(j) = \{ [(A)*[G(j)*[A3*(-STE) + A4*(\%H_2O) + A1*(\%SiO_2 + \%Al_2O_3 + \%TiO_2) + A2*(\%P_2O_5 + \%S + \%Na_2O + \%K_2O + \%Zn)]]] + [(B)*[G(j)*[B1*(\%B_r) + B2*(\%P) + B3*(\%G) + B4*(\%M)]]] + [(C)*[G(j)*[C4*(\%R) + C3*(\%V) + C2*(\%A_c) + C1*(\%I)]]] + [(D)*[G(j)*[D1*(\%Zn + \%Óleos e graxas) + D2*(\%CaO + \%MgO + \%K_2O + \%Na_2O + \%P_2O_5 + \%S) + D3*(\%C + \%Fet + \%SiO_2 + \%TiO_2 + \%MnO + \%Al_2O_3)]]] + [(E)*(E1*G(j) ou E2*G(j) ou E3*G(j))] + [(F)*[G(j)*[F1*(\%Fe^0) + F2*(\%C) + F3*(\%Fe_t) + F4*(\%CaO + \%MgO)]]] \} \quad (94)$$

Onde:

(A), (B), (C), (D), (E) e (F) – são os coeficientes das comparações paritárias dos critérios de priorização primários; (colunas Peso CP % da tabelas XLII);

(A1), (A2), (A3), (A4), (B1), (B2), (B3), (B4), (C1), (C2), (C3), (C4), (D1), (D2), (D3), (E1), (E2), (E3), (F1), (F2), (F3), (F4) – são os coeficientes das comparações paritárias dos critérios de priorização secundários; (coluna Peso CS% da tabela XLIV)

G(j) – Geração anual do resíduo somando-se 50% do estoque de resíduo (j), (tabela XXIX);

(-STE) – Equivalente térmico em sucata aproximado de 1 tonelada do resíduo (j), (*-1), o valor multiplicativo negativo (-1) é devido que a utilização dos resíduos irá afetar negativamente o balanço térmico dos processos metalúrgicos consumindo energia do sistema;

(% H₂O, % SiO₂, % Al₂O₃, % TiO₂, % P₂O₅, ... %C, %Fe, %Zn) - são os percentuais em massa das substâncias e elementos presentes no resíduo (j), (tabelas XXX, XXXII e XXXIII);

(%R, %V, %A_c, %I) – Partição % em massa da destinação atual do resíduo (j), respectivamente para a reciclagem interna, venda, acumulação ou inertização (incineração);

(%B_r, %P, %G, %M) – Partição % em massa da destinação na rota de reciclagem do resíduo (j), respectivamente para briquetagem, pelotização, granulação e manuseio ‘in natura’. Estes valores foram alimentados ao modelo de forma iterativa após realização das simulações.

Exemplo numérico (Resíduo: LOGFF – Lama gerada no sistema de limpeza de gases da aciaria #2, durante o sopro de oxigênio nos conversores LD).

Modelo: $R_{AHP} (LOGFF) = \{ [(0,3125)*(94,423)*((0,1242)*(-1,25) + (0,5896)*(0,2172) + (0,2416)*(0,00643 + 0,00127 + 0,00063) + (0,0446)*(0,00118 + 0,00054 + 0,00118 + 0,00127 + 0,00030))] + [(0,1266)*(94,423)*((0,0417)*(0,665) + (0,1330)*(0,000) + (0,2676)*(0,335) + (0,5576)*(0,000))] + [(0,1124)*((0,0413)*(67,200) + (0,1203)*(0,000) + (0,2549)*(27223) + (0,5836)*(0,000))] + [(0,3649)*(94,243)*((0,7978)*(0,00030 + 0,000) + (0,1228)*(0,04322 + 0,01160 + 0,00127 + 0,00118 + 0,00118 + 0,00054) + (0,0799)*(0,00752 + 0,77055 + 0,00643 + 0,00063 + 0,001486 + 0,00127))] + [(0,0464)*((0,7482)*(94,423) + (0,1804)*(0,000) + (0,0714)*(0,000))] + [(0,0372)*(94,423)*((0,5970)*(0,17123) + (0,2532)*(0,00752) + (0,1026)*(0,77055) + (0,0473)*(0,04322 + 0,00160))] = 8.540 pontos$

Tabela XLVI – Resultados do modelamento de priorização dos resíduos siderúrgicos sólidos

$R_{AHP}(j)$	LOGFF	LOGFG	CMEA	CMLC	POSEC	POEDG2	POCAL
F	657,92	280,08	150,76	52,02	2,88	8,29	10,60
E	3278,03	477,35	153,60	148,49	3,30	11,81	19,88
D	2846,51	421,65	559,31	541,90	31,88	134,11	257,92
C	1091,91	63,83	85,18	82,35	4,62	16,54	27,85
B	1402,37	538,41	718,54	694,65	16,65	139,56	234,94
A	-736,97	-384,38	-458,18	-658,61	-44,80	-153,46	-417,69
Total	8540	1397	1209	861	15	157	134
R_{AHP} padronizado	65,57	10,73	9,28	6,61	0,11	1,20	1,03
$R_{AHP}(j)$	SOLCAL	CALADR	LETL	POCOL	LAFF	LAFFG	PDCCOR
F	9,00	13,24	13,36	362,56	158,36	45,50	12,73
E	15,90	24,98	16,07	3332,78	1495,27	100,45	15,90
D	177,01	324,08	147,86	2877,36	1334,14	361,25	140,70
C	22,28	216,00	138,96	445,64	574,43	55,71	22,28
B	187,96	201,51	67,22	3759,11	1459,17	469,89	187,96
A	-315,06	-264,18	-233,70	2245,88	2020,37	491,38	-283,54
Total	97	516	150	13023	7042	1524	96
R_{AHP} padronizado	0,75	3,96	1,15	100,00	54,07	11,70	0,74
$R_{AHP}(j)$	PDCSIL	CLTQ	CLCG	LSTRA	LSTAA	LCC3	ETLIII
F	32,86	284,76	109,51	14,05	9,92	26,21	11,36
E	85,38	1249,79	120,54	14,00	13,07	90,40	17,89
D	299,20	1334,19	568,92	141,48	126,96	351,53	224,65
C	47,35	167,12	66,85	71,90	45,39	130,36	25,07
B	399,41	1409,67	563,87	82,72	154,48	422,90	211,45
A	-368,59	-1012,22	-415,36	77,64	270,45	364,73	-383,18
total	496	3433	1014	402	620	1386	107
R_{AHP} padronizado	3,81	26,36	7,79	3,09	4,76	10,64	0,82

5.2.5 – Análise do modelo de priorização AHP

Visando avaliar o comportamento do modelo de priorização (AHP) com outros possíveis modelos de priorização levando-se em conta critérios/atributos de priorização (composição química, geração dos resíduos, etc.). Foram construídos modelos padronizados em uma escala linear (0 a 100%) tendo então seu comportamento comparado através do cálculo da diferença quadrática média (DQM, equação 95). A figura 82 apresenta o comportamento destes modelos construídos.

Tabela XLVII – Priorização dos resíduos siderúrgicos através da formação de uma escala padronizada em modelos construídos com diferentes atributos

Modelo/ resíduo	Priorização (AHP)	Geração	Fe, contido	%(Fet+CaO+C) contido	%C contido
LOGFF	65,57	98,36	100,00	100,00	3,32
LOGFG	10,73	14,32	15,94	16,43	0,52
CMEA	9,28	19,11	21,41	20,44	0,28
CMLC	6,61	18,48	18,13	17,48	0,23
POSEC	0,11	1,04	0,86	1,04	0,08
PEDG2	1,20	3,71	1,44	3,56	0,60
POCAL	1,03	6,25	0,40	6,30	0,00
SOLCAL	0,75	5,00	1,72	4,29	0,00
CALADR	3,96	7,85	0,50	7,92	0,00
LETL	1,15	5,05	4,35	4,40	0,15
POCOL	100,00	100,00	54,59	83,23	100,00
LAFFF	54,07	44,87	23,58	36,35	43,88
LAFFG	11,70	12,50	7,06	10,52	12,36
PDCCOR	0,74	5,00	4,36	4,18	0,22
PDCSIL	3,81	10,63	8,79	9,47	4,02
CLTQ	26,36	37,50	40,33	37,90	0,20
CLCG	7,79	15,00	15,87	14,95	0,15
LSTRA	3,09	4,40	3,86	4,10	1,56
LSTAA	4,76	4,11	3,14	3,26	0,33
LCC3	10,64	11,25	8,37	8,35	1,17
ETLIII	0,82	5,63	0,38	5,00	1,80
DQM	-	2,09	3,36	2,39	3,41

A análise do desvio quadrático médio (DQM), foi realizada visando calcular qual dos modelos mais se aproximam do modelo de priorização utilizando a metodologia de hierarquização analítica (AHP).

$$DQM = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{AHP})^2}{n} \right]^{1/2} \quad (95)$$

Onde: n é a quantidade de resíduos do modelo;

X_i : Valor padronizado da priorização do resíduo (i) em um dado modelo;

X_{AHP} : Valor padronizado da priorização do resíduo (i) no modelo AHP.

A análise do comportamento matemático do valor de DQM indica que quanto mais próximo de zero, mais semelhante é o comportamento entre os modelos comparados. Já, quanto mais próximo o valor de DQM se aproximar de 20,16; menos semelhantes os modelos comparados serão entre si.

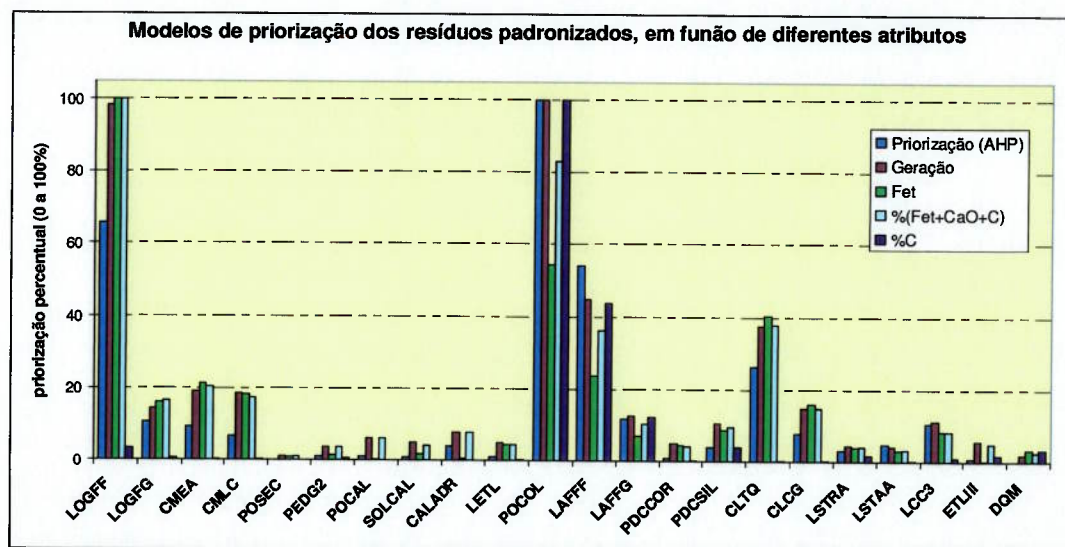


Figura 82 – Variação da pontuação dos modelos de priorização dos resíduos siderúrgicos sólidos - Diferentes modelos ponderados pelo fator geração G(j) dos resíduos. (escala padronizada: 0 a 100%)

Observa-se uma maior aproximação entre o modelo de priorização através do método AHP e de geração dos resíduos: (DQM mais próximo de zero). Este fato é decorrente do fator $G(j)$ utilizado no modelo de priorização AHP (índice multiplicativo do modelo matemático) para a construção da escala de priorização (equação 94).

Podem-se construir outros modelos de priorização, como por exemplo, modelos não ponderados pelo fator de geração dos resíduos [fator $G(j)$]. Isto acarreta a construção de modelos ainda mais pobres e menos adequados, uma vez que estes modelos acabam equalizando ou igualando as variações entre as escolhas. Ou seja, nestes tipos de modelos não ponderados, todos resíduos tendem a serem semelhantes, conforme pode ser observado pelo gráfico da figura 83. A tabela XLVIII apresenta um resumo da comparação entre os modelos construídos.

Tabela XLVIII – Comparações entre modelos de priorização dos resíduos sólidos siderúrgicos

Modelos	Vantagens	Facilidade
AHP	Multicriterial, ponderado por vários critérios (econômicos, industriais e ambientais) sendo também ponderado pelo fator $G(j)$ (volume de material gerado).	Maior complexidade
$\%Fe_t * G(j)$	Modelo pobre: Leva em consideração apenas um parâmetro, que representa a equivalência ferro contido nos resíduos (com minérios de ferro). Em decorrência da dificuldade intrínseca de análise quantitativa das diferentes espécies que contém ferro (Fe^0 , Fe^{2+} , Fe^{3+}), é incapaz de garantir o maior retorno econômico e acerto no balanço energético.	Simples
(continua)		

% C * G(j)	Modelo pobre: Leva em consideração apenas um parâmetro, que representa a equivalência em combustíveis/redutores, chegando a deixar de fora 3 resíduos da escala (notas nulas); o carbono total é um índice que composto por diferentes fontes e formas de carbono, sendo também incapaz de distinguir fontes deste elemento que são muito prejudiciais ao processo de reciclagem, como o carbono proveniente de contaminações com óleo e graxas por exemplo.	Simples
% (Fe_t + %C + CaO) * G(j)	Modelo menos pobre: Apresenta semelhança com o modelo AHP (valor de DQM = 2,39). Este índice representa uma equivalência de retorno econômico (minério de ferro, combustível e escorificante), porém apresenta os mesmo defeitos de um modelo mais simplificado.	Simples
Geração; [G(j)]	Modelo pobre: Leva em consideração apenas um atributo - geração do resíduo (Este atributo é um dos parâmetros mais importante do ponto de vista de engenharia de uma unidade industrial). Por isto, o fator de geração está embutido em todos os modelos construídos para comparação, uma vez que pondera todas as análises químicas existentes, para a determinação das massas contidas.	Muito simples
% (Fe_t+ %C + CaO)	Modelo muito pobre: levando em consideração somente os teores de carbono, ferro total e cálcia contido nos resíduos. Apresenta elevado desvio quadrático em relação ao modelo AHP; (valor de DQM = 14,38).	Muito simples

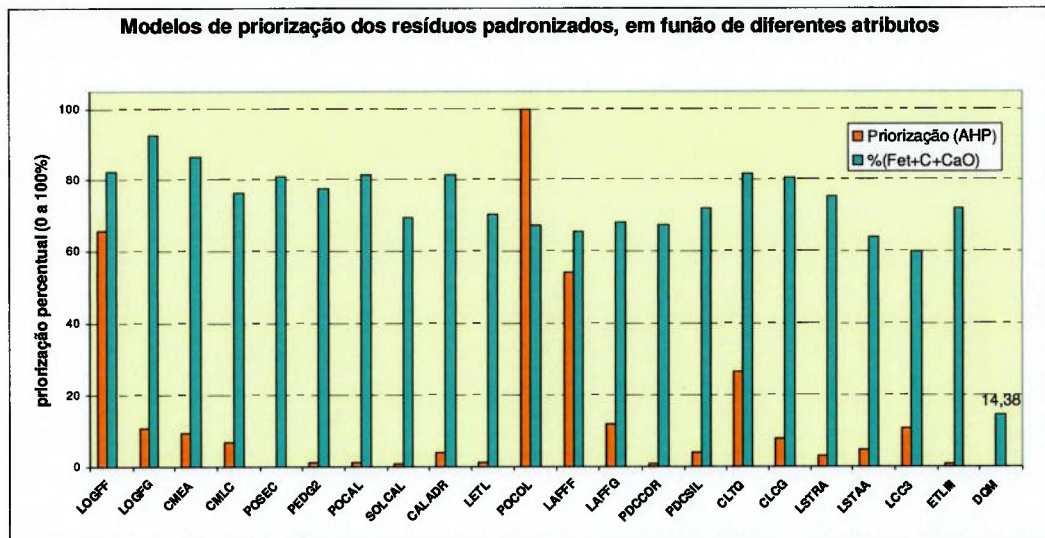


Figura 83 – Modelo de priorização em função dos elementos contidos $\%(\text{Fe}_t + \text{CaO} + \text{C})$ comparado com o modelo AHP. Nota-se a grande diferença entre os dois modelos (DMQ calculado de 14,38)

5.3 - Simulações e otimização do modelo de reciclagem: Programação Linear

As simulações realizadas basearam-se em vários cenários distintos onde se buscou a maximização da produção de misturas para a produção de briquetes a serem utilizados como carga sólida na aciaria e granulados destinados às sinterizações. Este cenário apresenta a melhor relação entre investimento inicial e taxa de retorno financeiro para um projeto de instalação de uma unidade de reciclagem (construção, operacionalização, manutenção e amortização do investimento), quando se limita o consumo de briquetes a 170.000 toneladas/ano nos conversores.

Este cenário foi dividido em duas partes, sendo a primeira consumindo o estoque de resíduos em um prazo de dois anos (passivo ambiental) e a segunda sem a existência de resíduos estocados (somente consumindo os resíduos gerados).

Para a obtenção de misturas de resíduos capazes de promover aglomerados técnica e ambientalmente comprometidos, foi empregado o Solver-MS Excel[®] que visa à solução de sistemas de equações lineares sujeitos a uma série de restrições (função objetivo e suas restrições). Desta forma, buscou-se a maximização dos resultados expresso pela função objetivo (FO).

Através de um modelo multicriterial, a variável custo foi substituída pela variável da escala de priorização de cada resíduo, denominada de R_{AHP} (equação 94).

$$FO = \sum_{j=1}^n G(j) * R_{AHP} (j) \quad (96)$$

Sujeito às condições de contorno deste modelo elaborado

5.3.1 - Cenário: Maximização da produção de briquetes para a aciaria

Briquetar os resíduos que contenham maior teor de ferro total, e maior tamanho de partículas, em especial as carepas; uma vez que estas são difíceis de serem aglomeradas a baixo custo por outros métodos. O briquete seria então destinado a aciaria, na forma de carga metálica sólida, sendo um substituto misto de sucata ferrosa e escorificantes (sinter, cal, calcário, dolomita, etc.). Neste caso as principais condições de contorno para a elaboração de briquetes destinados à aciaria (restrições) do modelo são:

- Maximizar a recuperação do Fe_e metálico disponível nos resíduos;
- Minimizar a presença de elementos deletérios (fósforo e enxofre);
- Minimizar a umidade;
- Trabalhar em condições básica;
- Consumir a geração de resíduos e o passivo ambiental (prazo de 2 anos).

As condições de contorno foram definidas em função de aspectos tecnológicos e econômicos decorrente dos fatores de processamento e utilização apresentados na revisão bibliográfica (capítulo 3, subitens: 3.1 e 3.2, em especial as tabelas IX, X, XIV e na coluna de justificativas da tabela L mostrada a seguir). Os resultados das simulações são indicados pelas tabelas LI, LII e LIII apresentadas adiante.

Tabela XLIX – Condições de contorno e especificações do cenário de briquetagem (1^o e 2^o anos de operação)

Resumo	Limite Inferior de Especificação	Limite Superior de Especificação	Condição de contorno	Justificativas
Umidade (%)	2,0	3,0	Minimizar	Evitar / minimizar reações e explosões “splashing” de materiais e perda de energia
(continua)				

Álcalis (Na ₂ O +K ₂ O) (%)		< 0,35	Minimizar (menor restrição)	Recirculação, incrustações de sais, óxidos e variações no pH da água do sistema de lavagem de gases
Fe metálico (%)			Fixar e calcular	Elevar retorno econômico (substituição de sucatas)
Fe total (%)	65,0	80,0	Maximizar	Elevar retorno econômico, elevar a taxa de formação de escória no início do sopro de oxigênio
Óleos (%)			Fixar	Não direcionar óleos para as sinterizações, diminuindo a formação de dioxinas
Combustíveis (Carbono)	1,7	5,5	Minimizar	Aspecto econômico, direcionando o carbono para a sinterização
BB - (C/S)	3,5	4,5	Fixar	Minimizar a corrosão dos refratários
S - Enxofre (%)	0,040	0,085	Minimizar	Evitar a introdução de enxofre
Zn - Zinco (%)		< 0,015	Fixar (menor restrição)	Não utilização de sucatas externas pela COSIPA
P ₂ O ₅ – Fósforo (%)	0,085	0,115	Minimizar (fixar)	Objetivar o mesmo fósforo do gusa líquido
STE	1,00	1,35	Calcular	Ajustar o balanço térmico do controle estático de cálculo dos conversores

5.3.1.1 - Resultado da Otimização: Primeiros 2 anos de operação consumindo 50% do passivo ambiental/ano: Briquetes:

Tabela L – Resumo dos resultados da simulação realizada para a determinação da proporção entre os componentes da mistura dos resíduos utilizando parte do material estocado na ADR: aglomeração por briquetagem (proporção de matérias primas, composição química esperada e valor da pontuação da simulação)

Briquetes (1^o e 2^o anos de operação)				
Componentes		(%)	Substância- Elemento	(%)
LOGFF	0,315	31,545	Fe (metálico)	20,015
LOGFG	0,079	7,853	C	0,724
CMEA	0,103	10,273	Fe total	74,920
CMLC	0,107	10,657	FeO	-
POSEC	0,004	0,381	Fe ₂ O ₃	-
POEDG2	0,000	0,000	CaO	5,871
POCAL	0,000	0,000	SiO ₂	1,315
PODOL	0,000	0,000	Al ₂ O ₃	0,355
SOLCAL	0,024	2,367	MgO	1,469
CALADR	0,010	1,027	TiO ₂	0,045
LETL	0,015	1,533	MnO	0,997
POCOL	0,000	0,000	Na ₂ O	0,206
LAFFF	0,000	0,000	K ₂ O	0,058
LAFFG	0,000	0,000	Zn	0,010
PDCCOR	0,000	0,000	S	0,038
PDCSIL	0,000	0,000	P ₂ O ₅	0,105
CLTQ	0,215	21,480	Óleo	1,091
CLCG	0,088	8,797	Umidade	0,000
LSTRA	0,013	1,317	Total	-
LSTAA	0,000	0,000	Resumo	
LCC3	0,000	0,000	Álcalis	0,264
ETLII	0,028	2,771	Voláteis (óleos)	1,091
Total	1,0000	100,00	Combustíveis (C+óleo)	1,815
			FO (Mistura i)	3864,46

Tabela LI - Composição química esperada padronizada (briquetes)

Elementos/Compostos	(%)	Padronização - Base seca
Fe (metálico)	20,015	18,972
C	0,724	0,687
Fe total	74,982	71,073
FeO	-	-
Fe ₂ O ₃	-	-
CaO	7,940	7,526
SiO ₂	1,919	1,819
Al ₂ O ₃	0,511	0,484
MgO	1,486	1,409
TiO ₂	0,045	0,042
MnO	0,997	0,945
Na ₂ O	0,207	0,196
K ₂ O	0,081	0,077
Zn	0,010	0,010
S	0,079	0,075
P ₂ O ₅	0,105	0,100
Óleos	1,091	1,034
Umidade	2,500	

A partir do resultado da simulação de mistura realizada, foi possível determinar o valor de q (quociente da distribuição) através de método iterativo de cálculo (mínimos quadrados), para uma função de empacotamento de partículas do modelo de Andreasen. O valor de $q = 0,17$ encontrado; está longe de ser o mais adequado para a maximização do empacotamento ($q = 0,37$), porém é bem superior ao valor de q encontrado para a mistura granulada (0,08). Do ponto de vista de engenharia, este menor valor de q , pode ser contornado de duas formas: moagem e classificação seguida do ajuste da granulometria dos resíduos (bastante inviável do ponto de vista econômico) ou ajuste do teor de ligante e utilização de uma briquetadora de maior capacidade (pressão específica).

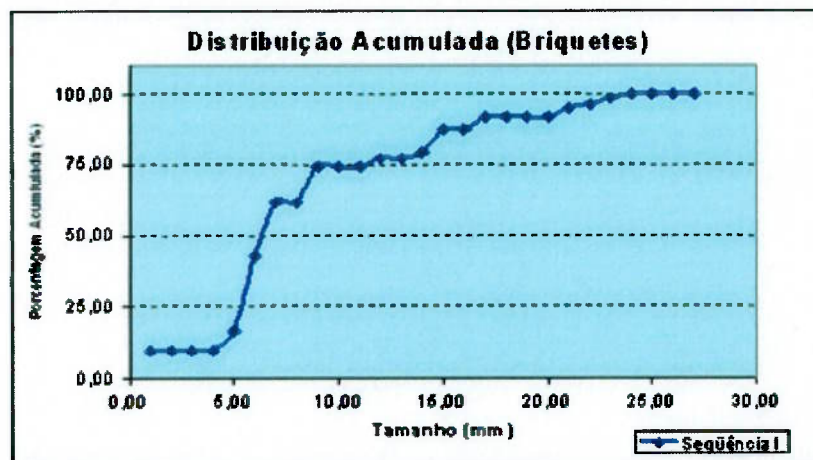


Figura 84 – Curva granulométrica da distribuição de tamanho de partículas acumulada da mistura a ser briquetada (sem aditivos, consumindo os resíduos estocados na ADR, $q = 0,17$ – Modelo de Andreasen)

5.3.1.2 - Resultado da Otimização: Primeiros 2 anos de operação consumindo 50% do passivo ambiental/ano: Produção de aglomerados (destinados às unidades de sinterização)

As misturas foram otimizadas, baseando-se nas seguintes condições de contorno descritas a seguir. As tabelas LII e LIII apresentam os resultados obtidos nestas simulações.

- Maximizar a recuperação do Fe, disponível nos resíduos;
- Maximizar a recuperação de fontes combustíveis: a base de carbono;
- Minimizar a presença de óleos (aspecto operacional do sistema de controle ambiental atualmente utilizado – precipitador eletrostático, e evitar a formação de dioxinas);
- Minimizar a presença de álcalis (sódio e potássio – diminuir a recirculação destes elementos nos altos-fornos);
- Minimizar o empacotamento das partículas (aumentar a porosidade)
- Adequar o teor de umidade do aglomerado;
- Consumir a geração de resíduos e o passivo ambiental (prazo de 2 anos).

Tabela LII – Resumo do resultado da simulação realizada para a determinação da proporção entre os componentes da mistura dos resíduos: aglomeração por granulação-pelotização (proporção de matérias primas, composição química esperada e valor da pontuação da simulação)

Micropelota-granulados (1^o e 2^o anos de operação)				
Componentes		(%)	Substância-Elemento	(%) base seca
LOGFF	0,119	11,910	Fe (metálico)	-
LOGFG	0,000	0,000	C	15,938
CMEA	0,000	0,000	Fe total	45,811
CMLC	0,000	0,000	FeO	-
POSEC	0,002	0,190	Fe ₂ O ₃	-
POEDG2	0,017	1,748	CaO	7,997
POCAL	0,029	2,939	SiO ₂	7,513
PODOL	0,000	0,000	Al ₂ O ₃	2,142
SOLCAL	0,000	0,000	MgO	1,764
CALADR	0,023	2,308	TiO ₂	0,084
LETL	0,005	0,492	MnO	0,557
POCOL	0,454	45,396	Na ₂ O	0,130
LAFFF	0,182	18,212	K ₂ O	0,106
LAFFG	0,052	5,165	Zn	0,064
PDCCOR	0,023	2,336	S	0,389
PDCSIL	0,050	4,953	P ₂ O ₅	0,302
CLTQ	0,000	0,000	Óleo	0,037
CLCG	0,000	0,000	Umidade	0,000
LSTRA	0,007	0,658	Total	-
LSTAA	0,007	0,711	Resumo	
LCC3	0,030	2,982	Álcalis	0,236
ETLII	0,000	0,000	Óleos	0,037
Total	1,0000	100,00	Combustíveis (C+óleos)	15,975
			FO (Mistura i)	8384,82

Nota-se que o valor da função objetivo encontrada para a mistura de grânulos otimizada (8385 pontos) evidencia que a utilização de resíduos nas unidades de sinterização é uma prática de elevado retorno, o que a ratifica como sendo uma

das alternativas industriais mais usuais. Porém, uma série de condições de contorno devem ser respeitadas para garantir sua efetividade.

Tabela LIII - Composição química esperada (micropelotas-grânulos), durante os 2 primeiros anos de operação da planta de reciclagem

Elementos/Compostos	(%)	Padronização – base úmida
Fe (metálico)	2,04	1,897
C	15,94	14,826
Fe total	45,98	42,774
FeO	10,36	-
Fe ₂ O ₃	50,82	-
CaO	12,48	11,614
SiO ₂	9,51	8,842
Al ₂ O ₃	2,69	2,503
MgO	1,83	1,706
TiO ₂	0,08	0,078
MnO	0,56	0,518
Na ₂ O	0,14	0,134
K ₂ O	0,16	0,149
Zn	0,06	0,059
S	0,48	0,446
P ₂ O ₅	0,30	0,281
Óleo	0,04	0,035
Umidade	7,00	6,512

A partir dos resultados obtidos pode-se estimar uma especificação teórica – tabela LIV, baseando-se em adições de possíveis aditivos e ligantes usualmente empregados em pelotas conformadas a frio (6,5 % de cimento Portland; 7% de umidade e até 1% de bentonito) e no erro envolvido das análises químicas: 8,4% (duas vezes o valor do desvio padrão encontrado para um fechamento em 100% das análises químicas dos resíduos). Deve-se ressaltar também que os resíduos sofrem mudanças ao longo do tempo em função da absorção de água, hidratação,

carbonatação e oxidação das espécies. Por isto, a unidade de reciclagem deve possuir um sistema de ajuste de composição química eficaz para minimizar estas flutuações de qualidade dos produtos produzidos.

Tabela LIV - Limites de especificação teórico dos aglomerados (micropelotas-granulados nos primeiros 2 anos de operação da planta de reciclagem)

Resumo	Limite Inferior de Especificação	Limite Superior de Especificação	Valor Nominal – Médio Padronizado
Umidade (%)	5	10	6-8
Álcalis totais (Na ₂ O+K ₂ O) (%)		< 0,35	
Fe total (%)	39,0	47,0	43,0
Óleos (%)	0,030	0,045	0,040
Combustíveis (Carbono)	13,5	16,0	16,0
BB - (C/S)	1,00	2,00	1,5
S - Enxofre (%)	0,40	0,55	0,50
Zn - Zinco (%)		<0,07	0,07
P ₂ O ₅ – Fósforo (%)	0,25	0,40	0,30

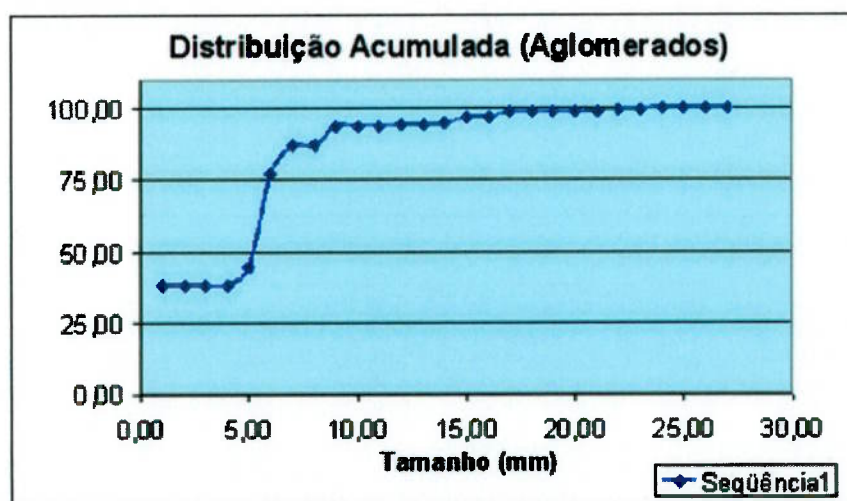


Figura 85 - Curva granulométrica da distribuição de tamanho de partículas acumulada da mistura a ser granulada-pelotizada (sem a adição de aditivos e consumindo os resíduos estocados na ADR; $q = 0,08$ – Modelo de Andreasen)

O valor de q (modelo de Andreasen) encontrado para esta distribuição é de 0,08; indicando que esta distribuição irá ter elevada porosidade (menor empacotamento). Este fato otimiza a permeabilidade e eleva a superfície de reação disponível, porém minimiza também a resistência mecânica dos grânulos, o que pode ser contornado pela utilização de aditivos como, por exemplo, o cimento tipo Portland.

5.3.1.3 - Balanço de Massa Global: 2 primeiros anos de operação, consumindo 50% do passivo ambiental estocado a cada ano da área de disposição de resíduos da COSIPA

Tendo como base os resultados obtidos das simulações de misturas realizadas, foi possível calcular o fluxo de matérias-primas e resíduos da unidade de reciclagem (balanço de massa). Estes cálculos são importantes para a determinação de um projeto de engenharia detalhado, contendo as especificações de equipamentos como: sistemas de armazenamento, silos, dosagens, mistura, aglomeração, secagem, entre outros. A figura 86, apresenta o diagrama do balanço de massa do processo de reciclagem onde são consumidos durante os 2 primeiros anos o passivo ambiental estocado na área de disposição de resíduos.

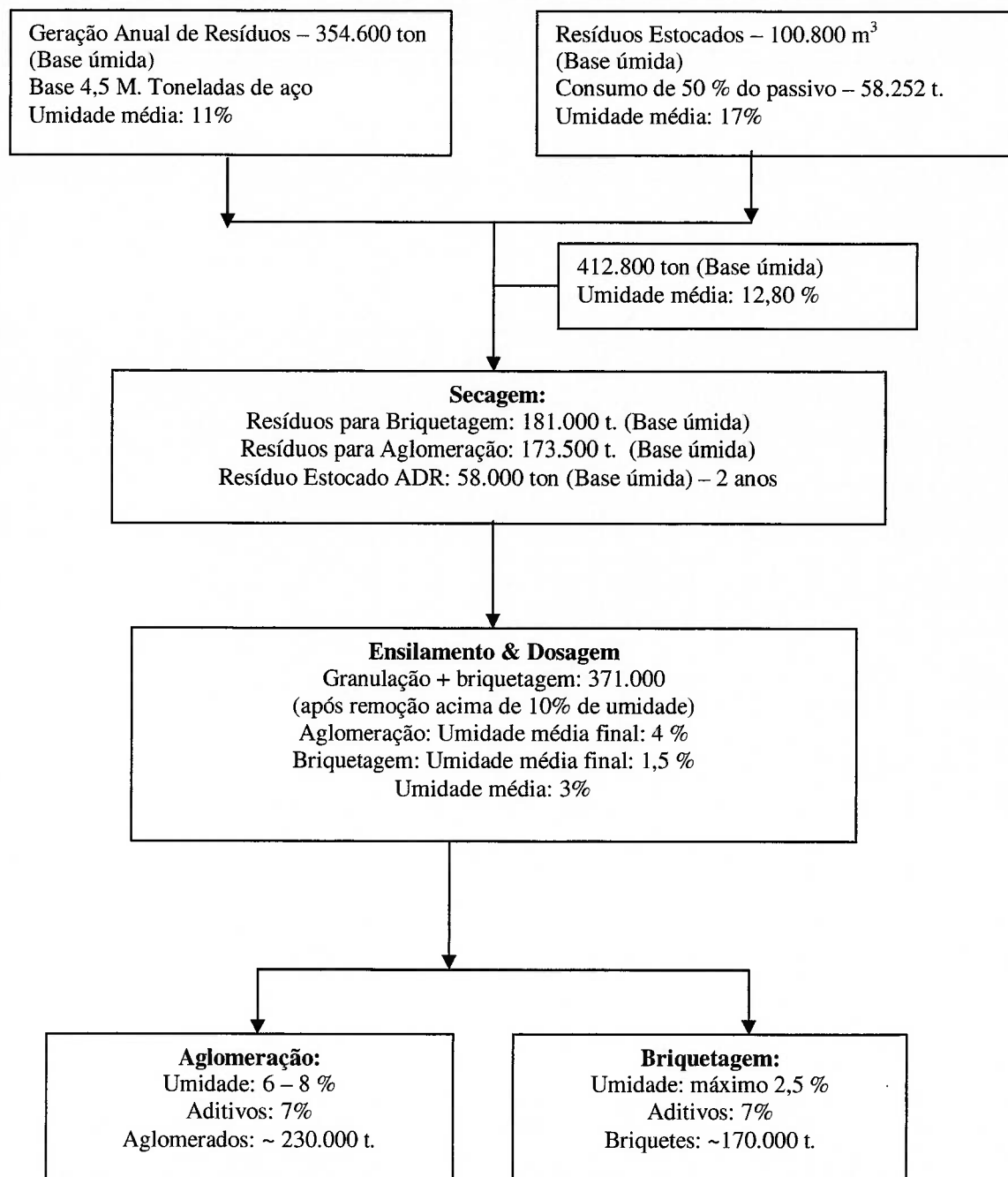


Figura 86 – Fluxo de produção e balanço de massa estimado (adequação da umidade e adição dos aditivos sólidos e líquidos), para os primeiros 2 anos de operação da unidade de reciclagem de resíduos

5.3.1.4 - Resultado da Otimização: Após término do passivo ambiental estocado na ADR: Produção de briquetes destinados à unidade de aciaria

Neste novo cenário, a única diferença básica na formulação do problema foi a eliminação da condição de contorno que fixava o consumo dos resíduos estocados na ADR em um período de 2 anos. A tabela LV apresenta os resultados obtidos

Tabela LV - Resumo dos resultados da simulação realizada para a determinação da proporção entre os componentes da mistura dos resíduos sem a utilização do material estocado na ADR: aglomeração por briquetagem

Componentes		(%)	Substância- Elemento	(%)
LOGFF	0,292	29,209	Fe (metálico)	20,806
LOGFG	0,085	8,493	C	0,681
CMEA	0,111	11,110	Fe total	75,783
CMLC	0,115	11,526	FeO	-
POSEC	0,007	0,686	Fe ₂ O ₃	-
POEDG2	0,000	0,000	CaO	5,251
POCAL	0,000	0,000	SiO ₂	1,316
PODOL	0,000	0,000	Al ₂ O ₃	0,355
SOLCAL	0,026	2,560	MgO	1,337
CALADR	0,000	0,000	TiO ₂	0,039
LETL	0,000	0,000	MnO	0,974
POCOL	0,000	0,000	Na ₂ O	0,212
LAFFF	0,000	0,000	K ₂ O	0,053
LAFFG	0,000	0,000	Zn	0,009
PDCCOR	0,000	0,000	S	0,036
PDCSIL	0,000	0,000	P ₂ O ₅	0,085
CLTQ	0,232	23,230	Óleo	1,169
CLCG	0,095	9,514	Umidade	0,000
LSTRA	0,007	0,674	Total	-
LSTAA	0,000	0,000	Resumo	
LCC3	0,000	0,000	Álcalis	0,265
ETLII	0,030	2,997	Voláteis (óleos)	1,169
Total	1,0000	100,00	Combustíveis (C+óleo)	1,850
			FO (Mistura i)	3749,20

5.3.1.5 - Resultado da Otimização: Após término do passivo ambiental estocado (ADR): Produção de micropelotas-granulados destinados às unidades de sinterização

Tabela LVI - Resumo dos resultados da simulação realizada para a determinação da proporção entre os componentes da mistura dos resíduos sem a utilização do material estocado na ADR: aglomeração por granulação-pelotização

Componentes		(%)	Substância- Elemento	(%)
LOGFF	0,062	6,213	Fe (metálico)	1,064
LOGFG	0,000	0,000	C	17,514
CMEA	0,000	0,000	Fe total	44,500
CMLC	0,000	0,000	FeO	-
POSEC	0,000	0,000	Fe ₂ O ₃	-
POEDG2	0,021	2,094	CaO	6,767
POCAL	0,035	3,522	SiO ₂	8,135
PODOL	0,000	0,000	Al ₂ O ₃	2,241
SOLCAL	0,000	0,000	MgO	1,546
CALADR	0,000	0,000	TiO ₂	0,086
LETL	0,000	0,000	MnO	0,500
POCOL	0,543	54,343	Na ₂ O	0,119
LAFFF	0,151	15,140	K ₂ O	0,098
LAFGG	0,062	6,167	Zn	0,054
PDCCOR	0,028	2,798	S	0,400
PDCSIL	0,059	5,934	P ₂ O ₅	0,267
CLTQ	0,000	0,000	Óleo	0,033
CLCG	0,000	0,000	Umidade	0,000
LSTRA	0,006	0,574	Total	100,00
LSTAA	0,006	0,621	Resumo	
LCC3	0,026	2,596	Álcalis	0,218
ETLIII	0,000	0,000	Voláteis (óleos)	0,033
Total	1,0000	100,00	Combustíveis (C+óleo)	17,47
			FO (Mistura i)	8850,18

De forma semelhante ao item 5.3.1.2 - tabela LIV; foi possível estimar uma especificação química teórica para o material destinado às unidades de síntese (micropelotas-granulados).

Tabela LVII - Limites de especificações das micropelotas-granulados (Após término do consumo do material estocado na ADR); 6,5 % de cimento; 7% de umidade e 1% de bentonito

Resumo das variáveis	Limite Inferior de Especificação	Limite Superior de Especificação	Valor Nominal – Médio Padronizado
Umidade (%)	5	10	6-8
Álcalis totais (Na ₂ O+K ₂ O) (%)	0,25	0,30	
Fe total (%)	35,0	50,0	40,0
Óleos (%)	0,025	0,040	0,030
Combustíveis (carbono)	13,0	19,0	15,0
BB - (CaO/SiO ₂)	1,00	1,50	1,20
S - Enxofre (%)	0,35	0,60	0,50
Zn - Zinco (%)		<0,060	0,050
P ₂ O ₅ – Fósforo (%)	0,20	0,40	0,30

Com o término do passivo ambiental (resíduos estocados na ADR) a planta de reciclagem projetada passa a produzir uma menor quantidade de produtos reciclados, conforme indicado pelo fluxo de processo (figura 87). Há uma pequena diferença também na composição química dos produtos, em especial revelada pelo teor de CaO. Do ponto de vista da distribuição granulométrica das partículas (modelo de empacotamento de Andreasen), não há mudança significativa no parâmetro q calculado (quociente da distribuição).

Balanço de Massa Global: Após término do consumo dos resíduos estocados na área de disposição de resíduos da COSIPA

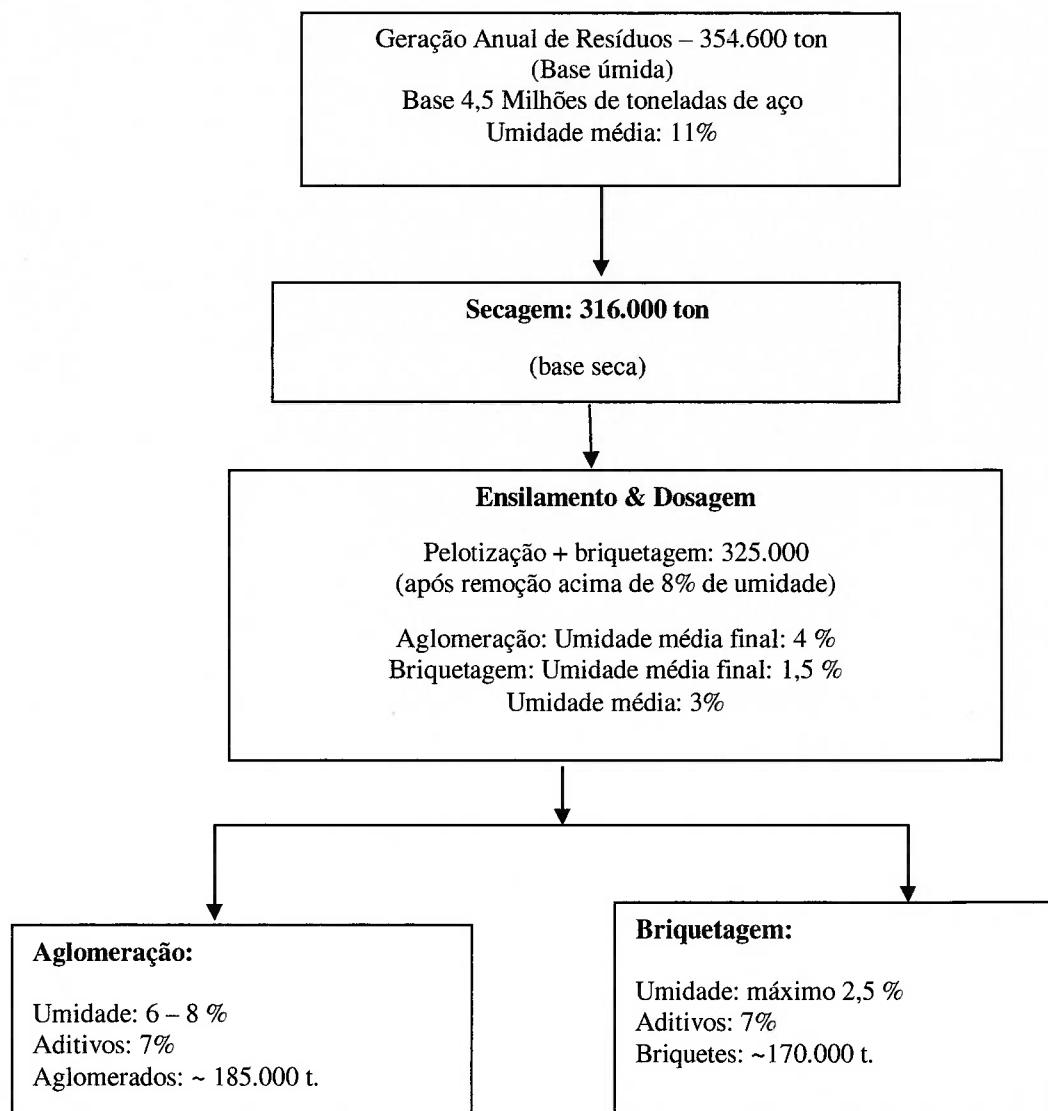


Figura 87 – Fluxo de produção e balanço de massa estimado (adequação da umidade e adição dos aditivos sólidos e líquidos), após consumo do passivo ambiental estocado na ADR

5.4 - Teste Industrial

a) Briquetes

A validação da possibilidade de utilização de briquetes de resíduos siderúrgicos foi estabelecida através da realização de um teste em escala industrial utilizando-se briquetes a base de resíduos siderúrgicos sólidos contendo ferro, produzidos na planta de briquetagem da Companhia Siderúrgica de Tubarão – CST que foram utilizados como sucata B (SUCB) na substituição do sinter adicionado no cálculo do balanço térmico do sistema de controle estático dos conversores da aciaria #2.

Nos anexos A, B e C são apresentados respectivamente: o plano de teste de adição de briquetes da CST, os resultados experimentais da utilização dos briquetes e a análise química do lote experimental de briquetes testado.

Tabela LVIII - Caracterização química (%) do briquete da CST comparado dos os resultados de misturas simulados

Elemento	Briquete CST	Briquete simulação #1 (c/ ADR – 1º e 2º anos de operação)	Briquete simulação #2 (s/ ADR – 3 ano em diante)
SiO ₂	2,31	1,32	1,36
CaO	9,74	5,87	5,25
Al ₂ O ₃	0,55	0,36	0,36
Fe total	69,20	74,9	75,78
S (enxofre)	0,03	0,038	0,036
P ₂ O ₅ (fósforo)	0,07	0,105	0,085
C total (carbono)	2,33	1,82	1,85
Basicidade binária (BB)	4,21	4,45	3,86
Dimensão média (mm)	50	-	-

Os briquetes ensilados foram adicionados no início de cada corrida, após o carregamento da sucata no interior dos conversores, aproveitado assim parte do calor do interior do reator e a disponibilidade de carbono e silício proveniente do gusa líquido, capazes de reduzir parte dos óxidos de ferro contido nos briquetes. Durante a realização dos testes, não foram observados reações, explosões ou “splashing” anormais para as cargas de briquetes adicionadas no início de cada corrida, ratificando a possibilidade de se reciclar parte dos resíduos siderúrgicos como carga sólida nos conversores a oxigênio.

Tabela LIX - Resumo do teste industrial com briquetes da CST realizados na COSIPA

Número de Corridas testadas	Carregamento médio de briquetes por corrida (kg)	Temperatura média do gusa (°C)	Ressopros	Total de briquetes utilizado (kg)	(%) P do gusa (médio)	(%) P (fim de sopro / aço vazado)
24	1368,7	1281	3*	32847,8	0,0978	0,0196

* ressopros: corrida: 51813 – motivo: temperatura; corrida: 51814 – motivo: fósforo e corrida: 61641 – motivo: carbono.

b) Aglomerados (micropelotas-granulados)

Em função de algumas dificuldades tecnológicas de se realizar testes industriais nas unidades de sinterização (elevado volume de material requerido e equipamentos específicos como secadores e misturadores intensivos para processamento dos resíduos) não foi possível validar o modelo de mistura de resíduos proposto. Porém, tendo como base as especificações do sinter produzido pela COSIPA e o volume de produção das unidades de sinterização para atender uma produção de 4,5 milhões de toneladas de aço líquido. Foi possível determinar a variação da composição do sinter em função das adições de micropelotas-granulados de resíduos propostas. Estes resultados são mostrados na tabela LX.

Tabela LX – Efeito da adição das micropelotas-granulados do processamento dos resíduos sobre a composição química do “blend” ou do sinter da COSIPA, base: 4,5 milhões de toneladas de aço líquido

Elementos componentes	“Blend” a sinterizar COSIPA (típico)	Especificação química do “blend” a sinterizar (%)	“Sinter feed” Especificação química **	Simulação #1, com resíduos da ADR (base seca, sem aditivos)	Simulação #2, sem resíduos da ADR (base seca sem aditivos)
Fe _t	57,50	> 56,00	> 63,50	45,81	44,50
CaO	9,60	-	-	8,00	6,77
SiO ₂	4,80	-	< 5,50	7,51	8,14
MgO	1,60	-	-	1,76	1,55
Al ₂ O ₃	1,15	-	< 1,00	2,14	2,24
P	0,053	-	< 0,044	0,30 *	0,27 *
TiO ₂	0,075	-	-	0,08	0,09
K ₂ O	0,065	-	-	0,11	0,12
FeO	7,10	-	-	-	-
MnO	0,52	-	< 0,50	0,56	0,50
H ₂ O	-	6,0+/- 0,2	< 7,50	-	-

Base: Ano de 2002; *P₂O₅; adição típica de “sinter feed” nas sinterizações: 60%

Tendo como base uma produção de 4,5 milhões de toneladas de aço líquido ou de 5,2 milhões de toneladas de sinter. E, no caso da adição máxima das micropelotas-granulados ficar em torno de 4,5% (230.000t. : 5.200.000t.). A diminuição do teor de ferro total calculado será de apenas 0,5% e o aumento do teor de sílica será da ordem de 0,1% no “blend” a sinterizar. Logo, pode-se dizer que a utilização dos resíduos nas sinterizações não irá causar mudanças significativas, ou um desvio da especificação da composição química do “blend” a sinterizar ou mesmo do sinter produzido. Haja vista, que parte destes resíduos já são utilizados atualmente nas unidades de sinterização (alimentação da pilha de minérios).

5.5 - Projeto de uma planta de reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos

A partir das simulações e balanços de misturas realizadas, foi possível especificar e projetar uma unidade de reciclagem de resíduos siderúrgicos, de forma a garantir a produção de briquetes e micropelotas-granulados destinados respectivamente às unidades de aciaria e sinterizações. Este projeto é apresentado no Anexo D, e possui as seguintes características.

a) Equipamentos principais:

- Sistema de baias de recebimento de resíduos (lamas e pós);
- Secador rotativo (x2);
- Sistema de silos de armazenamento e transporte pneumáticos dos resíduos e aditivos;
- Misturadores planetários e intensivos (x2);
- Briquetadora (x2)
- Sistema de armazenamento de melaço (100 m³);
- Sistema de despoeiramento por mangas filtrantes;
- Sistema de armazenamento de água (500 m³).

b) Análise de viabilidade econômica do investimento:

Investimento total aproximado (US\$) = 11.000.000,00

TIR (taxa interna de retorno): = 26%

Resultado líquido: 3,2%

Preço médio de venda: US\$ 30,00/t.

c) Custo fixo médio: 25% da matriz de formação do preço de venda

- mão de obra: 10%
- manutenção: 30%
- amortização: 56%
- diversos: 4%

d) Custo variável médio (briquetes e aglomerados): 45% da matriz de formação de preço de venda

- mistura: 18%
- aglomerantes: 47%
- gás natural: 13%
- transporte: 18%
- outros: 4%

A simulação de retorno econômico do investimento indica uma elevada rentabilidade do negócio, sendo que após a instalação da planta de reciclagem, um dos maiores focos a serem estudados é a otimização da adição de aditivos/aglomerantes, representando mais de 20% do peso de formação do preço de venda dos reciclados processados.

6.0 - COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÕES

A partir dos dados levantados das características dos resíduos siderúrgicos sólidos, em especial da composição química, análise granulométrica, geração, estoque, determinação das fases cristalinas presentes, foi possível elaborar um modelo de otimização linear, na qual sua solução possibilitou a determinação de misturas ótimas entre os vários resíduos/subprodutos capazes de satisfazer as condições de contorno impostas pelos processos metalúrgicos de produção de sinter e de aço em uma usina integrada;

O modelo indicou que duas rotas tecnológicas de aglomeração (briquetagem e granulação) são suficientes para a reciclagem de toda a geração e consumo do passivo ambiental existente na COSIPA;

O emprego de um método hierárquico (método de análise hierárquica – AHP) para a priorização e formação de uma escala de valores englobando aspectos ambientais e tecnológicos possibilitou tratar um assunto complexo de forma analítica, sistematizando toda a análise do processo decisório, desde a construção do cenário até a especificação do projeto da planta de reciclagem. Sendo adequado neste tipo de análise e formulação/solução de problemas complexos. Onde o fator de geração $G(j)$, é um dos principais parâmetros que devem ser levados em consideração, na formulação de modelos de priorização de escolha de resíduos siderúrgicos;

A escala de priorização gerada e utilizada no modelo de otimização (maximização) por programação linear possibilitou a obtenção de uma solução ótima satisfazendo uma série de restrições tecnológicas impostas por condições de contorno restritivas;

A utilização conjunta de ferramentas como AHP e PL na simulação de misturas, possibilitou o desenvolvimento de um projeto de engenharia básica otimizado capaz de processar anualmente 413.000 toneladas ano de subprodutos do processo de produção e transformação do aço;

A análise de sensibilidade da escala de priorização indicou que a mesma é influenciada de forma marcante pelo critério de disponibilidade de resíduos siderúrgico (geração + estoque), o que parece em princípio um contra-senso (pois o valor do critério primário “geração” do modelo de análise hierárquica apresentou peso de apenas 4,64%), porém o balanço de massa está relacionado diretamente na maioria dos outros critérios, ponderando-os;

Os cálculos de empacotamento das distribuições de tamanho de partículas das misturas simuladas, indicaram desvios significativos do fator (q) da distribuição granulométrica em relação ao valor de (q) que maximiza a eficiência de empacotamento; ou seja, as misturas não terão empacotamento máximo. Este fato é de certa forma benéfico no caso dos aglomerados ($q = 0,08$) destinados às unidades de sinterização (maximização das taxas de reação, permeabilidade, etc.) tendo porém como consequência a queda de resistência mecânica decorrente da elevação da porosidade. No caso de briquetes, o fator calculado ($q = 0,17$) indica uma melhor compactação, porém ainda distante do fator de maximização do empacotamento ($q = 0,37$: modelo de Andreasen), isto pode ser contornado pela utilização de sistemas ligantes e melhores/mais robustos equipamentos de briquetagem (maior capacidade de carga e distribuição de forças durante a compactação);

A utilização de briquetes, produzidos com resíduos da Companhia Siderúrgica de Tubarão em sua unidade de reciclagem (Vitória/ES) e utilizados como carga sólida nos conversores LD da COSIPA, apresentou resultados satisfatórios tanto do ponto de vista de operacional (manuseio, carregamento, ensilamento,

degradação, etc.) como do ponto de vista do processo metalúrgico de refino primário. Entretanto, caso se escolha pela construção de uma unidade de reciclagem, mais testes devem ser realizados, enfocando os processo de formação de escória, rendimento metálico, desfosforação, poder refrigerante e os limites de adição;

As simulações teóricas de adição de aglomerados nas unidades de sinterização, indicaram uma baixa perturbação na composição química do “blend” a sinterizar, interferindo em apenas 0,5% no teor de Fet e de 0,10 % no teor de sílica, para adições máximas de 4,5% de reciclados sem causar desvio nas especificações de composição química do “blend” típico da COSIPA;

O estudo de viabilidade econômica também se mostrou favorável à construção do empreendimento, baseando-se em um custo de venda estimado de US\$30/t. média de reciclado processado; um investimento de US\$ 11.000.000 de dólares amortizado em um período de 10 anos de operação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] REPETTO, EUGENIO. Waste generation and treatment and CO₂ emission in steelmaking. – Simpósio: Siderurgia no Século XXI; CSM; Italy, março de 2001. p.1-35. Disponível em: <http://abmbrasil.locaweb.com.br/cim/download/eugenio-repetto.doc> >. Acesso em: 20 de abril de 2004.
- [2] IBS. Anuário Estatístico 2000. Instituto Brasileiro de Siderurgia (editado em Maio 2000). Disponível em: <http://www.ibs.org.br/mini.htm> >. Acesso em: 25 de julho de 2000.
- [3] BRASIL – Ministério das Minas e Energia. Secretaria de Minas e Metalurgia. Informativo Estatístico. Janeiro 2000, nº 61.
- [4] ARAÚJO, ANTÔNIO LUIZ DE. Manual de Siderurgia. vol. 1 (Produção). 2^o edição. São Paulo, Editora Arte & Ciência. 1997. 470p.
- [5] NASCIMENTO, RAMIRO C.; TAKANO, CYRO; MOURÃO, MARCELO B. 1^o Relatório anual técnico do projeto PADCT III – FINEP nº 3244: “Reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos” - (período: 22/02/1998 a 22/02/1999). USP. 1999.
- [6] IBS. Instituto Brasileiro de Siderurgia. Fórum de Meio Ambiente: “Workshop sobre escórias siderúrgicas”. Belo Horizonte, 16 de outubro de 2000.
- [7] IISS. International Iron and Steel Institute. Aspects of Steel Recycling. Committee on environmental affairs and Committee on technology, Belgium, 1995..

[8] TIRLOCQ, JACQUES. Vers un cycle de vie complet des produits réfractaires. Euroceram news, nº 10. Disponível em: <http://www.euroceram.org> >. Acesso em: 12 de março de 2004.

[9] DOGAN, CYNTHIA P. Advanced refractory materials. DOE / IHEA Materials Forum, 5-6 de fevereiro de 2003. US. Department of Energy – Albany Research Center, Oak Ridge, TN. 2003.

[10] BRASIL. Senado Federal. Agenda 21: Conferência das nações unidas sobre meio ambiente e desenvolvimento. 2^o edição. Brasília, Secretaria especial de editoração e publicações. 1997. 598p.

[11] ALMEIDA, FERNANDO. O bom negócio da sustentabilidade. Rio de Janeiro, Editora Nova Fronteira. 2002. 191p.

[12] IISI. Crude steel production: executive summary. Disponível em: < <http://www.worldsteel.org/media/fastt/crudesteel.pdf> >. Acesso em: diversos períodos.

[13] FRUEHAN, R.J.; CHEIJ, DANY A.; VISLOSKY, DAVID M. Factors influencing innovation and competitiveness in the steel industry. (Board on science, technology, and economic policy). Sloan steel industry study - Carnegie Mellon University. Novembro 1997. 1-28p.

[14] IISI – Steel Industry and the environment: Environmental impacts. Chapter 3; 29-38p.

[15] ARTHUR D. LITTLE E SETEPLA TECNOMETAL ENGENHARIA LTDA (Org). Estudo sobre aplicação de escórias siderúrgicas no Brasil e em oito países. 1999. 30p. (apresentação em formato eletrônico).

[16] NASCIMENTO, RAMIRO C; MOURÃO, MARCELO B.; TAKANO, CYRO; LENZ E SILVA, GUILHERME F. B. et al. Caracterização de resíduos sólidos de aciaria a oxigênio visando reciclagem por auto-redução – In: XXIX Seminário de Redução de Minério de Ferro, Belo Horizonte. ABM. 1998. 269-285 p.

[17] NASCIMENTO, RAMIRO C; LENZ E SILVA, GUILHERME F. B.; MOURÃO, MARCELO B.; TAKANO, CYRO;. et al. Caracterização e viabilização para a reciclagem de resíduos sólidos siderúrgicos. In: 55º Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro: ABM. 2000. 1 CD-ROM.

[18] FALCO, ANGELO; SALAMI, SIDNEY DE JESUS; CARVALHO; MARCOS ANTONIO DE. Estudo para a reciclagem de materiais captados pelo sistema de despoeiramento das aciarias. Revista Metalurgia e Materiais, vol. 49, nº 421. ABM. Setembro 1993. 782-786p.

[19] KASS, WERNER; KÖHLER, ERGON; UNGER, KLAUS-DIETER. Production and preparation of reinforced filter dust briquetts from especial steel making operations. Metallurgical Plant and Technology. 3/1984. 145-151p.

[20] CHOI, HYEON-SOO; SEI, S.; YOON, Y Recycling of steelmaking sludge and dust through the BOF vessels by cold bonded pelletizing. 2nd European oxygen steelmaking congress – AIM, Taranto. Outubro 1997. 489-498p.

[21] PEREIRA, EDUARDO A. da C.; ALMEIDA, PEDRO S. Desenvolvimento do processo Regran de reciclagem de pós e lamas em siderurgia. Revista Metalurgia. vol. 41. nº 326. ABM. Janeiro 1985. 21-24p.

[22] DUARTE, JOÃO CHIABI; ANDRADE, HERALDO L. et al. Briquetes de lama de aciaria em substituição à sucata na carga metálica de convertedores na CST. XXVII Seminário sobre fusão refino e solidificação dos aços - Aciaria, refratários, fornos elétricos, ferro-ligas e fundição. ABM. Belo Horizonte. Maio de 1996. 267-275p.

- [23] PARRAT, JOHN; AUMONIER, JOHNATHAN. Recycling ferrous by-products. Steel technology international. 1994. 75-78p.
- [24] BALAJEE, S.R.; CALLAWAY JR., P. E.; KEILMAN, L. M. Production and BOF recycling of waste oxide briquettes at Inland Steel. Iron & Steelmaker. Agosto 1995. 11-21p.
- [25] VAI. VAI technology news, (catálogo de produtos e serviços). Issue nº 31. Agosto 1999. 16p.
- [26] HECKETT MULTISERV (Slovakia). Briquetting and pelletising of dust and sludges. (Catálogo de produtos e serviços). 4p.
- [27] LENZ E SILVA, GUILHERME F. B.; MALYNOWSKYJ, ANTONIO; DA COSTA, RICARDO MONTEIRO; MOURÃO, MARCELO B. Utilização de QFD (Desdobramento da Função Qualidade) na Reciclagem de Resíduos Siderúrgicos Sólidos. In: IX Encontro de Gestão pela Qualidade. ABM. São Paulo, Agosto 2000.
- [28] DUARTE, ALAMAR K. (Org.). et al. Reciclagem de refratários usados (Grupo multifuncional). Magnesita SA. Belo Horizonte. (apresentação eletrônica). 1998. 37p.
- [29] LENZ E SILVA, GUILHERME F. B. MOURÃO, MARCELO B. Building and application of a model for recycling iron and steel wastes by use the analytical hierarchy process and linear programming. (aceito para apresentação). REWA'S 2004 Global symposium on recycling, waste treatment and clean technology. Madrid, Setembro 2004.
- [30] WRONA, LEONARD M. Pollution prevention in the industry – toward a zero waste plant. Iron and steel engineer. Junho 1997. 59-63p.

- [31] ISODA, TADASHI; et al. Zero-waste project at Kawasaki Steel, Mizushima works. XXXII Steelmaking Seminar. ABM Salvador. Maio 2001. 1 CD-ROM.
- [32] LENZ E SILVA, GUILHERME F. B. Siderurgia e meio ambiente. In: MOURÃO, MARCELO B. (Org.). Siderurgia para não siderurgistas: 1^o ed. 2^o revisão. São Paulo: ABM, 2004.
- [33] SOBREMETAL. Agregado siderúrgico. (Catálogo de produtos e serviços).4p.
- [34] PEREIRA, LUIZ MACÁRIO; SILVA, MOISÉS da. Testes para utilização de lama de aciaria. In: I Encontro dos Usuários de equipamentos para controle da poluição. COSIPA, Cubatão. Abril 1988. 26p.
- [35] PEREIRA, LUIZ MACÁRIO; SILVA, MOISÉS da; FALCO, ÂNGELO. Viabilidade técnico/econômica de reaproveitamento de resíduos industriais. In: I Encontro dos usuários de equipamentos para controle da poluição. Cubatão. COSIPA. Abril 1988. 8p.
- [36] NATAL, LUIZ F. GODINHO; LIA, LUIZ R. B.; PEREZ, FRANCISCO ACÁCIO. Caracterização dos resíduos sólidos siderúrgicos e alternativas de reciclagem, Cubatão. COSIPA (interno: Projeto PDTI 7.1). 13p.
- [37] NATAL, LUIZ F. GODINHO; et al. Testes com equipamentos semi-industrial para beneficiamento da lama da aciaria visando uso na sinterização. Cubatão. COSIPA (I.ME interno: RSIA01). Janeiro 1995. 25p.
- [38] HOLLIDAY, K.A. Steel slag: he high performance industrial aggregate. Steel World. vol. 2. nº 1. 1997. 11-14p.
- [39] PHILIPP, JÜRGEN A. State and future prospects of environmental control. MPT International. vol. 4. 2001. 44-53p.

- [40] GALDEANO, OTÁVIO V.R.; BENTES, MIGUEL A.G.; NUNES, JOEL R.; PINTO, PEDRO A. A experiência da CSN na reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos nas sinterizações. Revista Metalurgia e Materiais. ABM. Fevereiro 1995. 130-133p.
- [41] TREVISANI JR., PAULO. Ferro velho. Revista Metalurgia e Materiais. ABM. Fevereiro 2000. 80-82p.
- [42] TRICKETT, ANTHONY. Disponibilidade de sucata para a produção de aço. Revista Metalurgia e Materiais. ABM. Janeiro 1998. 725-727p.
- [43] ISOO, TSUNEO; TAKAHASHI, TATSUHITO; FUKUHARA, MINORU. Using carbonated steelmaking slag blocks to help reduce CO₂. Disponível em: <http://www.ceamicbulletin.org> > Acesso: 11 de março 2001
- [44] LEVERT, J. M.; RIQUIER, Y.; GOHY, C. Utilisation des scories LD dans la fabrication du ciment portland. Silicates industriels. 1982. 9-12p.
- [45] CALLEJA, JOSE. Escorias y cementos siderúrgicos. Cemento – Hormigon. vol. 54. nº 592. Março 1983. 223-258p.
- [46] HILTUNEN, R. HILTUNEN, A. Environmental aspects of the utilization of steel industry slags. VII International conference on molten slags, fluxes and salts. The South African Institute of Mining and Metallurgy. 2004. 357-362p.
- [47] JONES, R. T. Economic and environmentally beneficial treatment of slags in DC arc furnaces. VII International conference on molten slags, fluxes and salts. The South African Institute of Mining and Metallurgy. 2004. 363-375.p.
- [48] CINCOTTO, MARIA ALBA; BATTAGIN, ARNALDO F.; AGOPYAN, VAHAN. Caracterização de escória granulada de alto-forno e seu emprego como aglomerante e agregado. Boletim 65. São Paulo. IPT. 1992. 34p.

- [49] JEON, JANG-GON; JIN, SOO-JONG. Posco's achievement for the recycling of sludge. SEASI quarterly. Dezembro 2002. 53-59p.
- [50] PAES, EDUARDO. COSIPA Investments on environmental control. Environmental technology conference. Ouro Preto, Novembro 2000. 10p.
- [51] IBS – Instituto Brasileiro de Siderurgia. Tecnologias para tratamento e reciclagem da lama de aciaria LD. IBS - GT Lama de aciaria LD (Estudo técnico). Dezembro 1993. 35p.
- [52] JAHIC, MUHAMED. Processos atuais para aproveitamento de pós e lamas da indústria siderúrgica. IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo. 1-49p.
- [53] FLEISCHANDERL, ALEXANDRER M.; PESL, JOSEF. Sapphire: Advanced solutions for waste free iron & steel plants. VAI Environmental technology. (Catálogo de produtos e serviços). 32p.
- [54] JANSOHN, KLAUS. Conceito para recirculação de resíduos sólidos, que contém zinco. KÜTTNER-Brasil. (catálogo de produtos e serviços). Janeiro de 1999. 12p.
- [55] NSKW – NIPPON STEEL KIMITSU WORKS, Chiba. Outubro 1999. 39p.
- [56] HANAFUSA, MASSAO (Org.). The management of steel industry by-products and waste. IISI Committee on Environmental Affairs. Outubro 1987. 124p.
- [57] AISI. American Iron and Steel Institute. (Learning center).< Disponível em: http://www.steel.org/learning/howmade/blast_furnace.htm> acesso em 22 de abril de 2004.

- [58] STEILER, JEAN-MARC. Ironmaking reactions; chapter 10. In: SANO, NOBUO; LU, WEI-KAO; RIBOUD, PAUL V.; MAEDA, MASAFUMI. Advanced physical chemistry for process metallurgy. Academic Press Ltd. 1997.
- [59] FRUEHAN, R.J. The rate of reduction of iron oxides by carbon. Metallurgical Transaction B. vol.8-B. Junho 1977. 279-286p.
- [60] BISWAS, ANIL K. Principle of blast furnace ironmaking (theory and practice). Brisbane. Cootha publishing house. 1981.
- [61] YAGI, JUN-ICHIRO; AUSTIN, PETER R. A mathematical model for blast furnace analysis based on the four fluid model. ICSTI - Ironmaking conference proceedings. 1998. 1715-1727p.
- [62] FIGUEIRA, RENATO M. Comportamento termodinâmico de alguns metais contidos em resíduos siderúrgicos quando recirculados no alto-forno, parte 1: potássio, sódio e zinco. Revista Metalurgia e Materiais. Vol. 58, nº 526. Outubro 2002. 31-34p.
- [63] STEPHENSON, R.L. Effect of alkalis on blast furnace operation. In: Alkalis in blast furnace, Hamilton. 1973. 1-14p.
- [64] PEREZ, FRANCISCO A. Estudo sobre redutibilidade de aglomerados de minérios de ferro básicos sinterizados. Dissertação de mestrado. Depto. De Ciências dos Materiais e Metalurgia – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Março de 1989. 157p.
- [65] PEART, J. A.; STANDISH, N. Alkalis in blast furnace – a brief review. In: Alkalis in blast furnace, Hamilton. 1973. 9p.
- [66] GEORGE, D. W. R.; PEART, J. A. The influence of alkalis on blast furnace performance. In: Alkalis in blast furnace, Hamilton. 1973. 36p.

[67] CAMPOS-LORIZ, D. et al. Alkali attack in the blast furnace refractories. Taikabutsu Overseas. vol. 2. nº1 1981. 51-59p.

[68] KAKOGAWA WORKS. Sintering technologies for high productivity at Kakogawa sinter plant. La Revue de Métallurgie – CIT. Novembro 1987. 790-802p.

[69] NUNES, JOSÉ V. Energia nos processos siderúrgicos. In: Curso ABM- Associação Brasileira de Metalurgia; Capítulo I: Processo de sinterização, São Paulo. 1980. 121p.

[70] SILVA, SIDINEY N. Deposição química de titânio em refratários de carbono de cadinho de alto-forno para prevenção contra corrosão (Revisão bibliográfica). Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 1997. 116p.

[71] AMELING, DIETER. New development in integrated steelmaking in Europe. MPT International. nº 6. Dezembro 2000. 36-42p.

[72] HAYDT, LUIZ OTÁVIO DA S. Refino primário no conversor LD. Revista Metalurgia e Materiais. ABM. vol. 58. nº 520. Abril 2002. 254-255p.

[73] WILSON, WILLIAN G.; MCLEAN, ALEX. Dessulfurization of iron and steel and sulfide shape control. AIME-CBMM, Warrendale. 1980. 161p.

[74] VAI. Steelmaking. VAI Technology news. Issue nº 31. Agosto 1999. 27p

[75] COLPAERT, H. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. Editora Edgard BlücherLtda, São Paulo. 412p. 1974.

[76] CHIAVERINI, V. Aços e ferro fundidos. ABM. 7ª Edição, São Paulo. 2002. 599p.

[77] PEHLKE, R.D.; PORTER, W. F. et al. (Editores). BOF Steelmaking (volume one: introduction; volume two: theory). ISS - AIME.1975. 331p.

[78] LIMA, MÁRCIO; MOURÃO, MARCELO B. Técnica de estudo de interação metal-escória-gás no processo de fabricação de aço. In: Anais do XIX Seminário de Fusão Refino e Solidificação dos Metais. ABM, São Paulo. 1998. 83-96p.

[79] LENZ E SILVA, GUILHERME F. B. Estudo cinético do processo de calcinação de matérias-primas: calcário destinado à utilização siderúrgica. Escola Politécnica da USP. In: PMT 5757 (Cinética das reações metalúrgicas). Novembro 1998. 19p.

[80] LEMKE, STEFAN; MEIERLING, PETER; et al. Tailored solutions for the production of quality steel. Metallurgical Plant and Technology International. v. 4. agosto 2001. 72-87p.

[81] MANTOVANI, MÁRIO C. Caracterização de poeiras geradas em fornos elétricos a arco e seu estudo quando aglomeradas na forma de pelotas auto-redutoras. Tese - Escola Politécnica da USP, São Paulo. 1998.165p.

[82] NEDAR, LOTTA. Dust formation in a BOF converter. Steel Research. vol. 67. nº 8. 1996. 320-326p.

[83] HOPKINS, D.W.; JOHNSON, W.; DAVIES, R. Constitution of oxide fume from steelmaking. Ironmaking and Steelmaking (Quarterly). nº 1. 1975. 25-29p.

[84] WU, L. M. Characteristics of steelmaking flue dust. Ironmaking and steelmaking. vol. 26. nº 5. 372-377p.

[85] SILVA, RENATO A. B. Evolução dos processos de fabricação de aços especiais em aciaria elétrica. In: Seminário sobre eletro-siderurgia. SICEM. Escola de Minas – UFOP. Outubro 1982. 27p.

- [86] WEISS, DIETMAR; APFEL, JENS; RUMMLER, TORSTEN. Emission control at badische stahlwerke. Millenium Steel 2k2. 82-85p.
- [87] BIRAT, J-P.; ARION, A.; et al. Abatement of organic emissions in EAF exhaust flue gas. La Revue de Métallurgie-CIT. Outubro 2001. 839-853p.
- [88] APFEL, JENS. Dioxins and furans - reduction solution with BSE HTQ (High temperature quenching). SE AISI Quarterly. Dezembro 2002. 18-22p.
- [89] FRITZ, E.; GEBERT, W.; RAMASEDER, N. Technological development in oxygen converter steelmaking. Steel Times International. vol. 26. Julho/Agosto 2002. 15-19p.
- [90] WALLNER, F.;FRITZ, E.; Cinquante ans d'élaboration d'acier au convertisseur LD. La Revue de Métallurgie – CIT. Outubro 2002. 825-837p.
- [91] TURKDOGAN, E. T. Physicochemical aspects of reactions in ironmaking and steelmaking process: Review. Transaction ISIJ. vol. 24. 1984. 591-611p.
- [92] RIBEIRO, EDUARDO D. L.; JACOMINO, VANUSA M. F. ; BATISTA, ARNALDO, A. M.; CASTRO, LUIZ F. A.. Dioxin: formation, sources and emissions. In: Environmental Technology Conference - VAI, Ouro Preto. Novembro 2000. Paper nº 20. 9p.
- [93] VILLEGAS, AUZA E. Secagem e calcinação de materiais metálicos. Cap. 5. Dep^{to}. de Engenharia Metalúrgica da UFMG. 1994. 1-72p.
- [94] LÜNGEN, H.B.; AUMONIER, J.; BERGLUNG, G. et. al. Processing of recycling materials for ironmaking. European Blast Furnace Committee- EBFC, Dunkerque. Abril 1995. 151-158p.

- [95] SRB, JAROSLAV; RUZICKOVA, ZDENKA. Pelletization of fines. Developments in mineral processing. n^o 7. Ed. Elsevier, Nova Iorque. 1987. 307p.
- [96] ROWEN, HAROLD. Agglomeration – An environmental tool. In: Proceedings of 16th. Biennial Conference, Institute for briquetting and agglomeration - IBA. 12-21p.
- [97] ENGELLEITNER, WILLIAN. The total concept of agglomeration. 16th. Biennial Conference, Institute for briquetting and agglomeration - IBA. 1979. 59-65p.
- [98] GOUVEIA, FLÁVIO G. Processo de pelotamento. Samarco. Versão 1. GPU 04/97. Fevereiro 1997. 8p.
- [99] HARBISON, CHARLES R. Pelletizing – quik and easy. Proceedings of the 14th. Biennial Conference. Institute for briquetting and agglomeration – IBA. vol. 14. 1975. 43-47p.
- [100] SPORTEL, H.; BEENTJES, P.; RENGENSEN, J.; DROOG, J. Quality of green iron pellets. Iromaking and steelmaking. Vol. 24. n^o 2. 1997. 129-132p.
- [101] EIRICH. Mescla y pelletización: instalaciones para la industria metalúrgica. (Catálogo de produtos e serviços). 12p.
- [102] LEIDEL, DIETER S. The intensive mixer: A universal tool in agglomerating process. 16th. Biennial Conference, Institute for briquetting and agglomeration – IBA. 1979. 163-183p.
- [103] DEC, ROMAN T. Problems with processing of fine powder in roll press. 22th. Biennial Conference. Institute for briquetting and agglomeration – IBA. vol. 22. 1991. 1-11p

- [104] KÖPPER. Briquetting with roll presses. (Catálogo de produtos e serviços). 8p.
- [105] DEC, ROMAN T. Study of compaction process in roll press. Proceedings of the 22th. Biennial Conference. Institute for briquetting and agglomeration –IBA. vol. 22. 1991. 199-210p.
- [106] HOSOKAWA-BEPEX. MS series roll compactors. (Catálogo de produtos e serviços). HP-199/5000. 8p.
- [107] KOMAREK, K. R. Selecting binders and lubricants for agglomeration processes. Chemical engineering. nº 4. Dezembro 1967. 2p.
- [108] SCHUELKE, MICHAEL. Using a roller press to compact your low-moisture bu-products for recycling. Powder and Bulk Engineering – International. vol. 4. no 4. julho 2001.26-33p.
- [109] HAKE, A. Briquetting of steel mill residues. Zemag report. 2000. 1-9p.
- [110] RIESCHEL, HARTMUT. About the briquetting of burnt lima (CaO). 16th. Biennial Conference, Institute for briquetting and agglomeration - IBA. 77-88p.
- [111] KOMAREK. Making dense briquettes from fine dust. Powder and Bulk Engineering. Setembro 1998. 4p.
- [112] KOMAREK. Roll-press briquetters for recycling waste sludge help steelmakers end landfilling and cut scrap cost. Powder and Bulk Engineering. vol. 9. nº 1. Janeiro-março 1998. 4p.
- [113] CURRIER, JAMES W.; GREEN, RICHARD A. The function of magnesia in iron oxide agglomerates. International Minerals & Chemical Corp. report. 1985. 23-30p.

- [114] MERKER, H.; KLISCHAT, H-J. Refractories for the lime kiln industries. Ceramic News: special refractories. vol. 7. nº 2. 2000. 36-43p.
- [115] MALIOTIS, GEORGE. Chromium uses & markets. Industrial Minerals Information Ltd., Londres. 1996. 163p.
- [116] CALAMITA, CELSO. Reciclando atitudes. Revista Metalurgia e Materiais. Outubro de 2003. 603-608p.
- [117] EWSUK, K. G.; ARGUELLO, J. G. et al. CRADA develops model for powder pressing and die design: part one. Ceramic Bulletin. Janeiro 2000. 53p.
- [118] EWSUK, K. G.; ARGUELLO, J. G. et al. CRADA develops model for powder pressing and die design: part two. Ceramic Bulletin. Fevereiro 2000. 41p.
- [119] SANDIA NATIONAL LABORATORIES. Development of a predictive model for ceramic powder compaction. Disponível em: < <http://www.sandia.gov/materials/sciences/factsheets/DevPredCeramPow1.html> > Acesso em janeiro de 2004.
- [120] OLIVEIRA, IVONE R. de; STUDART, ANDRÉ R.; PILEGGI, RAFAEL G.; PANDOLFELLI, VICTOR, C. Dispersão e empacotamento de partículas. Editora Fazendo Arte Editorial. 2000. 224p.
- [121] GERMAN, RANDALL M. Particle packing characteristics. Metal Powder Industries Federation, Princeton. 1989. 441p.
- [122] FUNK, J. E.; DINGER, D. R. Particle packing - part I: Fundamentals of particle packing monodisperse spheres. Interceram. vol. 41. nº 1. 1992. 10-14p.
- [123] FUNK, J. E.; DINGER, D. R. Particle packing - part II: Review of packing of polydisperse particle systems. Interceram. vol. 41. nº 2. 1992. 95-97p.

[124] FUNK, J. E.; DINGER, D. R. Particle packing - part III: Discrete versus continuous particle sizes. Interceram. vol. 41. nº 5. 1992. 332-334p.

[125] FUNK, J. E.; DINGER, D. R. Particle packing - part IV: Computer modeling of particle packing phenomena. Interceram. vol. 43. nº 3. 1993. 150-152p.

[126] FUNK, J. E.; DINGER, D. R. Particle packing - part V: Computational methods applied to experimental distributions. Interceram. vol. 43. nº 2. 1994. 87-89p.

[127] FUNK, J. E.; DINGER, D. R. Particle packing - part VI: Applications of particle size distribution concepts. Interceram. vol. 43. nº 5. 1994. 350-353p.

[128] RUSSO, J. EDUARD; SHOEMAKER, PAUL J. H. Decisões vencedoras. Editora Campus, Rio de Janeiro. 2002. 390p.

[129] SHIMIZU, TAMIO. Decisão nas organizações: Uma introdução aos problemas de decisão encontrados nas organizações e nos sistemas de apoio à decisão. Editora Atlas, São Paulo. 2000. 317p.

[130] USP. Laboratório de Sistemas de Suporte à Decisão – LabSid. Disponível em: < http://www.phd.poli.usp.br/labsid/index.asp?id_mp=2 > Acessado em 21 de abril 2004.

[131] CAMPOS, VICENTE FALCONI. Gerenciamento pelas diretrizes. Fundação Christiano Ottoni – EEUFMG. 2ª Edição, Belo Horizonte. 1986. 331p.

[132].CAMPOS, VICENTE FALCONI. TQC: Controle da qualidade total (no estilo Japonês). Fundação Christiano Ottoni – EEUFMG. 4ª Edição, Belo Horizonte. 1992. 229p.

- [133] MONKS, J. G. Administração da produção. Makron Books, São Paulo. 1985.
- [134] PRADO, DARCI. Programação Linear. Série: Pesquisa operacional. vol. 1. Editora de Desenvolvimento Gerencial, Belo Horizonte. 1999. 208p.
- [135] RUSSELL, STUART; NORVIG, PETER. Inteligência Artificial. Tradução 2ª. Edição, Rio de Janeiro. Elsevier. 2004. 1021p.
- [136] RAMALHETE, MANUEL; GUERREIRO, JORGE; MAGALHÃES, ALÍPIO. Programação linear. vol. 1. Editora McGraw-Hill. 1984. 224p.
- [137] WINSTON, WAYNE L. Introduction to mathematical programming: Applications and algorithms. 2nd edition. Duxbury Press, Belmont. 1995. 808p.
- [138] FILHO, NELSON M.; PEREIRA, MÁRIO V.F. Programação linear. 1 ed. Editora Atlas SA, São Paulo. 1980. 149p.
- [139] EDGARD, T. F.; HIMMELBLAU, D. M. Optimization of chemical processes. In: Chapter 7: Linear programming and applications. McGraw-Hill Inc., Nova Iorque. 1988. 254-291p.
- [140] RAY, W. HARMON; SZEKELY, JULIAN. Process optimization: with applications in metallurgy and chemical engineering. John Wiley & Sons, Nova Iorque. 339p.
- [141] LINSTONE, HAROLD. Multiple perspectives for decision making: bridging the gap between analysis and action. North-Holland ed., Amsterdam. 1986. 397p.
- [142] ANDERSON, DAVID R.; SWEENEY, DENNIS J.; WILLIMS, THOMAS A. An introduction to management science: Quantitative approaches to decision making. West Publishing Co., Minneapolis. 8th Edition. 1997. 763p.

[151] WAGNER, HARVEY M. Pesquisa operacional. 2ª edição. Prentice/Hall do Brasil, Rio de Janeiro. 1986. 851p.

[152] KOLMAN, BERNARD. Álgebra linear. Editora Guanabara, Rio de Janeiro. 1988. 228p.

[153] LAY, DAVID C. Álgebra linear e suas aplicações. 2ª edição. LTC Editora, Rio de Janeiro. 1999. 504p.

[154] SAATY, THOMAS L. The logic of priorities: Applications of the AHP in business, energy, health & transportation. vol.3. RWS Publications, Pittsburgh. 1991. 302p.

[156] SAATY, THOMAS L.; KEARNS, KEVIN P. Analytical planning: The organization of systems . vol. 4. RWS Publications, Pittsburgh. 1991. 208p.

[157] FERREIRA, AURÉLIO B de H. Novo dicionário Aurélio século XXI: o dicionário da língua Portuguesa. Editora Nova Fronteira. 3ª edição. 5ª. Impressão. Rio de Janeiro, 2003. 2128p.

[158] TAYLOR, JAMES L. Dicionário metalúrgico. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM. 1ª Edição. 8ª impressão. São Paulo, 1994. 619p.

[159] MIHELICIC, JAMES R. Fundamentals of environmental engineering. John Wiley & Sons Inc. Nova Iorque, 1999. 335p.

[160] COSIPA. Edital fornecimento e operação da unidade de recuperação e reciclagem de resíduos siderúrgicos

[161] JUNGSTEDT, LUIZ O. C. Direito Ambiental (organizador): Legislação. Thex editora. Rio de Janeiro. 1999. 787p.

ANEXO A

**PLANO DE EXPERIÊNCIA: TESTE COM BRIQUETES DE FERRO DA
CST, NOS CONVERSORES #5 E #6 DA ACIARIA #2**

DATA: 13/03/2000



Companhia Siderurgica Paulista

I.S.A - SUPERINTENDÊNCIA DE ACIARIA
IAS - GERÊNCIA DE SUPORTE TÉCNICO
PLANO DE ACOMPANHAMENTO

CONTROLE
AC 026 / 00
Rev. 0

PAGINA
PÁG. 1/1
Data:
13/03/2000

1 - TÍTULO
TESTE COM BRIQUETES DE FERRO DA CST, NOS CONVERSORES #5 & #6 DA ACIARIA #2

AUTOR RAMAL
Guilherme Lenz - 2997/2527
Antonio Malynowsky IAS

2 - ÁREA DE APLICAÇÃO
Convertores da Aciaria #2 -

VISTO DO RESPONSÁVEL
Eng. Sider. IAS
Gerência de Suporte Técnico IAS
do Aciaria #2
IAS

4 - OBJETIVO
Avaliar o desempenho, rendimento e manuseabilidade de briquetes de ferro (mistura de lamas de aciaria) nos conversores da aciaria #2. Visando estudar rotas de reciclagens mais nobres para os resíduos gerados durante a produção / transformação do aço.

5 - DESENVOLVIMENTO

Procedimento:

Condições Necessárias:

- Forno panela em operação; MRE disponível; silício do gusa ($0,3 < Si < 0,80$); temperatura do gusa > 1280 ° C.
- Realizar a De-S conforme o aço programado, com atenção especial à remoção de escória na MRE (visando diminuir a reversão de enxofre decorrente da escória saturada da panela de gusa);
- Acompanhamento da IAS (Antonio / Guilherme);
- Sistema de despoejamento secundário e principal (OG) em operação.

1º Fase: Localização dos briquetes: Ensilados no silos: #6 (conversor #5) & silo #16 (conversor #6)
Nomeclatura dos briquetes: sucata B
Tipo de adição: manual; conforme descontado da tabela de STE, apresentada a seguir

2º Fase: Plano de Adição:

n	Q ^{de} de briquetes (kg)	Delta STE (Valor a debitar do visado)	Nº de corridas
1	912	1,8	10
2	1033	2,0	10
3	2066	4,0	6
4	4132	8,0	4
total	48374 (kg) – disponível 50 ton.		30 corridas

(Ps: cada 103 kg de briquetes = descontar 0.2 STE visado)

3º Fase: Adição: De acordo com a formação de escória / nível de projeção; ela poderá ser realizada após a adição da carga sólida ou após a adição do gusa líquido quando se iniciar o sopro. A prática de sopro será efetuada normalmente; devendo-se verificar o nível de projeção ocasionado.

4º Fase: Composição química dos briquetes (valor médio- %):

SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	P	S	C	Fe _t
2,5	0,60	0,80	9,70	2,05	0,09	0,05	2,34	68,10

5º Fase: Confeccionar o relatório conclusivo.

Itens de Avaliação: Rendimento metálico. Composição química da escória (Fet; P; S; Al₂O₃); Desfosforação ; Controle térmico (res sopros); ataque ao revestimento refratário (visual).

6 - SEGURANÇA NO TRABALHO E ECOLOGIA

Deverá ser verificada a evolução de projeções de material durante o processo de sopro de oxigênio nos conversores, e o desempenho dos sistemas de controle de poluição (despoejamento secundário e principal – OG).

7 - RESPONSABILIDADES

CUMPRIMENTO DA INSTRUÇÃO - SUPERVISORES DE TURNO DA IAC, SOPRADORES E AUXILIARES
AVALIAÇÃO IAS (Antonio / Guilherme) – Acompanhamento das adições / corridas
IAS (Fernando / supervisores) – Gestão do programa de teste / área
IAS (Vinhais) – Forno panela

8 - PRAZO DE VALIDADE

DE 13/03/00 A 1E abril 00

ANEXO B

**RESUMO DOS RESULTADOS DAS ADIÇÕES DE BRIQUETES DE FERRO
DA CST E FOLHAS DE ANÁLISE DE DESVIO DE COMPOSIÇÃO
QUÍMICA**

DATA: 13/03/2000

Observações

Observações

Briquetes TFS (°C) - TFS (°C) - Treal>Tprev + / Soprador

Adicionados	Prevista	Real	12° C	Observações
0	1645	1656	-11	Cassiano
0	1660	1684	-24	Cassiano- sucub prev.
0	1660	1660	0	Cassiano
0	1655	1658	-3	Cassiano
0	1655	1650	5	Cassiano- sucub prev.
579	1667	1650	17	Corrida após parada para gunning Calha de sucata trocada
0	1650	1634	16	Pedro
0	1650	1672	-22	Cassiano
0	1650	1655	-5	Cassiano - sucub prev
0	1647	1636	11	Cassiano
0	1660	1692	-32	Cassiano
0	1655	1661	-6	Pedro
0	1657	1662	-5	Pedro
0	1660	1652	8	Pedro
41,4	1655,1	1658,7	-3,6	#DIV/0!
149,1	5,9	15,3	14,3	#DIV/0!
0	1686	1670	-16	Deoclécio
0	1660	1658	-2	Deoclécio
0	1670	1655	-15	Deoclécio
0	1655	1666	11	Marcos L
0	1645	1661	16	Marcos L
0	1670	1664	-6	Marcos L
0	1645	1654	9	Navarro
0	1660	1683	23	Navarro
0	1656	1665	9	Navarro
0	1660	1642	-18	Navarro
0,0	1660,7	1661,8	1,1	
0,0	12,3	10,9	14,5	

Adição de 221 kg de briquetes para resfriamento no lugar de 386 kg de sinter- sobra de aço + secagem de escória
Resfriamento com sinter: 159 kg
Gusa sobre briquetes (2014 kg)- Dados da folha de corrida inconsistentes !!
Sem acompanhamento
Sem acompanhamento sem dados de escorificantes- falha de transmissão
Sem acompanhamento



FOLHA DE ANÁLISE DE DESVIO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA

REV 3
03/02/2000

DADOS DE CORRIDA

CORRIDA: PMC: 796422
 051785
 ANALISES QUÍMICAS

AÇO: ROTA: 371 BORB. ARGONIO B CASSIANO
 TM: SOPRADOR: B CASSIANO
 DATA: 14/03/00

FURO: SOLA: NIVEL: LANÇA: VIDA: 247 0 0 0 620 10348 10345
 ALT_P: ALT_R: 10348 10345
 LIGA PREVISTO REAL
 ALUMBO 278 278
 CAL 0 500
 FEMINMC 375 345

EQUIPAMENTOS

CALC 0 7748
 ENVIIO RECEB

FERRO LIGAS

CAL 0 500
 FEMINMC 375 345

TIPO	C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	Nb	Ti	V	Mo	N	B	Ca	ENVIIO	RECEB
GUSA	0	56	27	98	2	0	0	0	0	0	53	0	0	0	0	0	12:13:22	12:13:22
PANELA (CTO)	4	26	1	17	9	52	0	1	1	0	3	3	0	0	0	0	11:54:50	11:54:50
DISTRIBUIDOR	5	27	1	19	9	49	0	2	1	0	1	0	0	31	3	1	13:11:00	13:11:52
DISTRIBUIDOR	5	27	1	19	9	49	0	2	1	0	1	0	0	31	3	1	13:11:00	13:11:52
FIM DE SOPRO	5	14	1	19	10	338	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	11:43:32	11:43:32
SUB-LANCA	65	29	1	50	11	399	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	11:39:51	11:39:51

CARGA METÁLICA

gusaco: fofo: suc: cm: tfs: tvz: tcto:
 0 27687 169687 0 1645
 PREVISTO 142000
 REAL 142000 0 28978 1329 1656 1656 1646 11:39:40 11:50:16

TEMPERATURAS

Igusa: PREVISTA 0
 REAL 1329
 HORÁRIO:

HORÁRIOS

CARREGAMENTO: 11:21:08 11:21:08
 SOPRO: 11:21:08 11:38:52
 INT. SOPRO: 11:42:25 11:49:42
 VAZAMENTO: 00:00:00
 INT. VAZAMENTO: 1227
 CTO:
 ABERTURA MAQ: 1227

ESCORIFICANTES

ESCOR PREVISTO REAL
 CAL 2844 2676
 DOLC 2133 2518
 DOLCR 0 373
 SINTER 0 2145
 SUCB 0
 DOLCR 0 757

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO VAZADO

ELEM	MIN	MAX	OBJ
C	3	6	5
Mn	18	40	29
P	0	25	25
S	0	20	20
Si	0	3	0
Al	20	80	50
Cu	0	3	0
Mo	0	2	0
Cr	0	5	0
Ni	0	3	0
Nb	0	5	0
V	0	5	0
Ti	0	5	0
N	5	80	0
B	0	8	0

INFORMAÇÕES ADICIONAIS

CÓDIGO DO RETENTOR

DADOS DE ENGENHARIA

CFS visado: 00035
 TFS visada: 01645
 CFS previsto: 00035
 TFS prevista: 01628
 BB visada: 00037
 BB prevista: 00037
 IGP: 00001
 IK: 00001

C vazamento: 00046
 Mn vazamento: 00014
 Sinter no CD: 02145
 MT/CD: 00002
 MT/OX: 00000
 MT: 00000
 P prev: 00025
 S prev: 00020

O2 prev CD: 07760
 CFS prev CD: 00035
 P estim SL1: 00025
 S estim SL1: 00645
 Ressorpro: 00000
 STE visado: 00581
 OX visado: 00635
 CPC: 01624

ANÁLISE DA IAS

ANÁLISE DO SOPRADOR

CONTRA-MEDIDAS



FOLHA DE ANÁLISE DE DESVIO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA

REV 3
03/02/2000

DADOS DE CORRIDA

CORRIDA: PMC:

051786 796509

ANALISES QUIMICAS

AÇO: ROTA:

336 BORB.ARGONIO E

TM: SOPRADOR:

CASSIANO

DATA:

14/03/00

EQUIPAMENTOS

FURO: SOLA: NIVEL: LANÇA:VIDA: ALT_P: ALT_R: LIGA PREVISIVO REAL

257 0 0 0 630 10343 10337 293 291

CALC 0 7743

FERRO LIGAS

CAL

0

500

FEMNAC 1521 1524
NIOBIO 0 45

TIPO	C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	Nb	Ti	V	Mo	N	B	Ca	ENVIO	RECEB
GUSA	0	55	25	96	0	0	0	0	0	0	40	0	0	0	0	0	13:04:00	13:04:00
PANELA (CTO)	9	67	1	18	7	21	1	1	1	9	3	4	0	0	0	0	12:48:47	12:48:47
DISTRIBUIDOR	10	78	2	19	9	48	1	2	2	12	3	3	0	0	0	25	13:58:00	13:58:44
DISTRIBUIDOR	10	78	2	19	9	48	1	2	2	12	3	3	0	0	0	25	13:58:00	13:58:44
FIM DE SOPRO	3	11	1	19	6	439	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	12:35:01	12:35:01
SUB-LANCA	44	23	1	23	8	397	1	2	2	0	0	0	0	0	0	0	12:28:24	12:28:24

CARGA METÁLICA

gusa: gusaco: foto: suc: cm: tvz: tcto:

PREVISIVO 139500 0 27687 167187 PREVISIVA 0 1660

REAL 139500 0 27918 REAL 1229 1684

HORÁRIO: 12:32:05 12:42:29

TEMPERATURAS

igusa: tfs: tcto:

PREVISIVA 0 1660

REAL 1229 1684

HORÁRIO: 12:32:05 12:42:29

HORÁRIOS

INICIO FINAL

12:10:01 12:10:01

12:10:01 12:28:07

12:36:05 12:41:58

ESCORIFICANTES

ESCOR PREVISIVO REAL

CAL 2842 3421

DOLC 2132 2070

DOLCR 0 82

SUCB 1067

ANÁLISE DE ESCÓRIA

MgO: Al2O3: SiO2: P2O5: S: CaO: MnO: Fe: BBr:

7,53 1,11 7,03 1,57 0,05 33 6,95 30,19 4,69

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO VAZADO

ELEM MIN MAX OBJ

C 7 10 8

Mn 70 90 80

P 0 20 20

S 0 10 10

Si 0 3 0

Al 20 80 50

Nb 10 20 15

INFORMAÇÕES ADICIONAIS

CÓDIGO DO RETENTOR

DADOS DE ENGENHARIA

CFS visado: 00036

TFS visada: 01660

CFS previsto: 00036

TFS prevista: 01628

BB visada: 00040

BB prevista: 00040

IGP: 00007

IK: 00009

C vazamento: 00031

Mn vazamento: 00011

Sinter no CD: 00000

MT/CD: 00002

MT/OX: 00000

MT: 00001

P prev: 00020

S prev: 00010

O2 prev CD: 08280

CFS prev CD: 00026

P estim SL1: 00000

S estim SL1: 00625

Ressopro: 00000

STE visado: 00603

OX visado: 00610

CPC: 01615

ANÁLISE DA IAS

ANÁLISE DO SOPRADOR

CONTRA-MEDIDAS



FOLHA DE ANÁLISE DE DESVIO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA

REV 3
03/02/2000

DADOS DE CORRIDA

CORRIDA: PMC:
051787 796508

ANÁLISES QUÍMICAS

AÇO: ROTA: 336 BORB.ARGONIO E PEDRO

TM: SOPRADOR: E

DATA: 14/03/00
FURO: SOLA: NIVEL: LANÇA.VIDA: 267 0 0 0 640 10343 10338

ALT_P: ALT_R: 10343 10338
LIGA PREVISTO REAL
ALUMBO 279 276
FEMNAC 726 763
FEMNMC 922 897
NIOBIO 0 43

EQUIPAMENTOS

FERRO LIGAS

TIPO	C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	Nb	Ti	V	Mo	N	B	Ca	ENVIO	RECEB
GUSA	0	58	27	97	10	0	0	0	0	0	55	0	0	0	0	0	13:53:23	13:53:23
PANELA (CTO)	9	83	2	15	9	37	1	1	1	13	1	7	0	0	3	0	13:36:47	13:36:47
DISTRIBUIDOR	9	85	2	20	9	39	1	2	2	15	3	3	0	0	1	15:18:00	15:18:49	
DISTRIBUIDOR	9	85	2	20	9	39	1	2	2	15	3	3	0	0	1	15:18:00	15:18:49	
FIM DE SOPRO	5	13	1	15	9	309	1	1	2	2	0	0	0	0	0	13:17:55	13:17:55	
SUB-LANCA	22	21	1	22	11	356	1	2	2	2	0	0	0	0	0	13:15:21	13:15:21	

CARGA METÁLICA

gusa: gusaco: fofo: suc: cm: tgsa: tfs: tvz: tcto:

TEMPERATURAS

PREVISTO 142000
REAL 142000
HORÁRIO: 13:14:00 13:33:39

HORÁRIOS

CARRREGAMENTO: 12:55:36
SOPRO: 12:55:36 13:13:08
INT. SOPRO: 13:21:19 13:22:51
VAZAMENTO: 00:00:00
INT. VAZAMENTO: 00:00:00
CTO: 1417
ABERTURA MAQ: 1417

INICIO FINAL
12:55:36 13:13:08
13:21:19 13:22:51
00:00:00

ESCORIFICANTES

ESCOR PREVISTO REAL
CAL 2850 3869
DOLC 2204 2154
DOLCR 0 104
SINTER 704 1692
SUCB 0 1042
DOLCR 0 918

ANÁLISE DE ESCÓRIA

MgO: Al2O3: SiO2: P2O5: S: CaO: MnO: Fe: BBr:
8,67 1,35 7,41 1,47 0,06 35,7 6,33 27,49 4,82

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO VAZADO

ELEM	MIN	MAX	OBJ
C	7	10	8
Mn	70	90	80
P	0	20	20
S	0	10	10
Si	0	3	0
Al	20	80	50
Nb	10	20	15

INFORMAÇÕES ADICIONAIS

CÓDIGO DO RETENTOR

DADOS DE ENGENHARIA

CFS visado: 00036 C vazamento: 00050 O2 prev CD: 07861
TFS visada: 01660 Mn vazamento: 00009 CFS prev CD: 00036
CFS previsto: 00036 Sinter no CD: 01220 P estim SL1: 00019
TFS prevista: 01628 MT/CD: 00001 S estim SL1: 00632
BB visada: 00039 MT/OX: 00001 Ressorpro: 00000
BB prevista: 00039 MT: 00000 STE visado: 00611
IGP: 00007 P prev: 00020 OX visado: 00620
IK: 00009 S prev: 00010 CPC: 01618

ANÁLISE DA IAS

ANÁLISE DO SOPRADOR

CONTRA-MEDIDAS



FOLHA DE ANÁLISE DE DESVIO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA

REV.3
03/02/2000

DADOS DE CORRIDA

CORRIDA: PMC:
051788 796510

ANALISES QUIMICAS

AÇO: ROTA: 336 BORB. ARGONIO E PEDRO

TM: SOPRADOR: E PEDRO

DATA: 14/03/00
FURO: SOLA: NIVEL: LANÇA:VIDA: 277 0 0 0 650 10359 10356
CALC 0 7759

ALT_P: 10359

ALT_R: 10356

LIGA ALUMBO 300
FEMNAC 1363
FEMNMC 254
NIOBIO 0

EQUIPAMENTOS

FERRO LIGAS

REAL 303
1341
225
45

TIPO	C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	Nb	Ti	V	Mo	N	B	Ca	ENVIIO	RECEB
GUSA	0	57	26	98	7	0	0	0	0	0	49	0	0	0	0	0	14:38:16	14:38:16
PANELA (CTO)	9	75	1	14	7	65	1	1	1	9	1	8	0	0	3	0	14:21:16	14:21:16
DISTRIBUIDOR	9	75	1	15	7	23	1	1	1	16	3	2	0	0	2	0	15:27:00	15:27:54
DISTRIBUIDOR	9	75	1	15	7	23	1	1	1	16	3	2	0	0	2	0	15:27:00	15:27:54
FIM DE SOPRO	4	12	1	14	9	351	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	14:09:36	14:09:36
SUB-LANCA	33	21	1	19	9	291	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	14:07:19	14:07:19

CARGA METÁLICA

gusa: gusaco: fofo: suc: cm: 142000 142000 0 27687 169687

PREVISTO REAL HORÁRIO: 14:05:57 14:16:43

TEMPERATURAS

ifs: tvz: tcto: 1655 1658 1621

HORÁRIOS

INICIO FINAL 13:47:16 14:05:04

ESCORIFICANTES
ESCOR PREVISTO REAL
CAL 2842 3866
DOLC 2132 2058
DOLCR 0 74
SINTER 118 396
SUCB 0 1056

ANÁLISE DE ESCÓRIA

MgO: Al2O3: SiO2: P2O5: S: CaO: MnO: FeT: BBr: 9,56 1,19 8,9 1,84 0,05 36,43 7,02 25,52 4,09

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO VAZADO

ELEM	MIN	MAX	OBJ
C	7	10	8
Mn	70	90	80
P	0	20	20
S	0	10	10
Si	0	3	0
Al	20	80	50
Nb	10	20	15

INFORMAÇÕES ADICIONAIS

CÓDIGO DO RETENTOR

DADOS DE ENGENHARIA

CFS visado: 00036 C vazamento: 00036 O2 prev CD: 08004
TFS visada: 01655 Mn vazamento: 00009 CFS prev CD: 00036
CFS previsto: 00036 Sinter no CD: 00396 P estim SL1: 00018
TFS prevista: 01628 MT/CD: 00002 S estim SL1: 00651
BB visada: 00038 MT/OX: 00000 Ressoro: 00000
BB prevista: 00038 MT: 00000 STE visado: 00636
IGP: 00007 P prev: 00020 OX visado: 00645
IK: 00009 S prev: 00010 CPC: 01642

ANÁLISE DA IAS

ANÁLISE DO SOPRADOR

CONTRA-MEDIDAS



FOLHA DE ANÁLISE DE DESVIO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA

REV 3
03/02/2000

DADOS DE CORRIDA

CORRIDA: PMC:
051789 796511

TM: SOPRADOR:
E PEDRO

DATA:
14/03/00

FURO: SOLA: NIVEL: LANÇA:VIDA: ALT_P: ALT_R:
287 0 0 0 660 10345 10345

FERRO LIGAS
ALUMBO 299 294
FEMNAC 1294 1288
FEMNMC 332 305
NIOBIO 0 45

EQUIPAMENTOS

CALC 0 7745

TIPO	C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	Nb	Ti	V	Mo	N	B	Ca	ENVIO	RECEB
GUSA	0	57	33	95	7	0	0	0	0	0	51	0	0	0	0	0	15:38:42	14:40:06
PANELA (CTO)	9	75	1	17	10	63	1	1	1	14	3	4	0	0	0	0	15:22:45	15:22:45
DISTRIBUIDOR	10	78	1	21	11	16	1	1	2	15	3	2	0	0	0	1	16:33:00	16:33:21
DISTRIBUIDOR	10	75	1	20	10	21	1	1	1	13	3	2	0	0	0	2	16:35:00	16:35:06
DISTRIBUIDOR	10	75	1	20	10	21	1	1	1	13	3	2	0	0	0	2	16:35:00	16:35:06
FIM DE SOPRO	4	11	1	15	8	327	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	15:11:11	15:11:11
SUB-LANCA	38	17	1	24	8	399	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	15:07:56	15:07:56

CARGA METÁLICA

PREVISTO 138600
REAL 138900

TEMPERATURAS

PREVISTA 0
REAL 1270
HORÁRIO: 15:07:26 15:18:21

HORÁRIOS

INICIO FINAL
14:48:44 14:48:44
15:06:34 15:06:34
15:13:05 15:17:30
00:00:00 00:00:00
1600

ANÁLISE DE ESCÓRIA

MgO: 1,07 6,93 1,66 0,05 34,28 7,01 29,02 4,95
P2O5: S: CaO: MnO: FeT: BBr:

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO VAZADO

ELEM	MIN	MAX	OBJ
C	7	10	8
Mn	70	90	80
P	0	20	20
S	0	10	10
Si	0	3	0
Al	20	80	50
Nb	10	20	15

INFORMAÇÕES ADICIONAIS

CÓDIGO DO RETENTOR

ESCORIFICANTES
ESCOR PREVISTO REAL
CAL 2845 3511
DOLC 2497 2446
DOLCR 0 83
SINTER 361 499
SUCB 919 1067

DADOS DE ENGENHARIA

CFS visado: 00036 C vazamento: 00037 O2 prev CD: 08095
TFS visada: 01655 Mn vazamento: 00008 CFS prev CD: 00036
CFS prevista: 00036 Sinter no CD: 00280 P estim SL1: 00018
TFS prevista: 01628 MT/CD: 00002 S estim SL1: 00653
BB visada: 00038 MT/OX: 00000 Ressorpro: 00000
BB prevista: 00038 MT: 00000 STE visado: 00640
IGP: 00007 P prev: 00020 OX visado: 00660
IK: 00009 S prev: 00010 CPC: 01622

ANÁLISE DA IAS

ANÁLISE DO SOPRADOR

CONTRA-MEDIDAS



FOLHA DE ANÁLISE DE DESVIO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA

REV 3
03/02/2000

DADOS DE CORRIDA

CORRIDA: PMC:
051790 796418

ÁÇO: ROTA:
306 BORB. ARGONIO E PEDRO

TM: SOPRADOR:
E PEDRO

DATA:
14/03/00

FURO: SOLA: NIVEL: LANÇA: VIDA: ALT. P: ALT. R:
297 0 0 0 670 10295 10292

LIGA: PREVISTO: REAL:
ALUMBO 290 305

FEMNAC 68 58

EQUIPAMENTOS

FERRO LIGAS
FEMNAC 68 58

TIPO	C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	Nb	Ti	V	Mo	N	B	Ca	ENVIO	RECEB
GUSA	0	58	29	96	8	0	0	0	0	0	51	0	0	0	0	0	16:23:32	15:29:57
PANELA (CTO)	3	16	1	13	6	79	1	2	2	0	3	1	0	0	0	0	16:06:00	16:06:00
DISTRIBUIDOR	6	20	1	18	8	46	1	2	2	2	1	0	0	42	3	1	17:18:00	17:18:22
DISTRIBUIDOR	6	20	1	18	8	46	1	2	2	2	1	0	0	42	3	1	17:18:00	17:18:22
FIM DE SOPRO	4	14	1	16	7	277	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	15:54:51	15:54:51
SUB-LANCA	18	22	1	23	9	250	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	15:53:52	15:53:52

CARGA METÁLICA

gusa: gusaco: fofo: suc: cm:
PREVISTO 142900 10396 31532 184828 PREVISTA 0
REAL 143100 0 24640 REAL

TEMPERATURAS

igusa: fgs: tvz: tcto:
PREVISTA 0 1650
REAL 1267 1667 1667 1638
HORÁRIO: 15:51:44 16:02:14

HORÁRIOS

INICIO FINAL
15:34:22 15:34:22
15:34:22 15:50:52

ESCORIFICANTES
ESCOR PREVISTO REAL
CAL 2774 3809
DOLC 2081 2020
DOLCR 0 89
SINTER 614 1524
SUCB 0 1057
DOLCR 0 727
SUCB 0 579

ANÁLISE DE ESCÓRIA

MgO: Al2O3: SiO2: P2O5: S: CaO: MnO: FeT: BBr:
9,77 1,03 7,82 1,6 0,06 35,55 7,2 26,86 4,55

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO VAZADO

ELEM	MIN	MAX	OBJ
C	3	6	5
Mn	10	25	18
P	0	20	20
S	0	15	15
Si	0	3	0
Al	30	80	60
Cu	0	3	0
Mg	0	2	0
Cr	0	5	0
Ni	0	3	0
Nb	0	5	0
V	0	5	0
Ti	0	5	0
N	5	70	0
B	0	6	0

INFORMAÇÕES ADICIONAIS

CÓDIGO DO RETENTOR

DADOS DE ENGENHARIA

CFS visado: 00048 C vazamento: 00037 O2 prev CD: 07375
TFS visada: 01650 Mn vazamento: 00014 CFS prev CD: 00048
CFS prevista: 00048 Sinter no CD: 01037 P estim SL1: 00020
TFS prevista: 01619 MT/CD: 00002 S estim SL1: 00664
BB visada: 00037 MT/OX: 00000 Ressorpro: 00000
BB prevista: 00037 MT: 00000 STE visado: 00638
IGP: 00001 P prev: 00020 OX visado: 00675
IK: 00001 S prev: 00015 CPC: 01551

ANÁLISE DA IAS

ANÁLISE DO SOPRADOR

CONTRA-MEDIDAS



FOLHA DE ANÁLISE DE DESVIO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA

REV.3
03/02/2000

DADOS DE CORRIDA

CORRIDA: PMC:

051791 796423

ANÁLISES QUÍMICAS

AÇO: ROTA:

371 BORB. ARGONIO

TM: SOPRADOR:

E PEDRO

DATA:

14/03/00

EQUIPAMENTOS

FURO: SOLA: NIVEL: LANÇA:VIDA: ALT_P: ALT_R:

307 0 7866 0 680 10466 10462

CALC 0 7866

FERRO LIGAS

LIGA PREVISITO REAL

ALUMBO 310 335

FEMNAC 115 92

FEMNMC 316 293

TIPO C Mn Si P S Al Cu Cr Ni Nb Ti V Mo N B Ca ENVIO RECEB

GUSA 0 59 26 97 0 0 0 0 0 0 39 0 0 0 0 0 17:11:17 17:11:17

PANELA (CTO) 5 25 1 13 4 56 0 1 1 0 1 4 0 0 2 0 16:54:53 16:54:53

DISTRIBUIDOR 6 26 1 15 5 48 0 1 1 2 1 0 0 71 2 1 18:15:00 18:15:37

DISTRIBUIDOR 6 26 1 15 5 48 0 1 1 2 1 0 0 71 2 1 18:15:00 18:15:37

FIM DE SOPRO 3 9 1 14 6 376 0 1 2 0 0 0 0 0 0 0 16:42:42 16:42:42

SUB-LANCA 24 18 1 21 7 450 0 1 2 0 0 0 0 0 0 0 16:39:23 16:39:23

CARGA METÁLICA

gusa: gusaco: fofo: suc: cm:

PREVISITO 138600 10396 31152 180148 PREVISITA 0 1650

REAL 138700 0 7160 28830 174690 REAL 1228 1634

HORÁRIO: 16:39:14 16:50:31

TEMPERATURAS

igusa: tcto: tvz: ffs:

PREVISITA 0 1650

REAL 1228 1634

HORÁRIO: 16:39:14 16:50:31

HORÁRIOS

INICIO FINAL

16:20:22 16:20:22

16:20:22 16:38:23

16:41:09 16:49:52

00:00:00

17:40

ESCORIFICANTES

ESCOR PREVISITO REAL

CAL 3082 3778

DOLC 2364 2323

DOLCR 0 87

SINTER 594 397

SUCB 0 1047

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO VAZADO

ELEM	MIN	MAX	OBJ
C	3	6	5
Mn	18	40	29
P	0	25	25
S	0	20	20
Si	0	3	0
Al	20	80	50
Cu	0	3	0
Mo	0	2	0
Cr	0	5	0
Ni	0	3	0
Nb	0	5	0
V	0	5	0
Ti	0	5	0
N	5	90	0
B	0	8	0

INFORMAÇÕES ADICIONAIS

CÓDIGO DO RETENTOR

DADOS DE ENGENHARIA

CFS visado: 00035 C vazamento: 00038 O2 prev CD: 08199
 TFS visada: 01650 Mh vazamento: 00010 CFS prev CD: 00027
 CFS previsto: 00035 Sinter no CD: 00000 P estim SL1: 00018
 TFS prevista: 01617 MT/CD: 00002 S estim SL1: 00657
 BB visada: 00035 MT/OX: 00000 Ressorpro: 00000
 BB prevista: 00035 MT: 00000 STE visado: 00640
 IGP: 00001 P prev: 00025 OX visado: 00600
 IK: 00001 S prev: 00020 CPC: 01644

ANÁLISE DA IAS

ANÁLISE DO SOPRADOR

CONTRA-MEDIDAS



FOLHA DE ANÁLISE DE DESVIO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA

REV 3
03/02/2000

DADOS DE CORRIDA

CORRIDA: PMC:
051811 854128

ANÁLISES QUÍMICAS

AÇO: ROTA: 560 BORB. ARGONIO B CASSIANO

TM: SOPRADOR:
B CASSIANO

DATA: 15/03/00
FURO: SOLA: 507
NIVEL: LANÇA: 0
VIDA: 0
ALUMBO: 0
ALT_P: 880
ALT_R: 10288

EQUIPAMENTOS

FERRO LIGAS
LIGA PREVISTO REAL
ALUMBO 252 254
CAL 0 500
COQUE 142 127
FESI75 247 249
FESIMN 1670 1705

TIPO	C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	Nb	Ti	V	Mo	N	B	Ca	ENVIO	RECEB
GUSA	0	50	42	99	10	0	0	0	0	0	60	0	0	0	0	0	10:26:08	10:26:08
PANELA (CTO)	12	81	24	12	10	23	1	1	1	0	4	4	0	0	0	0	10:19:31	10:19:31
DISTRIBUIDOR	15	85	24	14	12	26	1	2	1	0	4	3	0	0	0	0	11:24:00	11:24:57
DISTRIBUIDOR	15	85	24	14	12	26	1	2	1	0	4	3	0	0	0	0	11:24:00	11:24:57
FIM DE SOPRO	4	10	1	12	11	335	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	10:19:31	10:19:31
SUB-LANCA	62	20	1	25	15	348	1	2	2	2	0	0	0	0	0	0	10:19:30	10:19:30

CARGA METÁLICA

gusa: gusaco: fofo: suc: cm:
PREVISTO 142000 9356 28087 179443 PREVISTA 0 1650
REAL 142000 0 6200 26490 174690 REAL 1245 1672 1672 1627

HORÁRIO: 09:53:19 10:05:19

TEMPERATURAS

tfz: tcto:
CARREGAMENTO: 09:34:07 09:52:31
SOPRO: 09:58:31 10:05:00
INT. SOPRO:
VAZAMENTO:
INT. VAZAMENTO: 00:00:00
CTO:
ABERTURA MAQ: 1104

HORÁRIOS

INICIO FINAL
ESCOR PREVISTO REAL
CAL 3451 4065
DOLC 3431 3354
DOLCR 0 94
SINTER 0 1434
SUCB 0 1078

ESCORIFICANTES

ANÁLISE DE ESCÓRIA

MgO: 1,53 9,88
SiO2: 1,56 0,06
P2O5: 39,17 5,36
S: 23,91 3,96
CaO: FeT: BBr:

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO VAZADO

ELEM	MIN	MAX	OBJ
C	12	16	14
Mn	70	90	80
P	0	25	25
S	0	20	20
Si	15	30	22
Al	20	45	30
Cu	0	5	0
Mo	0	2	0
Cr	0	5	0
Ni	0	5	0
Nb	0	9	0
V	0	9	0
Ti	0	9	0
N	5	100	0

INFORMAÇÕES ADICIONAIS

CÓDIGO DO RETENTOR

DADOS DE ENGENHARIA

CFS visado: 00035
TFS visada: 01650
CFS previsto: 00035
TFS prevista: 01637
BB visada: 00034
BB prevista: 00034
IGP: 00002
IK: 00003
C vazamento: 00035
Mn vazamento: 00013
Sinter no CD: 01434
MT/CD: 00002
MT/OX: 00000
MT: 00000
P prev: 00025
S prev: 00020
O2 prev CD: 08189
CFS prev CD: 00035
P estirn SL1: 00000
S estirn SL1: 00628
Ressopro: 00000
STE visado: 00574
OX visado: 00600
CPC: 01620

ANÁLISE DA IAS

ANÁLISE DO SOPRADOR

CONTRA-MEDIDAS



FOLHA DE ANÁLISE DE DESVIO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA

REV.3
03/02/2000

DADOS DE CORRIDA

CORRIDA: PMC:
051812 796416
ANÁLISES QUÍMICAS

AÇO: ROTA: 371 BORB. ARGONIO B CASSIANO
TM: SOPRADOR: B

DATA: 15/03/00

FURO: SOLA: NIVEL: LANÇA: VIDA: 517 0 0 0 890 10282 10279
CALC 0 7682

EQUIPAMENTOS

FERRO LIGAS

LIGA PREVISTO REAL 285
ALUMBO 249
CAL 0 500
FEMNAC 0 85
FEMNMC 264 243

TIPO	C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	Nb	Ti	V	Mo	N	B	Ca	ENVIÓ	RECEB
GUSA	0	0	40	98	0	0	0	0	0	0	53	0	0	0	0	0	11:30:21	11:30:21
PANELA (CTO)	3	27	1	21	13	26	1	1	1	0	3	3	0	0	0	0	11:17:50	11:17:50
DISTRIBUIDOR	5	27	1	23	14	47	1	2	1	0	3	1	0	38	0	0	12:23:00	12:23:49
DISTRIBUIDOR	5	27	1	23	14	47	1	2	1	0	3	1	0	38	0	0	12:23:00	12:23:49
FIM DE SOPRO	4	14	1	23	14	292	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	11:01:14	11:01:14
SUB-LANCA	21	23	1	36	17	358	1	2	2	0	0	0	0	0	0	0	10:58:56	10:58:56

CARGA METÁLICA

gusa: gusaco: fofo: suc: cm:
PREVISTO 141300 5198 31152 177650
REAL 141300 0 7140 26490 174930

TEMPERATURAS

PREVISTA 0 1650
REAL 1207 1655
HORÁRIO: 10:57:28 11:10:20

HORÁRIOS

INICIO FINAL
CARREGAMENTO: 10:39:09 10:39:09
SOPRO: 10:39:09 10:56:37
INT. SOPRO:
VAZAMENTO: 11:01:40 11:08:22
INT. VAZAMENTO: 00:00:00
CTO:
ABERTURA MAQ: 1200

ESCORIFICANTES
ESCOR PREVISTO REAL
CAL 3332 2556
DOLC 3288 2235
DOLCR 0 75
SUCB 1149

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO VAZADO

ELEM	MIN	MAX	OBJ
C	3	6	5
Mn	18	40	29
P	0	25	25
S	0	20	20
Si	0	3	0
Al	20	80	50
Cu	0	3	0
Mo	0	2	0
Cr	0	5	0
Ni	0	3	0
Nb	0	5	0
V	0	5	0
Ti	0	5	0
N	5	90	0
B	0	8	0

INFORMAÇÕES ADICIONAIS

CÓDIGO DO RETENTOR

DADOS DE ENGENHARIA

CFS visado: 00035 C vazamento: 00050 O2 prev CD: 07800
TFS visada: 01650 Mn vazamento: 00018 CFS prev CD: 00035
CFS previsto: 00035 Sinter no CD: 00000 P estim SL1: 00023
TFS prevista: 01638 MT/CD: 00002 S estim SL1: 00635
BB visada: 00034 MT/OX: 00000 Ressorpro: 00000
BB prevista: 00034 MT: 00000 STE visado: 00585
IGP: 00001 P prev: 00025 OX visado: 00595
IK: 00001 S prev: 00020 CPC: 01611

ANÁLISE DA IAS

ANÁLISE DO SOPRADOR

CONTRA-MEDIDAS



FOLHA DE ANÁLISE DE DESVIO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA

REV 3
03/02/2000

DADOS DE CORRIDA

CORRIDA: PMC:
051813 796780
ANALISES QUÍMICAS

EQUIPAMENTOS

FURO: SOLA: NIVEL: LANÇA: VIDA: ALT_P: ALT_R:
527 0 0 0 900 10292 10289
CALC 0 7692

FERRO LIGAS

LIGA PREVISTO REAL
ALUMBO 308 332
CAL 0 500
FEMNAC 57 76
FEMNMC 410 389

TM: SOPRADOR:
B CASSIANO

ROTA: ARGONIO
BORB. ARGONIO

DATA:
15/03/00

TIPO	C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	Nb	Ti	V	Mo	N	B	Ca	ENVIO	RECEB
GUSA	0	55	50	99	4	0	0	0	0	0	63	0	0	0	0	0	12:18:21	11:25:10
PANELA (CTO)	4	33	2	12	8	41	1	1	1	0	3	3	0	0	0	0	12:04:32	12:04:32
DISTRIBUIDOR	6	31	2	15	7	56	1	1	1	0	1	0	0	59	1	1	13:38:00	13:38:26
DISTRIBUIDOR	6	31	2	15	7	56	1	1	1	0	1	0	0	59	1	1	13:38:00	13:38:26
FIM DE SOPRO	4	13	1	13	9	375	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	11:49:10	11:49:10
SUB-LANCA	17	25	1	26	9	320	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	11:46:55	11:46:55

CARGA METÁLICA

gusa: gusaco: foto: suc: cm:
142000 9356 27687 179043
REAL 142000 0 6620 25802 174422

TEMPERATURAS

PREVISTA 0 1647
REAL 1202 1636
HORÁRIO: 11:49:54 11:58:22

HORÁRIOS

INICIO FINAL
11:26:34 11:26:34
11:26:34 11:44:29
11:50:33 11:57:22
00:00:00
1251

ESCORIFICANTES
ESCOR PREVISTO REAL
CAL 3891 4380
DOLC 3947 3874
DOLCR 0 65
SINTER 439 450
SUCB 0 1078

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO VAZADO

ELEM	MIN	MAX	OBJ
C	3	6	5
Mn	18	40	29
P	0	25	25
S	0	20	20
Si	0	3	0
Al	20	80	50
Cu	0	3	0
Mo	0	2	0
Cr	0	5	0
Ni	0	3	0
Nb	0	5	0
V	0	5	0
Ti	0	5	0
N	5	90	0
B	0	8	0

INFORMAÇÕES ADICIONAIS

CÓDIGO DO RETENTOR

DADOS DE ENGENHARIA

CFS visado: 00035 C vazamento: 00040 O2 prev CD: 07782
TFS visada: 01647 Mn vazamento: 00009 CFS prev CD: 00035
CFS previsto: 00035 Sinter no CD: 00213 P estim SL1: 00019
TFS prevista: 01647 MT/CD: 00002 S estim SL1: 00618
BB visada: 00033 MT/OX: 00000 Ressorpro: 00002
BB prevista: 00033 MT: 00002 STE visado: 00590
IGP: 00001 P prev: 00025 OX visado: 00585
IK: 00001 S prev: 00020 CPC: 01625

ANÁLISE DA IAS

ANÁLISE DO SOPRADOR

CONTRA-MEDIDAS



FOLHA DE ANÁLISE DE DESVIO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA

REV 3
03/02/2000

DADOS DE CORRIDA

CORRIDA: PMC:
051814 854137

ÁÇO: ROTA:
520 BORB.ARGONIO E CASSIANO

TM: SOPRADOR:
E CASSIANO

DATA:
15/03/00

FURO: SOLA: NIVEL: LANÇA: VIDA:
537 0 0 0 910 10285 10281

ALT_P: ALT_R:
10285 10281

LIGA PREVISTO REAL
ALUMBO 138 162
CAL 0 500

EQUIPAMENTOS

FERRO LIGAS

CALC 0 7685

COQUE 0 123
FESI75 183 177
FESIMN 2025 2062

ANÁLISES QUÍMICAS

TIPO

GUSA

CONVERSOR

PANELA (CTO)

DISTRIBUIDOR

DISTRIBUIDOR

FIM DE SOPRO

SUB-LANCA

C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	Nb	Ti	V	Mo	N	B	Ca	ENVIO	RECEB	
0	0	50	98	0	0	0	0	0	0	63	0	0	0	0	0	0	13:08:10	13:08:10
8	15	1	14	9	334	1	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	12:40:03	12:40:03
15	97	22	15	11	19	2	4	4	0	4	4	0	0	0	0	0	12:53:39	12:53:39
18	98	21	19	11	22	1	5	4	0	2	2	0	62	4	2	0	14:27:00	14:27:07
18	98	21	19	11	22	1	5	4	0	2	2	0	62	4	2	0	14:27:00	14:27:07
25	23	1	30	12	215	1	6	4	0	0	0	0	0	0	0	0	12:31:09	12:31:09
74	27	1	39	13	321	1	7	4	0	0	0	0	0	0	0	0	12:29:05	12:29:05

CARGA METÁLICA

gusa:

PREVISTO 142000

REAL 142000

TEMPERATURAS

igusa:

PREVISTA 0

REAL 1340

HORÁRIOS

carregamento:

SOPRO: 12:08:58 12:08:58

INT. SOPRO: 12:39:35 12:46:27

INICIO

FINAL

ESCORIFICANTES

ESCOR

REAL

CAL 4479 4640

DOLC 3847 3769

DOLCR 0 71

SUCB 0 820

CAL 0 2368

DOLC 0 33

SINTER 0 568

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO VAZADO

ELEM	MIN	MAX	OBJ
C	16	20	19
Mn	90	110	100
P	0	25	25
S	0	15	15
Si	15	30	22
Al	20	45	35
Cu	0	5	0
Mo	0	2	0
Cr	0	5	0
Ni	0	5	0
Nb	0	9	0
V	0	9	0
Ti	0	9	0
N	5	90	0

INFORMAÇÕES ADICIONAIS

CÓDIGO DO RETENTOR

DADOS DE ENGENHARIA

CFS visado: 00151

TFS visada: 01660

CFS previsto: 00151

TFS prevista: 01630

BB visada: 00035

BB prevista: 00035

IGP: 00002

IK: 00003

C vazamento: 00150

Mn vazamento: 00019

Sinter no CD: 00000

MT/CD: 00002

MT/OX: 00001

MT: 00000

P prev: 00030

S prev: 00015

O2 prev CD: 07761

CFS prev CD: 00151

P estirn SL1: 00024

S estirn SL1: 00647

Ressopro: 00005

STE visado: 00602

OX visado: 00647

CPC: 01625

ANÁLISE DA IAS

ANÁLISE DO SOPRADOR

CONTRA-MEDIDAS



FOLHA DE ANÁLISE DE DESVIO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA

REV 3
03/02/2000

DADOS DE CORRIDA

CORRIDA: PMC: 796310

ÁÇO: ROTA: 371 BORB. ARGONIO E PEDRO

TM: SOPRADOR: E

DATA: 15/03/00

FURO: SOLA: NIVEL: LANÇA: VIDA: 547 0 0 0

ALT_P: ALT_R: 10286 10286

LIGA PREVISITO REAL 269
ALUMBO 267
CAL 0 500
FEMNMC 313 367

EQUIPAMENTOS

FERRO LIGAS

ANALISES QUÍMICAS

TIPO	C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	Nb	Ti	V	Mo	N	B	Ca	ENVIÓ	RECEB	
GUSA	0	53	49	103	5	0	0	0	0	0	89	0	0	0	0	0	0	13:56:24	13:56:24
PANELA (CTO)	4	28	1	12	9	38	1	2	1	0	3	2	0	0	0	0	0	13:43:26	13:43:26
DISTRIBUIDOR	6	27	2	14	10	50	1	2	1	0	1	0	0	45	3	4	4	14:47:00	14:47:14
DISTRIBUIDOR	6	27	2	14	10	50	1	2	1	0	1	0	0	45	3	4	4	14:47:00	14:47:14
FIM DE SOPRO	5	13	1	12	9	393	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	13:33:35	13:33:35

CARGA METÁLICA

PREVISITO	REAL	gusaco:	foso:	suc:	cm:	PREVISITA	REAL	PREVISITA	REAL	PREVISITA	REAL	PREVISITA	REAL	PREVISITA	REAL	PREVISITA	REAL	PREVISITA	REAL	
142000	142000	9356	7370	29717	181073	0	1317	0	1655	1661	1661	1661	1661	1661	1661	1661	1661	1661	1661	1661

ANÁLISE DE ESCÓRIA

MgO: Al2O3: SiO2: P2O5: S: CaO: MnO: FeT: BBr: 11,5 1,2 10,74 1,51 0,06 40,47 5 20,58 3,77

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO VAZADO

ELEM	MIN	MAX	OBJ
C	3	6	5
Mn	18	40	29
P	0	25	25
S	0	20	20
Si	0	3	0
Al	20	80	50
Cu	0	3	0
Mo	0	2	0
Cr	0	5	0
Ni	0	3	0
Nb	0	5	0
V	0	5	0
Ti	0	5	0
N	5	90	0
B	0	8	0

INFORMAÇÕES ADICIONAIS

CÓDIGO DO RETENTOR

HORÁRIOS

INÍCIO	FINAL	ESCORIFICANTES
13:01:36	13:01:36	ESCOR PREVISITO REAL 0 1016
13:01:36	13:19:37	DOLCR 0
13:28:22	13:34:34	
00:00:00		
13:21:23	13:35:17	

TEMPERATURAS

PREVISITA	REAL	PREVISITA	REAL	PREVISITA	REAL	PREVISITA	REAL
0	1317	0	1655	1661	1661	1661	1661

DADOS DE ENGENHARIA

CFS visado:	00040	C vazamento:	00045	O2 prev CD:	08093
TFS visada:	01655	Mn vazamento:	00016	CFS prev CD:	00040
CFS previsto:	00040	Sinter no CD:	01410	P estim SL1:	00000
TFS prevista:	01628	MT/CD:	00002	S estim SL1:	00656
BB visada:	00034	MT/OX:	00000	Ressoopro:	00000
BB prevista:	00034	MT:	00000	STE visado:	00570
IGP:	00001	P prev:	00025	OX visado:	00620
IK:	00001	S prev:	00020	CPC:	01621

ANÁLISE DA IAS

ANÁLISE DO SOPRADOR

CONTRA-MEDIDAS



FOLHA DE ANÁLISE DE DESVIO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA

REV.3
03/02/2000

DADOS DE CORRIDA
CORRIDA: PMC:
051816 796745
ANÁLISES QUÍMICAS

AÇO: ROTA: 306 BORB. ARGONIO
TM: SOPRADOR: E PEDRO

DATA: 15/03/00

EQUIPAMENTOS
FURO: SOLA: NIVEL: LANÇA:VIDA: 557 0 7890 0
CALC 0 7890

FERRO LIGAS
LIGA PREVISTO REAL 282 285
ALUMBO 282
CAL 0 500
FEMNMC 96 91

TIPO	C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	Nb	Ti	V	Mo	N	B	Ca	ENVIIO	RECEB
GUSA	0	51	46	98	12	0	0	0	0	0	82	0	0	0	0	0	14:38:43	14:38:43
PANELA (CTO)	4	18	1	12	8	96	1	1	1	0	3	2	0	0	0	0	14:28:15	14:28:15
DISTRIBUIDOR	6	18	2	13	11	73	1	2	1	0	1	0	0	37	2	8	15:23:00	15:23:54
DISTRIBUIDOR	6	18	2	13	11	73	1	2	1	0	1	0	0	37	2	8	15:23:00	15:23:54
FIM DE SOPRO	7	15	1	15	10	299	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	14:09:21	14:09:21
SUB-LANCA	53	28	1	31	12	371	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	14:06:46	14:06:46

CARGA METÁLICA

gusa: gusaco: fofo: suc: cm: 5198 31592 177090 PREVISVA 0 1657
REAL 140800 0 6500 26190 173490 REAL 1662 1662
HORARIO: 14:05:55 14:17:29

TEMPERATURAS

HORÁRIOS

INICIO FINAL
13:47:28 13:47:28
14:05:09 14:05:09
14:10:26 14:16:57
00:00:00 00:00:00
1440

ESCORIFICANTES
ESCOR PREVISVO REAL
CAL 4270 4506
DOLC 3909 3851
DOLCR 0 82
SINTER 531 1357
SUCB 0 1050
DOLCR 0 1183
SINTER 0 492

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO VAZADO

ELEM	MIN	MAX	OBJ
C	3	6	5
Mn	10	25	18
P	0	20	20
S	0	15	15
Si	0	3	0
Al	30	80	60
Cu	0	3	0
Mo	0	2	0
Cr	0	5	0
Ni	0	3	0
Nb	0	5	0
V	0	5	0
Ti	0	5	0
N	5	70	0
B	0	8	0

DADOS DE ENGENHARIA

CFS visado: 00048 C vazamento: 00050 O2 prev CD: 08007
TFS visada: 01657 Mn vazamento: 00014 CFS prev CD: 00048
CFS previsto: 00048 Sinter no CD: 01031 P estim SL1: 00019
TFS prevista: 01657 MT/CD: 00002 S estim SL1: 00656
BB visada: 00037 MT/OX: 00000 Ressorpro: 00000
BB prevista: 00037 MT: 00000 STE visado: 00586
IGP: 00001 P prev: 00020 OX visado: 00623
IK: 00001 S prev: 00015 CPC: 01606

INFORMAÇÕES ADICIONAIS

CÓDIGO DO RETENTOR

ANÁLISE DA IAS

ANÁLISE DO SOPRADOR

CONTRA-MEDIDAS



FOLHA DE ANÁLISE DE DESVIO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA

REV 3
03/02/2000

DADOS DE CORRIDA

CORRIDA: PMC: 796505
 05:18:17 796505
 AÇO: ROTA: 364 BORB. ARGONIO E PEDRO
 TM: SOPRADOR: E PEDRO
 DATA: 15/03/00
 FURO: SOLA: NIVEL: LANÇA:VIDA: ALTI_P: ALTI_R: LIGA PREVISTO REAL
 567 0 0 0 940 10489 10485 287
 CALC 0 7889
 FERRO LIGAS
 COQUE 105 105
 FEMNAC 788 811

EQUIPAMENTOS

Ca ENVIO RECEB
 0 0 0 0 15:21:29 15:21:29
 0 0 0 0 15:20:06 15:20:06
 1 15:29:18 15:29:18
 2 15:43:47 15:43:47
 2 17:02:00 17:02:25
 2 17:19:00 17:19:48
 2 17:19:00 17:19:48
 0 15:20:05 15:20:05
 0 14:51:45 14:51:45

HORÁRIOS

INICIO FINAL
 14:32:58 14:32:58
 14:32:58 14:50:59
 14:53:16 15:00:04
 00:00:00
 1553

TEMPERATURAS

fofo: 5134 31205 173139
 gusaco: 0 7980 29030 174310
 igusa: 0 1660
 PREVISTA REAL
 1315 1652 1652
 HORÁRIO: 14:51:52 15:01:07

ANÁLISE DE ESCÓRIA

MgO: 12,7 1,59 11,69
 SiO2: 1,64 0,07 43,92 5,2 16,54 3,76
 P2O5: S: CaO: MnO: FeT: BBr:

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO VAZADO

ELEM	MIN	MAX	OBJ
C	12	15	14
Mn	40	60	51
P	0	25	25
S	0	20	20
Si	0	3	0
Al	20	80	55
Cu	0	3	0
Mo	0	2	0
Cr	0	5	0
Ni	0	3	0
Nb	0	5	0
V	0	5	0
Ti	0	5	0
N	5	90	0
B	0	8	0

INFORMAÇÕES ADICIONAIS

CÓDIGO DO RETENTOR

DADOS DE ENGENHARIA

CFS visado: 00060 C vazamento: 00046 O2 prev CD: 08147
 TFS visada: 01660 Mn vazamento: 00015 CFS prev CD: 00056
 CFS previsto: 00097 Sinter no CD: 00000 P estim SL1: 00000
 TFS prevista: 01635 MT/CD: 00002 S estim SL1: 00644
 BB visada: 00037 MT/OX: 00000 Ressorpro: 00000
 BB prevista: 00037 MT: 00000 STE visado: 00617
 IGP: 00007 P prev: 00025 OX visado: 00635
 IK: 00009 S prev: 00020 CPC: 01620

ANÁLISE DA IAS

ANÁLISE DO SOPRADOR

CONTRA-MEDIDAS



FOLHA DE ANÁLISE DE DESVIO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA

REV.3
03/02/2000

DADOS DE CORRIDA

CORRIDA: PMC:
061641 796959

ANÁLISES QUÍMICAS

AÇO: ROTA: 371 BORB. ARGONIO E DEOCLÉCIO

TM: SOPRADOR: 18/03/00

FURO: SOLA: NIVEL: LANÇAVIDA: 386 0 0 1 830 10330 10328

EQUIPAMENTOS

ALUMBO 292
CAL 0
FEMNAC 84
FEMNMC 301

FERRO LIGAS

REAL 336
CAL 0 500
FEMNAC 84 44
FEMNMC 301 322

TIPO	C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	Nb	Ti	V	Mo	N	B	Ca	ENVIIO	RECEB
GUSA	0	56	49	92	4	0	0	0	0	0	84	0	0	0	0	0	10:53:13	10:53:13
PANELA (CTO)	4	25	1	11	6	54	1	1	0	0	1	4	0	0	0	0	10:37:31	10:37:31
DISTRIBUIDOR	6	25	1	11	5	38	1	2	1	0	1	0	0	53	1	4	12:01:00	12:01:05
DISTRIBUIDOR	6	25	1	11	5	38	1	2	1	0	1	0	0	53	1	4	12:01:00	12:01:05
FIM DE SOPRO	8	16	1	16	10	331	1	1	2	1	0	0	0	0	0	0	10:18:15	10:18:15
SUB-LANCA	59	30	1	47	13	516	1	2	2	1	0	0	0	0	0	0	10:14:35	10:14:35

CARGA METÁLICA

gusa: gusaco: foto: suc: cm: 10742 31152 180494 PREVISITA 0 1670
REAL 138700 0 10140 31376 180216 REAL 1683 1639 1686
HORÁRIO: 10:21:05 10:32:47

TEMPERATURAS

HORÁRIOS

INICIO FINAL
CARREGAMENTO: 09:54:51 09:54:51
SOPRO: 10:24:47 10:31:45
VAZAMENTO: 00:00:00
INT. VAZAMENTO: 1125
CTO:
ABERTURA MAQ: 1125

ESCORIFICANTES

ESCOR PREVISITO REAL
CAL 4296 4856
DOLC 3802 3766
DOLCR 0 125
SINTER 83 1455
SUCB 0 1100
SINTER 0 3247

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO VAZADO

ELEM	MIN	MAX	OBJ
C	3	6	5
Mn	18	40	29
P	0	25	25
S	0	20	20
Si	0	3	0
Al	20	80	50
Cu	0	3	0
Mo	0	2	0
Cr	0	5	0
Ni	0	3	0
Nb	0	5	0
V	0	5	0
Ti	0	5	0
N	5	90	0
B	0	8	0

DADOS DE ENGENHARIA

CFS visado: 00032 C vazamento: 00040 O2 prev CD: 08606
TFS visada: 01670 Mn vazamento: 00012 CFS prev CD: 00032
CFS previsto: 00035 Sinter no CD: 01415 P estim SL1: 00000
TFS prevista: 01659 MT/CD: 00002 S estim SL1: 00677
BB visada: 00035 MT/OX: 00000 Ressorpro: 00001
BB prevista: 00035 MT: 00001 STE visado: 00536
IGP: 00001 P prev: 00025 OX visado: 00630
IK: 00001 S prev: 00020 CPC: 01615

INFORMAÇÕES ADICIONAIS

CÓDIGO DO RETENTOR

ANÁLISE DA IAS

ANÁLISE DO SOPRADOR

CONTRA-MEDIDAS



FOLHA DE ANÁLISE DE DESVIO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA

REV 3
03/02/2000

DADOS DE CORRIDA

CORRIDA: PMC: 061642 796958
 AÇO: ROTA: 371 BORB. ARGONIO E DEOCLÉCIO
 TM: SOPRADOR: E
 DATA: 18/03/00
 FURO: SOLA: NIVEL: LANÇA: VIDA: ALT_P: ALT_R: LIGA PREVISTO REAL
 396 0 0 1 840 10325 10323 ALUMBO 292 276
 CALC 0 8125 FEMNAC 222 248
 FEMNMC 75 56

EQUIPAMENTOS

FERRO LIGAS

TIPO	C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	Nb	Ti	V	Mo	N	B	Ca	ENVIO	RECEB
GUSA	0	60	67	95	0	0	0	0	0	0	92	0	0	0	0	0	11:46:36	11:46:36
PANELA (CTO)	5	26	1	11	6	18	1	1	1	0	1	6	0	0	2	0	11:31:26	11:31:26
DISTRIBUIDOR	6	27	2	14	8	45	1	2	1	0	1	0	0	51	3	3	13:56:00	13:56:28
DISTRIBUIDOR	6	27	2	14	8	45	1	2	1	0	1	0	0	51	3	3	13:56:00	13:56:28
FIM DE SOPRO	5	14	1	13	9	345	1	1	2	1	0	0	0	0	0	0	11:19:54	11:19:54
SUB-LANCA	17	23	1	21	11	376	1	1	2	1	0	0	0	0	0	0	11:17:34	11:17:34

CARGA METÁLICA

TEMPERATURAS

HORÁRIOS

gusa: gusaco: fofo: suc: cm: tvz: fs: tcto: INICIO FINAL
 PREVISTO 138600 10742 32062 181404 PREVISTA 0 1660 1660 1660 10:56:29 11:14:37
 REAL 138700 0 10350 32570 181620 REAL HORÁRIO: 11:16:02 11:27:04 10:56:29 11:14:37
 ESCOR PREVISTO REAL
 CAL 5666 6454
 DOLC 4190 3696
 DOLCR 0 94
 SINTER 0 692
 SUCB 0 951

ANÁLISE DE ESCÓRIA

MgO: Al2O3: SiO2: P2O5: S: CaO: MnO: FeT: BBr:
 8,69 1,29 12,11 1,38 0,06 40,91 5,41 21 3,38

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO VAZADO

ELEM	MIN	MAX	OBJ
C	3	6	5
Mn	18	40	29
P	0	25	25
S	0	20	20
Si	0	3	0
Al	20	80	50
Cu	0	3	0
Mo	0	2	0
Cr	0	5	0
Ni	0	3	0
Nb	0	5	0
V	0	5	0
Ti	0	5	0
N	5	90	0
B	0	8	0

INFORMAÇÕES ADICIONAIS

CÓDIGO DO RETENTOR

DADOS DE ENGENHARIA

CFS visado: 00032 C vazamento: 00035 O2 prev CD: 08210
 TFS visada: 01660 Mn vazamento: 00014 CFS prev CD: 00032
 CFS prevista: 00035 Sinter no CD: 00692 P estlim SL1: 00016
 TFS prevista: 01659 MT/CD: 00002 S estlim SL1: 00614
 BB visada: 00034 MT/OX: 00000 Ressoro: 00000
 BB prevista: 00034 MT: 00000 STE visado: 00526
 IGP: 00001 P prev: 00025 OX visado: 00614
 IK: 00001 S prev: 00020 CPC: 01626

ANÁLISE DA IAS

ANÁLISE DO SOPRADOR

CONTRA-MEDIDAS



FOLHA DE ANÁLISE DE DESVIO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA

REV 3
03/02/2000

DADOS DE CORRIDA

CORRIDA: PMC: 797006 AÇO: ROTA: 340 BORB. ARGONIO C DEOCLÉCIO C TM: SOPRADOR: DATA: 18/03/00

FURO: SOLA: NIVEL: LANÇA:VIDA: 406 0 0 1 850 10327 10326 ALT_P: ALT_R: LIGA PREVISTO REAL

ALUMBO 261 269 CAL 0 500 COQUE 51 37 FEMNAC 689 755

EQUIPAMENTOS

FURO: SOLA: NIVEL: LANÇA:VIDA: 406 0 0 1 850 10327 10326 ALT_P: ALT_R: LIGA PREVISTO REAL

ALUMBO 261 269 CAL 0 500 COQUE 51 37 FEMNAC 689 755

FERRO LIGAS

TIPO	C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	Nb	Ti	V	Mo	N	B	Ca	ENVIÓ	RECEB	
GUSA	0	57	53	96	5	0	0	0	0	0	83	0	0	0	0	0	0	13:05:56	13:05:56
PANELA (CTO)	8	41	1	12	8	41	1	1	1	0	1	6	0	0	3	0	0	12:49:32	12:49:32
DISTRIBUIDOR	10	41	2	12	9	16	1	2	1	0	1	0	0	38	3	5	0	14:10:00	14:10:14
DISTRIBUIDOR	10	41	2	13	10	26	1	2	1	0	1	0	0	38	4	4	0	14:54:00	14:54:26
DISTRIBUIDOR	10	41	2	13	10	26	1	2	1	0	1	0	0	38	4	4	0	14:54:00	14:54:26
FIM DE SOPRO	4	10	1	11	8	373	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	12:38:50	12:38:50
SUB-LANCA	56	19	1	26	9	327	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	12:34:00	12:34:00

CARGA METÁLICA

gusa:	gusaco:	fofo:	suc:	cmi:	igusa:	tf:	lvz:	tclo:	INICIO	FINAL	ESCORIFICANTES
PREVISTO 138600	10742	31802	181144	PREVISTA 0	1670	1665	1665	1637	12:14:49	12:14:49	ESCOR PREVISTO REAL
REAL 138600	0	11270	32520	182390	REAL 1294	1665	1665	1637	12:14:49	12:33:56	CAL 5367 16783
											DOLC 3867 3810
											DOLCR 0 106
											SUCB 0 1978

TEMPERATURAS

HORÁRIO: 12:35:24 12:45:04

HORÁRIOS

ABERTURA MAQ: 1330

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO VAZADO

ELEM	MIN	MAX	OBJ	INFORMAÇÕES ADICIONAIS	CÓDIGO DO RETENTOR	DADOS DE ENGENHARIA
C	8	11	9			CFS visado: 00064
Mn	35	50	46			TFS visado: 01670
P	0	25	25			CFS previsto: 00064
S	0	25	25			TFS prevista: 01645
Si	0	3	0			BB visada: 00038
Al	20	80	45			BB prevista: 00038
Cu	0	3	0			IGP: 00007
Mo	0	2	0			IK: 00009
Cr	0	5	0			
Ni	0	3	0			
Nb	0	5	0			
V	0	5	0			
Ti	0	5	0			
N	5	90	0			
B	0	8	0			

ANÁLISE DA IAS

ANÁLISE DO SOPRADOR

CONTRA-MEDIDAS

CONTRA-MEDIDAS	ANÁLISE DO SOPRADOR	ANÁLISE DA IAS
O2 prev CD: 08644	C vazamento: 00040	
CFS prev CD: 00031	Mn vazamento: 00015	
P estim SL1: 00000	Sinter no CD: 00000	
S estim SL1: 00642	MT/CD: 00003	
Ressopro: 00000	MT/OX: 00000	
STE visado: 00609	MT: 00000	
OX visado: 00620	P prev: 00025	
CPC: 01623	S prev: 00025	



FOLHA DE ANÁLISE DE DESVIO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA

REV.3
03/02/2000

DADOS DE CORRIDA

CORRIDA: PMC: 061644 797045
ANALISES QUÍMICAS

AÇO: ROTA: 371 BORB. ARGONIO C
TM: SOPRADOR: MARCOS LOUREN C

DATA: 18/03/00
FURO: SOLA: NIVEL: LANÇA: VIDA: 416 0 0 1 860 10324 10323
CALC 0 8127

EQUIPAMENTOS

FERRILIGAS
LIGA PREVISITO REAL
ALUMBO 286 304
CAL 0 500
FEMNAC 26 18
FEMNMC 356 339

TIPO	C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	Nb	Ti	V	Mo	N	B	Ca	ENVIO	RECEB
GUSA	0	52	40	93	0	0	0	0	0	0	57	0	0	0	0	0	14:28:08	14:28:08
PANELA (CTO)	4	27	1	14	9	48	1	1	1	1	1	8	0	0	4	0	14:12:59	14:12:59
FIM DE SOPRO	4	13	1	16	11	331	1	1	2	1	0	0	0	0	0	0	13:59:33	13:59:33
SUB-LANCA	25	27	1	39	13	327	1	1	2	1	0	0	0	0	0	0	13:57:33	13:57:33

CARGA METÁLICA

gusa:	gusaco:	fofo:	suc:	cm:	tgusa:	fs:	tvz:	tcto:
PREVISITO 138600	10742	31152	180494	PREVISITA	0	1640		
REAL 139300	0	10880	31828	182008	REAL	1288	1641	1603

HORÁRIOS

CARREGAMENTO:	INICIO	FINAL	ESCORIFICANTES
SOPRO:	13:37:00	13:37:00	ESCOR PREVISITO REAL
INT. SOPRO:	14:00:33	14:06:42	CAL 3396 3677
VAZAMENTO:	00:00:00		DOLC 2633 2590
INT. VAZAMENTO:			DOLCR 0 101
CTO:			SINTER 988 1353
ABERTURA MAQ:	1440		

ANÁLISE DE ESCÓRIA

MgO: Al2O3: SiO2: P2O5: S: CaO: MnO: FeT: BBr:
8,33 1,31 12,9 1,92 0,06 40,24 6,37 20,09 3,12

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO VAZADO

ELEM	MIN	MAX	OBJ
C	3	6	5
Mn	18	40	29
P	0	25	25
S	0	20	20
Si	0	3	0
Al	20	80	50
Cu	0	3	0
Mo	0	2	0
Cr	0	5	0
Ni	0	3	0
Nb	0	5	0
V	0	5	0
Ti	0	5	0
N	5	90	0
B	0	8	0

INFORMAÇÕES ADICIONAIS

CÓDIGO DO RETENTOR

DADOS DE ENGENHARIA

CFS visado:	00040	C vazamento:	00043	O2 prev CD:	08053
TFS visada:	01640	Mn vazamento:	00013	CFS prev CD:	00040
CFS previsto:	00040	Sinter no CD:	00518	P estim SL1:	00025
TFS prevista:	01658	MT/CD:	00002	S estim SL1:	00641
BB visada:	00032	MT/OX:	00000	Ressopro:	00000
BB prevista:	00032	MT:	00000	STE visado:	00600
IGP:	00001	P prev:	00025	OX visado:	00640
IK:	00001	S prev:	00020	CPC:	01627

ANÁLISE DA IAS

ANÁLISE DO SOPRADOR

CONTRA-MEDIDAS



FOLHA DE ANÁLISE DE DESVIO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA

REV 3
03/02/2000

DADOS DE CORRIDA

CORRIDA: PMC: 796961
061647

TM: SOPRADOR: C MARCOS LOUREN

DATA: 18/03/00

FURO: SOLA: NIVEL: LANÇA: VIDA: ALT_P: ALT_R: 446 0 0 1 890 10331 10327

EQUIPAMENTOS

FERRO LIGAS
ALUMBO 266 270
FEMNMC 311 294

ANALISES QUÍMICAS

TIPO	C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	Nb	Ti	V	Mo	N	B	Ca	ENVIO	RECEB
GUSA	0	57	38	100	0	0	0	0	0	0	60	0	0	0	0	0	17:28:57	17:28:57
PANELA (CTO)	4	26	1	13	7	40	1	1	1	0	3	5	0	0	0	0	17:16:03	17:16:03
DISTRIBUIDOR	6	26	1	17	11	47	1	1	1	0	1	0	0	38	1	23	19:32:00	19:32:20
DISTRIBUIDOR	6	26	1	17	11	47	1	1	1	0	1	0	0	38	1	23	19:32:00	19:32:20
FIM DE SOPRO	6	16	1	15	11	321	1	1	2	1	0	0	0	0	0	0	16:56:07	16:56:07
SUB-LANCA	30	24	1	21	12	374	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	16:54:36	16:54:36

CARGA METÁLICA

gusa: gusaco: fofo: suc: cm: tgsa: tfo: tfs: tvz: tcto: 142100 9668 27687 179455 PREVISTA 0 1655 142100 0 6690 24504 173294 REAL 1303 1666 1666 1652:46 17:08:43

ANÁLISE DE ESCÓRIA

MgO: Al2O3: SiO2: P2O5: S: CaO: MnO: FeT: BBr: 7,65 1,76 10,06 1,73 0,07 41,35 6,01 21,44 4,11

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO VAZADO

ELEM	MIN	MAX	OBJ
C	3	6	5
Mn	18	40	29
P	0	25	25
S	0	20	20
Si	0	3	0
Al	20	80	50
Cu	0	3	0
Mo	0	2	0
Cr	0	5	0
Ni	0	3	0
Nb	0	5	0
V	0	5	0
Ti	0	5	0
N	5	90	0
B	0	8	0

INFORMAÇÕES ADICIONAIS

CÓDIGO DO RETENTOR

HORÁRIOS

INICIO FINAL 16:18:43 16:51:58
CARREGAMENTO: ESCOR PREVISTO REAL
SOPRO: CAL 3700 4699
INT. SOPRO: DOLC 2592 2552
VAZAMENTO: DOLCR 0 92
INT. VAZAMENTO: SUCB 0 2068
CTO:
ABERTURA MAQ: 1750

DADOS DE ENGENHARIA

CFS visado: 00045 C vazamento: 00045 O2 prev CD: 07920
TFS visada: 01655 Mn vazamento: 00016 CFS prev CD: 00033
CFS previsto: 00045 Sinter no CD: 00000 P estim SL1: 00018
TFS prevista: 01662 MT/CD: 00002 S estim SL1: 00655
BB visada: 00035 MT/OX: 00000 Ressoro: 00000
BB prevista: 00035 MT: 00000 STE visado: 00570
IGP: 00001 P prev: 00025 OX visado: 00620
IK: 00001 S prev: 00020 CPC: 01614

ANÁLISE DA IAS

ANÁLISE DO SOPRADOR

CONTRA-MEDIDAS



FOLHA DE ANÁLISE DE DESVIO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA

REV 3
03/02/2000

DADOS DE CORRIDA

CORRIDA: PMC: 061648 796838
 AÇO: ROTA: 352 BORB. ARGONIO C TM: SOPRADOR: MARCOS LOUREN DATA: 18/03/00
 FURO: SOLA: NIVEL: LANÇA:VIDA: 456 0 0 1 900 10335 10330
 ALT_P: ALT_R:
 EQUIPAMENTOS
 CALC 0 8114

FERRO LIGAS

LIGA PREVISTO REAL
 ALUMBO 248 256
 CAL 0 500
 COQUE 53 55
 FEMINAC 638 601

TIPO	C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	Nb	Ti	V	Mo	N	B	Ca	ENVIO	RECEB
GUSA	0	58	48	96	12	0	0	0	0	0	79	0	0	0	0	0	18:16:10	18:16:10
PANELA (CTO)	10	41	1	12	11	77	1	1	1	0	1	9	0	0	2	0	17:55:05	17:55:05
DISTRIBUIDOR	11	40	1	12	10	43	1	2	1	0	3	1	0	45	0	3	21:30:00	21:30:11
DISTRIBUIDOR	11	40	1	12	10	43	1	2	1	0	3	1	0	45	0	3	21:30:00	21:30:11
FIM DE SOPRO	7	17	1	14	12	274	1	1	2	1	0	0	0	0	0	0	17:45:26	17:45:26
SUB-LANCA	15	23	1	18	14	318	1	1	2	1	0	0	0	0	0	0	17:43:11	17:43:11

CARGA METÁLICA

gusa:	gusaco:	foto:	suc:	cm:	tgusa:	fs:	tvz:	tcto:
PREVISTO 142100	0	27687	169787	PREVISTA 0	1645	1661	1661	1614
REAL 142100	0	26258	REAL	1300	1661	17:40:50	17:50:11	

ANÁLISE DE ESCÓRIA

MgO: Al2O3: SiO2: P2O5: S: CaO: MnO: Fe: BBr:
 8,45 1,22 10,61 1,48 0,08 40,58 5,88 21,78 3,82

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO VAZADO

ELEM	MIN	MAX	OBJ
C	10	13	11
Mn	35	55	45
P	0	25	25
S	0	15	15
Si	0	3	0
Al	20	70	55
Cu	0	3	0
Mo	0	2	0
Cr	0	5	0
Ni	0	3	0
Nb	0	5	0
V	0	5	0
Ti	0	5	0
N	5	90	0
B	0	8	0

INFORMAÇÕES ADICIONAIS

CÓDIGO DO RETENTOR

HORÁRIOS

INICIO FINAL
 ESCOR PREVISTO REAL
 CAL 4599 5162
 DOLC 2521 2518
 DOLCR 0 115
 SINTER 0 49
 SUCB 0 1501
 DOLCR 0 765
 SINTER 0 533

DADOS DE ENGENHARIA

CFS visado: 00060 C vazamento: 00060
 TFS visada: 01645 Mn vazamento: 00016
 CFS previsto: 00077 Sinter no CD: 00049
 TFS prevista: 01655 MT/CD: 00002
 BB visada: 00036 MT/OX: 00000
 BB prevista: 00034 MT: 00000
 IGP: 00007 P prev: 00025
 IK: 00009 S prev: 00015

ANÁLISE DA IAS

ANÁLISE DO SOPRADOR

CONTRA-MEDIDAS



FOLHA DE ANÁLISE DE DESVIO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA

REV 3
03/02/2000

DADOS DE CORRIDA

CORRIDA: PMC:
061649 796844
ANÁLISES QUÍMICAS

AÇO: ROTA: 528 BORB. ARGONIO
TM: SOPRADOR: A MARGOS LOUREN
DATA: 18/03/00

EQUIPAMENTOS
FURO: SOLA: NIVEL: LANÇA: VIDA: 466 0 0 1 910
ALT_P: 10333
ALT_R: 10330
CALC 0 8116

FERRO LIGAS
LIGA PREVISTO REAL
ALUMBO 231 228
COQUE 10 28
FECRBC 0 1400
FESI75 294 305
FESIMN 476 447
OUTROS 0 400

TIPO	C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	Nb	Ti	V	Mo	N	B	Ca	ENVIO	RECEB	
GUSA	0	61	52	96	1	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	19:02:02	18:08:23
PANELA (CTO)	8	38	18	18	7	92	23	48	1	0	3	5	0	0	0	0	0	18:44:36	18:44:36
DISTRIBUIDOR	10	41	16	20	8	38	23	51	1	0	3	2	0	0	0	0	0	21:06:00	21:06:48
DISTRIBUIDOR	10	41	16	20	8	38	23	51	1	0	3	2	0	0	0	0	0	21:06:00	21:06:48
SUB-LANCA	23	29	1	26	7	368	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	18:31:35	18:31:35

CARGA METÁLICA

gusa: gusaco: foto: suc: cm: 146100 0 24074 170174 22942
PREVISTO REAL

TEMPERATURAS

tf: 1670
tgsa: 0
tct: 1670
1664 1664
18:29:18 18:39:58

HORÁRIOS

INICIO FINAL
CARREGAMENTO: 18:11:45 18:11:45
SOPRO: 18:11:45 18:28:29
INT. SOPRO:
VAZAMENTO: 18:30:27 18:31:08
INT. VAZAMENTO: 00:00:00
CTO:
ABERTURA MAQ: 1922

ESCORIFICANTES

ESCOR PREVISTO REAL
CAL 3397 4001
DOLC 3743 3720
DOLCR 0 114
SUCB 0 2016

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO VAZADO

ELEM	MIN	MAX	OBJ
C	6	10	8
Mn	30	45	38
P	0	25	25
S	0	10	9
Si	10	20	15
Al	20	70	45
Cu	20	30	26
Cr	40	60	48

INFORMAÇÕES ADICIONAIS

CÓDIGO DO RETENTOR

DADOS DE ENGENHARIA

CFS visado: 00063
TFS visada: 01670
CFS previsto: 00063
TFS prevista: 01631
BB visada: 00030
BB prevista: 00038
IGP: 00002
IK: 00003
C vazamento: 00060
Mn vazamento: 00019
Sinter no CD: 00000
MT/CD: 00002
MT/OX: 00000
MT: 00000
P prev: 00025
S prev: 00009
O2 prev CD: 07417
CFS prev CD: 00054
P estim SL1: 00021
S estim SL1: 00642
Ressopro: 00000
STE visado: 00600
OX visado: 00620
CPC: 01628

ANÁLISE DA IAS

ANÁLISE DO SOPRADOR

CONTRA-MEDIDAS



FOLHA DE ANÁLISE DE DESVIO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA

REV.3
03/02/2000

DADOS DE CORRIDA

CORRIDA: PMC:

061650 796962

ANALISES QUÍMICAS

AÇO: ROTA:

371 BORB.ARGONIO

TM: SOPRADOR:

A NAVARRO

DATA:

18/03/00

EQUIPAMENTOS

FURO: SOLA: NIVEL: LANÇAVIDA:

476 0 0 1 920 10323 10321

CALC 0 8127

FERRO LIGAS

LIGA PREVISTO REAL

ALUMBO 284 286

FEMNMC 390 374

TIPO

GUSA

PANELA (CTO)

DISTRIBUIDOR

DISTRIBUIDOR

FIM DE SOPRO

CARGA METÁLICA

gusaco: foto: suc: cm: tgsa: tcto: tlvz: tfs: tgsa:

PREVISTO 142000 9356 27687 179043 PREVISTA 0 1645

REAL 142000 0 7570 25168 174738 REAL 1304 1628

HORÁRIO: 20:03:49 20:22:17

ANÁLISE DE ESCÓRIA

MgO: Al2O3: SiO2: P2O5: S: CaO: MnO: FeT: BBr:

9,62 1,93 11,21 1,67 0,07 39,14 6,35 21,21 3,49

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO VAZADO

ELEM MIN MAX OBJ

C 3 6 5

Mn 18 40 29

P 0 25 25

S 0 20 20

Si 0 3 0

Al 20 80 50

Cu 0 3 0

Mo 0 2 0

Cr 0 5 0

Ni 0 3 0

Nb 0 5 0

V 0 5 0

Ti 0 5 0

N 5 90 0

B 0 8 0

HORÁRIOS

INICIO FINAL

CARREGAMENTO: 19:42:05 19:42:05

SOPRO: 19:42:05 19:59:47

INT. SOPRO:

VAZAMENTO: 20:04:51 20:05:05

INT. VAZAMENTO: 00:00:00

CTO:

ABERTURA MAQ: 2100

TEMPERATURAS

PREVISTO REAL

1304 1628

HORÁRIO: 20:03:49 20:22:17

DADOS DE ENGENHARIA

CFS visado: 00040

TFS visada: 01645

CFS previsto: 00040

TFS prevista: 01655

BB visada: 00033

BB prevista: 00033

IGP: 00001

IK: 00001

C vazamento: 00045

Mn vazamento: 00013

Sinter no CD: 00000

MT/CD: 00002

MT/OX: 00000

MT: 00001

P prev: 00025

S prev: 00020

08036

00033

00000

00655

00000

00547

00620

01637

ESCORIFICANTES

ESCOR PREVISTO REAL

CAL 3567 3875

DOLC 2373 2340

DOLCR 0 89

SUCB 0 1006

ANÁLISE DA IAS

ANÁLISE DO SOPRADOR

CONTRA-MEDIDAS



FOLHA DE ANÁLISE DE DESVIO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA

REV 3
03/02/2000

DADOS DE CORRIDA

CORRIDA: PMC: 061651 796963
 AÇO: ROTA: 371 BORB. ARGONIO A NAVARRO
 TM: SOPRADOR: A NAVARRO
 DATA: 18/03/00
 FURO: SOLA: NIVEL: LANÇA:VIDA: ALT_P: ALT_R: 486 6388 8216 1 930 10298 10296
 LIGA PREVISTO REAL 269 261
 ALUMBO 344 325
 FEMNMC 344 325

EQUIPAMENTOS

CAVC 0 8216
 CALC 0 8216

FERRO LIGAS

ALUMBO 269
 FEMNMC 344

TIPO	C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	Nb	Ti	V	Mo	N	B	Ca	ENVIO	RECEB
GUSA	0	62	31	95	5	0	0	0	0	0	66	0	0	0	0	0	21:28:21	20:34:43
PANELA (CTO)	4	27	1	14	13	37	1	1	1	0	3	2	0	0	0	0	21:13:23	21:13:23
DISTRIBUIDOR	6	27	1	15	13	43	1	2	1	0	3	1	0	24	0	0	23:02:00	23:02:29
DISTRIBUIDOR	6	27	1	15	13	43	1	2	1	0	3	1	0	24	0	0	23:02:00	23:02:29
FIM DE SOPRO	6	15	1	15	13	342	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	20:59:25	20:59:25
SUB-LANCA	49	34	1	42	15	288	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	20:56:39	20:56:39

CARGA METÁLICA

gusa: gusaco: fofa: suc: cm: 9356 28677 183333 PREVISTA 0
 PREVISTO 145300
 REAL 145300 0 9130 29030 183460 REAL 1343 1683 1654 1641
 HORÁRIO: 21:00:58 21:07:30

TEMPERATURAS

tfs: tvz: tcto: 1660 1683 1654 1641
 21:00:58 21:07:30

HORÁRIOS

INICIO FINAL 20:36:35 20:36:35
 20:36:35 20:54:49
 21:01:30 21:06:58
 00:00:00

ESCORIFICANTES
 ESCOR PREVISTO REAL 3325 3523
 CAL DOLC 2316 2274
 DOLCR 0 107
 SINTER 0 2160
 SUCB 0 2047
 SINTER 0 1122

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO VAZADO

ELEM	MIN	MAX	OBJ
C	3	6	5
Mn	18	40	29
P	0	25	25
S	0	20	20
Si	0	3	0
Al	20	80	50
Cu	0	3	0
Mo	0	2	0
Cr	0	5	0
Ni	0	3	0
Nb	0	5	0
V	0	5	0
Ti	0	5	0
N	5	90	0
B	0	8	0

INFORMAÇÕES ADICIONAIS

CÓDIGO DO RETENTOR

DADOS DE ENGENHARIA

CFS visado: 00040 C vazamento: 00050 O2 prev CD: 08249
 TFS visada: 01660 Mn vazamento: 00015 CFS prev CD: 00040
 CFS previsto: 00040 Sinter no CD: 02160 P estim SL1: 00025
 TFS prevista: 01664 MT/CD: 00002 S estim SL1: 00641
 BB visada: 00037 MT/OX: 00000 Ressorpro: 00000
 BB prevista: 00037 MT: 00001 STE visado: 00537
 IGP: 00001 P prev: 00025 OX visado: 00625
 IK: 00001 S prev: 00020 CPC: 01649

ANÁLISE DA IAS

ANÁLISE DO SOPRADOR

CONTRA-MEDIDAS



FOLHA DE ANÁLISE DE DESVIO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA

REV 3
03/02/2000

DADOS DE CORRIDA
CORRIDA: PMC:
061652 796845
ANALISES QUÍMICAS

ÁÇO: ROTA: TM: SOPRADOR:
528 BORB. ARGONIO A NAVARRO

DATA:
18/03/00

FURO: SOLA: NIVEL: LANÇAVIDA: ALT_P: ALT_R:
496 0 0 1 940 10316 10312

EQUIPAMENTOS

FERRO LIGAS
LIGA PREVISTO REAL
ALUMBO 254 255
COQUE 26 25
FECRBC 0 1400
FESI75 274 274
FESIMN 573 541
OUTROS 0 390

TIPO	C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	Nb	Ti	V	Mo	N	B	Ca	ENVIO	RECEB	
GUSA	0	56	27	95	5	0	0	0	0	0	47	0	0	0	0	0	0	22:16:44	22:16:44
PANELA (CTO)	5	33	16	14	8	58	21	47	1	0	3	3	0	0	0	0	0	22:00:45	22:00:45
DISTRIBUIDOR	8	38	14	21	9	33	23	53	1	0	3	3	0	0	0	2	23:13:00	23:13:52	
DISTRIBUIDOR	8	38	14	21	9	33	23	53	1	0	3	3	0	0	0	2	23:13:00	23:13:52	
FIM DE SOPRO	4	16	1	16	8	308	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	21:52:13	21:52:13	
SUB-LANCA	47	30	1	28	8	342	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	21:48:58	21:48:58	

CARGA METÁLICA

gusaco: fofo: suc: ctn:
0 27521 169821
PREVISTA 0
REAL 28218

TEMPERATURAS

igusa: tfs: tvz: tcto:
0 1665 1656 1617
PREVISTA 0
REAL 1285
HORÁRIO: 21:48:34 21:55:51

HORÁRIOS

INICIO FINAL
CARREGAMENTO: 21:30:28 21:30:28
SOPRO: 21:30:28 21:47:45
INT. SOPRO:
VAZAMENTO: 21:51:01 21:55:22
INT. VAZAMENTO: 00:00:00
CTO:
ABERTURA MAQ: 2240

ESCORIFICANTES
ESCOR PREVISTO REAL
CAL 2834 3158
DOLC 2126 2079
DOLCR 0 114
SUCB 0 2010

ANÁLISE DE ESCÓRIA

MgO: Al2O3: SiO2: P2O5: S: CaO: MnO: FeT: BBr:
8,08 1,45 10,03 1,93 0,06 39,5 7,03 21,67 3,94

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO VAZADO

ELEM	MIN	MAX	OBJ
C	6	10	8
Mn	30	45	38
P	0	25	25
S	0	10	9
Si	10	20	15
Al	20	70	45
Cu	20	30	26
Cr	40	60	48

INFORMAÇÕES ADICIONAIS

CÓDIGO DO RETENTOR

DADOS DE ENGENHARIA

CFS visado: 00060 C vazamento: 00050 O2 prev CD: 07782
TFS visada: 01665 Mn vazamento: 00015 CFS prev CD: 00051
CFS previsto: 00060 Sinter no CD: 00000 P estlim SL1: 00021
TFS prevista: 01642 MT/CD: 00002 S estlim SL1: 00623
BB visada: 00037 MT/OX: 00000 Ressorpro: 00000
BB prevista: 00037 MT: 00000 STE visado: 00605
IGP: 00002 P prev: 00025 OX visado: 00623
IK: 00003 S prev: 00009 CPC: 01620

ANÁLISE DA IAS

ANÁLISE DO SOPRADOR

CONTRA-MEDIDAS



FOLHA DE ANÁLISE DE DESVIO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA

REV 3
03/02/2000

DADOS DE CORRIDA

CORRIDA: PMC:

061653 796849

ANÁLISES QUÍMICAS

EQUIPAMENTOS

FURO: SOLA: NIVEL: LANÇA:VIDA: ALT_P: ALT_R: LIGA PREVISTO REAL
 506 0 0 1 950 10312 10310 ALUMBO 258 248
 CALC 0 8199 COQUE 289 288
 FESI75 420 419
 FESIMIN 762 762

FERRO LIGAS

FM: SOPRADOR: A NAVARRO
 AÇO: ROTA: 590 BORB. ARGONIO

DATA: 18/03/00

TM: SOPRADOR: A NAVARRO

TIPO	C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	Nb	Ti	V	Mo	N	B	Ca	ENVIIO	RECEB
GUSA	0	58	36	98	10	0	0	0	0	0	59	0	0	0	0	0	23:08:16	22:10:45
CONVERSOR	3	15	0	16	7	322	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	22:39:41	22:39:41
PANELA (CTO)	18	43	24	17	10	65	0	1	1	0	3	2	0	0	0	0	22:53:12	22:53:12
DISTRIBUIDOR	19	44	23	22	11	35	1	2	1	0	3	1	0	0	0	0	00:02:00	00:02:54
DISTRIBUIDOR	19	44	23	22	11	35	1	2	1	0	3	1	0	0	0	0	00:02:00	00:02:54

CARGA METÁLICA

gusa: gusaco: fofo: suc: cm: PREVISTO REAL
 138700 0 10340 30968 180008 1660 1660
 138700 0 10310 32050 181060 1277 1277

TEMPERATURAS

tf: tvz: tcto: INICIO FINAL
 1660 1642 1642 22:12:11 22:12:11
 1642 1642 1613 22:12:11 22:30:18
 22:37:18 22:47:29

HORÁRIOS

CARREGAMENTO: 22:40:56 22:47:00
 SOPRO: 00:00:00
 INT. SOPRO: 00:00:00
 VAZAMENTO: 2336
 INT. VAZAMENTO: 2336
 CTO: 2336
 ABERTURA MAQ: 2336

ESCORIFICANTES

ESCOR PREVISTO REAL
 CAL 3656 3644
 DOLC 2432 2401
 DOLCR 0 82
 SINTER 0 417
 SUCB 0 2051

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO VAZADO

ELEM	MIN	MAX	OBJ
C	19	23	23
Mn	35	55	45
P	0	30	30
S	0	20	20
Si	15	30	22
Al	20	45	35

INFORMAÇÕES ADICIONAIS

CÓDIGO DO RETENTOR

DADOS DE ENGENHARIA

CFS visado: 00070 C vazamento: 00033 O2 prev CD: 08236
 TFS visada: 01660 Mn vazamento: 00015 CFS prev CD: 00070
 CFS previsto: 00151 Sinter no CD: 00417 P eslim SL1: 00000
 TFS prevista: 01646 MT/CD: 00002 S eslim SL1: 00623
 BB visada: 00036 MT/OX: 00000 Ressoopro: 00000
 BB prevista: 00036 MT: 00000 STE visado: 00605
 IGP: 00002 P prev: 00030 OX visado: 00623
 IK: 00003 S prev: 00020 CPC: 01629

ANÁLISE DA IAS

ANÁLISE DO SOPRADOR

CONTRA-MEDIDAS

ANEXO C


**RELATÓRIO DE ENSAIO / SERVIÇO: DETERMINAÇÃO DA
COMPOSIÇÃO QUÍMICA – BRIQUETE DE FERRO DA CST**

DATA: 16/11/1999

ANEXO D

PLANTA DE RECUPERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

DATA: 25/03/2002

 Companhia Siderúrgica Paulista	Nº RELATÓRIO	Nº SSL	DATA DE EMISSÃO	Nº FOLHA
	671	1270	31/03/00	01

**GERÊNCIA DE CONTROLE INTEGRADO DE PRODUTO - IQC
LABORATÓRIO DE MATERIAIS**

Área: ANÁLISE QUÍMICA

RELATÓRIO DE ENSAIO / SERVIÇO

Título: DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA BRIQUETE

Solicitante: Guilherme

Unidade: IAS

C.Custo: 1212

Identificação Original do Material	Nº de Cadastro do Material
Briquete CST	20536

Método/Norma: - COSIPA

Equipamento: ICP OPTIMA 3000 DV, Via-Umida

Sumário dos Resultados:

%Elemento	20536
Fe total	69,24
Si	2,00
Al	0,36
Mn	0,92
Ca	10,70
Mg	1,01
P	0,14
C	2,15
S	0,08

Responsável

Nome: Carlos Eduardo Barroca Junior

Ass:

ANEXO D

PLANTA DE RECUPERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

DATA: 25/03/2002

LEGENDA DOS EQUIPAMENTOS - EQUIPMENT LEGEND

ITEM	EQUIPAMENTOS	ITEM	EQUIPAMENTOS
SL-01	SILO	V-01	VENTILADOR INDUZIDO
SL-02	SILO	V-02	VENTILADOR INDUZIDO
SL-03	SILO	V-03	VENTILADOR INDUZIDO
SL-04	SILO	V-04	VENTILADOR INDUZIDO
SL-05	SILO	VT-01	VASO
SL-06	SILO	VT-02	TRANSFESSOR
SL-07	SILO	VT-03	TRANSFESSOR
SL-08	SILO	TQ-01	TRANSMISSOR
SL-09	SILO	TQ-02	TRANSMISSOR
SL-10	SILO	FM	TANQUE
SL-11	SILO	MT-01	AGUA PARA LAVAS
SL-12	SILO	MT-02	FILTROS DE BARRIGAS
SL-13	SILO	BR-01	MISTURADORES
SL-14	SILO	BR-02	PLANTADORES
SL-15	SILO		MISTURADORES
SR-01	SECAADOR ROTATIVO		INTENSIFICOS
SR-02	SECAADOR ROTATIVO		BRQUETADORA
CH-01	CHAMINE		
CH-02	CHAMINE		
CH-03	CHAMINE		
CH-04	CHAMINE		
SP-01	SILO PULVIMO		
SP-02	SILO PULVIMO		
FM-01	FILTRO DE BARRIGAS		
FM-02	FILTRO DE BARRIGAS		
FM-03	FILTRO DE BARRIGAS		
FM-04	FILTRO DE BARRIGAS		

LEGENDA - LEGEND

- MINHA
- CEBEC VALVULA PRESSURIZADA DE CORTA
- D-4 FORTIFICADO DE #
- VALVULA DE ALMO
- VALVULA DE CORTA
- D-4 VALVULA C/ FM DE CORTA
- VALVULA SOBRECITA
- VALVULA PRESSURIZADA
- VALVULA ROTATIVA
- VALVULA 3 VAS PRESSURIZADA
- D-4 VALVULA
- AVV TUBO ALONGAL

REV.	DATA	REVISÃO IN BOMBA	DATA	REVISÃO	APROV.
1	27/03/02	PARA INFORMACAO	REV		
0	25/03/02	PARA INFORMACAO	REV		

PLANTA DE RECUPERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

FLUXOGRAMA DE PROCESSO

PROJ.	PROJ.	PROJ.	PROJ.	PROJ.	PROJ.
1	2	3	4	5	6
25/03/02	25/03/02	25/03/02	25/03/02	25/03/02	25/03/02
5/PISC.	5/PISC.	5/PISC.	5/PISC.	5/PISC.	5/PISC.
1	X				

