

Universidade Federal de Minas Gerais  
Instituto de Ciências Exatas  
Departamento de Ciência da Computação

RONALDO ADRIANO ALVARENGA BORGES

Otimização do carregamento dos fornos de produção de aço (convertedores LD)  
minimizando custo

BELO HORIZONTE  
2016

Universidade Federal de Minas Gerais  
Instituto de Ciências Exatas  
Departamento de Ciência da Computação  
Especialização em Otimização de Sistemas

**Otimização do carregamento dos fornos de produção de aço  
(convertedores LD) minimizando custo**

por

Ronaldo Adriano Alvarenga Borges

Monografia de Final de Curso

Prof. Dr. Martín Gómez Ravetti  
Orientador

BELO HORIZONTE

2016

RONALDO ADRIANO ALVARENGA BORGES

**OTIMIZAÇÃO DO CARREGAMENTO DOS FORNOS DE PRODUÇÃO DE AÇO  
(CONVERTEDORES LD) MINIMIZANDO O CUSTO**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Otimização de Sistemas do Departamento de Ciência da Computação do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do grau de Especialista em Otimização de Sistemas.

Área de concentração: Gestão Industrial

Orientador: Prof. Dr. Martín Gómez Ravetti.

BELO HORIZONTE

2016

© 2016, Ronaldo Adriano Alvarenga Borges  
Todos os direitos reservados

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do ICEx - UFMG**

Borges, Ronaldo Adriano Alvarenga.

B732o Otimização do carregamento dos fornos de produção de aço (convertedores LD) minimizando./ Ronaldo Adriano Alvarenga Borges. – Belo Horizonte, 2016.  
ix, 87 f.: il.; 29 cm.

Monografia (especialização) - Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Ciência da Computação.

Orientador: Martín Gómez Ravetti

1. Computação. 2. Otimização combinatória. 3. Logística  
4. Fornos metalúrgicos. 5. Siderurgia. I. Orientador. II.  
Título.

CDU 519.6\*61 (043)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO  
ESPECIALIZAÇÃO EM OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS: ÁREA DE CONCENTRAÇÃO  
GESTÃO INDUSTRIAL

**OTIMIZAÇÃO DO CARREGAMENTO DOS FORNOS DE PRODUÇÃO DE AÇO  
(CONVERTEDORES LD) MINIMIZANDO CUSTO**

Ronaldo Adriano Alvarenga Borges

Monografia apresentada aos Senhores:

  
Prof. Martin Gonzalez Ravetti – Orientador  
Departamento de Engenharia de Produção - UFMG

  
Prof. Geraldo Robson Mateus  
Departamento de Ciência da Computação - UFMG

  
Prof. Mauricio Cardoso de Souza  
Departamento de Engenharia de Produção - UFMG

Belo Horizonte, 13 de dezembro de 2016

## AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente ao orientador deste trabalho, Prof. Dr. Martin Gómez Ravetti, pela grande atenção dedicada durante esta trajetória.

À minha esposa Marcia, com amor, admiração e gratidão por sua compreensão, carinho, presença e incansável apoio ao longo do período de elaboração deste trabalho.

A Universidade Federal de Minas Gerais, pela oportunidade de realizar esta especialização nesta respeitada instituição.

A empresa USIMINAS, por permitir e incentivar a realização desta jornada acadêmica.

Aos Gerentes Gileno Antônio de Oliveira e Márcio Antônio da Silva pelo apoio e paciência durante o curso.

À minha Família e a Deus por sempre estarem presentes em meus pensamentos.

## RESUMO

Diante da baixa demanda interna e invasão de aço importado de menor preço, agravado ainda pelos altos custos de produção das usinas nacionais devido principalmente aos elevados custos de energia, impostos e matérias-primas é cada vez maior a pressão para redução dos custos de produção e otimização dos diversos processos produtivos das usinas siderúrgicas nacionais. Neste contexto este trabalho buscou, através de ferramentas de otimização, melhorar a competitividade da empresa pela otimização do carregamento dos fornos da aciaria através da previsão da carga ou conjunto de menor custo, sem que houvesse impactos negativos significantes no processo de fabricação do aço nos convertedores LD. No modelo proposto é possível programar um aço de menor custo, otimizando os diferentes tipos de carga metálica, fundentes e escorificantes a serem carregados nos fornos, respeitando as restrições metalúrgicas e operacionais. Os resultados computacionais indicam que o menor custo está na direção da maximização do carregamento de cargas metálicas sólidas em detrimento de gusa líquido. Além disso, impactos no custo previstos pela modificação da composição química, por exemplo, do silício do gusa líquido, foram verificados.

**Palavras-Chaves:** Otimização, Conversor LD, Carregamento, Programação Linear.

## ABSTRACT

Due to the low domestic demand and imported steel lowest price invasion, compounded by high production costs of local steel plants mainly due to high energy costs, taxes and raw materials is increasing pressure to reduce production and cost optimization the various production processes of domestic steel plants. In this context, this study aimed, through optimization tools to improve the company's competitiveness by optimizing the loading of the steel plant furnace through the provision of charge or set of lower cost, with no significant negative impacts on the steelmaking process in LD converters. In the proposed model is possible to set a lower cost steel, optimizing the different types of metallic charge being charged in the furnace, observing the metallurgical and operational constraints. The computational results indicate that the lowest cost is in the direction of maximizing the loading of solid metal (scraps) instead of liquid metal (pig iron). Furthermore, impacts on the cost provided by modifying the chemical composition, for example, silicon in a pig iron were observed.

**Keywords:** Optimization, LD Converter, Charging, Linear Programming.



## LISTA DE FIGURAS

FIG.1 Representação esquemática do fluxo de produção de uma usina siderúrgica integrada. .....	17
FIG.2 Representação esquemática do processo de fabricação de aço nos conversores LD.....	20
FIG.3 Representação esquemática do carregamento de sucata e gusa respectivamente nos conversores LD.....	22
FIG.4 Representação esquemática do sopro de oxigênio nos conversores LD.....	23
FIG.5 Representação esquemática da evolução da composição química do metal e da escória durante o sopro de oxigênio nos conversores LD.....	24
FIG.6 Representação esquemática do sopro de oxigênio nos conversores LD durante a formação da emulsão metal-gás-escória .....	26
FIG 7 Representação esquemática dos <i>INPUT</i> e <i>OUTPUT</i> do processo. ....	42
FIG 8 Impacto do % de carga sólida no custo de produção do aço líquido. ....	73
FIG 9 Custo reduzido das diversas cargas metálicas.....	74
FIG 10 Custo reduzido das diversas cargas metálicas.....	77
FIG 11 Custo reduzido dos fundentes e escorificantes.....	78
FIG 12 Impacto da perda térmica no % de carga sólida enforada. ....	79

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 Composição química das cargas metálicas .....	45
TABELA 2 Composição química dos fundentes e escorificantes .....	45
TABELA 3 Parâmetros de proporcionalidade utilizados para estimativas das perdas de materiais através da fumaça .....	48
TABELA 4 Composição química típica de escória.....	63
TABELA 5 Valores adotados para os custos unitários das matérias-primas.....	65

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 Descrição das variáveis do modelo para o balanço de massa.....	43
QUADRO 2 Descrição das variáveis do modelo para o balanço térmico .....	533
QUADRO 3 Balanço térmico do forno .....	533

## LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS

EAF	<i>Electric Arc Furnace</i>
LD	<i>Linz Donawitz Converter or Basic Oxygen Furnace</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
1.1	Apresentação e contextualização do problema .....	10
1.2	Objetivo .....	12
1.3	Estrutura do trabalho de pesquisa .....	12
<b>2</b>	<b>DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE AÇO E DO PROLEMA 14</b>	
2.1	Considerações iniciais e importância .....	14
2.2	Conceito, tipos e aplicações dos aços .....	14
2.3	Cadeia produtiva (fabricação) .....	16
2.4	Estado da arte do processo LD .....	18
2.5	Descrição do processo de fabricação de aço em conversores LD .....	20
2.5.1	Descrição das etapas do processo de fabricação de aço em conversores LD 22	
2.5.1.1	Carregamento do forno LD (ETAPA 1) .....	22
2.5.1.2	Processo de sopro com a lança de oxigênio sobre a carga metálica (ETAPA 2) .....	23
2.5.1.3	Processo de vazamento do aço do convertedor na panela de aço (ETAPA 3) .....	27
2.6	Descrição do problema .....	28
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>29</b>
3.1	Estado da arte. ....	29
3.2	Considerações iniciais do processo de modelagem do processo de fabricação de aço nos conversores LD. ....	32
3.2.1	Balanço de massa do forno. ....	33
3.2.2	Balanço térmico do forno. ....	36
3.2.3	Construção do modelo (função objetiva e restrições) .....	38
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>39</b>
4.1	Considerações iniciais e terminologias (Etapa A) .....	40
4.2	Fundamentação do modelo matemático (Etapas B e C) .....	41
4.2.1	Balanço de massa do forno (Etapa B) .....	41
4.2.1.1	Balanço de massa do <i>INPUT</i> do forno .....	46
4.2.1.2	Balanço de massa do <i>OUTPUT</i> do forno .....	47
4.2.1.2.1	Fumaça.....	48
4.2.1.2.2	Gases.....	49
4.2.1.2.3	Escória.....	50
4.2.1.2.4	Aço.....	51
4.2.1.2.5	Considerações operacionais .....	51
4.2.2	Balanço térmico do forno (Etapa C) .....	52
4.2.2.1	Considerações iniciais .....	52
4.2.2.2	<i>INPUT</i> de energia .....	54
4.2.2.2.1	Entalpia do gusa líquido (CALG).....	54
4.2.2.2.2	Entalpia de formação da escória (ENTES).....	54

4.2.2.2.3	Entalpia de formação dos gases (ENTGAS) .....	57
4.2.2.2.4	Entalpia de formação da fumaça (ENTFUM) .....	58
4.2.2.2.5	Energia total fornecida ao sistema ( <i>INPUT</i> ) .....	59
4.2.2.3	<i>OUTPUT</i> de energia .....	59
4.2.2.3.1	Entalpia do aço (ENTACO) .....	59
4.2.2.3.2	Entalpia da escória (ENTES) .....	60
4.2.2.3.3	Entalpia dos gases (ENTGAS) .....	61
4.2.2.3.4	Entalpia da fumaça (ENTFUM) .....	61
4.2.2.3.5	Perda Térmica.....	61
4.2.2.4	Considerações finais.....	62
4.2.2.4.1	Considerações relativas ao consumo de oxigênio.....	62
4.2.2.4.2	Considerações relativas às matérias-primas utilizadas no modelo .....	63
4.2.2.4.3	Considerações relativas à escória .....	63
4.2.2.4.4	Considerações relativas ao aço líquido a ser produzido .....	64
4.2.2.4.5	Considerações relativas aos custos unitários .....	64
4.2.2.4.6	Outras considerações .....	65
4.2.3	Definição da função objetivo e das restrições (modelo matemático) (Etapa D) .....	66
<b>5</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS .....</b>	<b>72</b>
5.1	Avaliação das cargas metálicas.....	73
5.1.1	Variação do custo em função dos percentuais de carga sólida (sucatas) carregadas.....	73
5.1.2	Análise do custo reduzido para algumas cargas metálicas.....	74
5.2	Avaliação dos fundentes e escorificantes .....	76
5.2.1	Variação do custo em função do silício do gusa líquido e dos fundentes e escorificantes carregados.....	76
5.2.2	Análise do custo reduzido dos fundentes e escorificantes.....	78
5.3	Avaliação dos limites de perda térmica possíveis .....	79
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>81</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>82</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>83</b>
	<b>APÊNDICE I – FORMA DO MODELO IMPLEMENTADO NO SOFTWARE LINGO86</b>	

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Apresentação e contextualização do problema

Diante do cenário desafiador enfrentado pela siderurgia nacional de baixa demanda interna e invasão de aço importado de menor preço, agravado ainda pelos altos custos de produção das usinas nacionais devido aos custos de energia, impostos e matérias primas é cada vez maior a pressão para redução dos custos de produção e otimização dos diversos processos produtivos das usinas siderúrgicas nacionais. Neste contexto, a Usiminas que possui duas usinas siderúrgicas, ambas integradas, ou seja, usinas que fabricam aço a partir da produção de gusa nos seus altos-fornos (área operacional conhecida como Redução). Segue pela Aciaria (área operacional de transformação do gusa, sucatas e outras matérias-primas em aço) onde este gusa juntamente com as sucatas (comprada ou de reaproveitamento interno) e outras matérias primas são transformadas em aço em fornos do tipo conversor LD. O objetivo é melhorar sua competitividade através da redução dos custos na escolha destas matérias-primas. Em especial, na etapa de fabricação de aço na Aciaria de Ipatinga (objeto deste trabalho), é preciso estabelecer um conjunto ótimo das diversas matérias-primas (carga metálica “Gusa e Sucatas”, fundentes e escorificantes) respeitando as diversas restrições metalúrgicas e de processo durante o carregamento dos conversores LD para que se tenha um aço de menor custo possível e com as especificações químicas demandadas pelos clientes.

A Usiminas possui atualmente 5 fornos do tipo LD na usina de Ipatinga e 3 fornos na usina de Cubatão e é o processo atual vigente de fabricação do aço da empresa.

Simplificadamente, este processo de fabricação consiste na conversão do ferro-gusa, sucatas, fundentes e escorificantes em aço líquido. No caso da Aciaria da Usina de Ipatinga esta transformação é feita em reatores (fornos) do tipo LD (conversores ou convertedores). Esta transformação ocorre a partir das diversas reações químicas provenientes do sopro de oxigênio na superfície destas matérias-primas inicialmente carregadas nos reatores.

Atualmente as áreas operacionais, engenharia e custos buscam otimizar o carregamento destas matérias-primas com intuito de obter, no final do processo, um aço líquido de menor custo possível.

A otimização do carregamento, principalmente de gusa e sucata em termos de participação % e composição destas matérias-primas, são de extrema relevância, pois quase todo custo desta etapa está nestes materiais. Uma descrição mais detalhada deste processo é apresentada no capítulo seguinte desta monografia.

Portanto, busca-se com este trabalho, através de ferramentas de otimização o mix ótimo de carregamento dos fornos, respeitando as restrições de processo, para que se obtenha um aço de menor custo possível na Aciaria da Usina de Ipatinga.



## **1.2 Objetivo**

Desta forma, o objetivo principal deste projeto é a formulação de um modelo matemático para a seleção do conjunto de matérias primas dos convertedores LD's. O modelo visará à minimização do custo de produção respeitando as restrições operacionais e técnicas destes fornos.

## **1.3 Estrutura do trabalho de pesquisa**

O presente trabalho está estruturado em sete capítulos, incluindo este introdutório no qual é feita a contextualização, delimitação e a definição dos objetivos, juntamente com a estrutura do trabalho. No Capítulo 2 é apresentada uma descrição do processo de fabricação de aço em fornos LD e a descrição do problema a ser resolvido. No Capítulo 3, é apresentada a “Revisão Bibliográfica”, na qual são apresentados trabalhos realizados pertinentes ao tema desta monografia. No Capítulo 4, “Metodologia”, são relatados os procedimentos adotados para construção do modelo matemático para resolução do problema proposto. No Capítulo 5, “Análise e discussão dos Resultados”, são apresentados os resultados computacionais do modelo proposto, assim como, algumas análises de otimização de carregamento dos fornos. No Capítulo 6, “Conclusões”, é apresentado um resumo conclusivo deste trabalho abordando os fatos relevantes do processo de modelagem matemática e otimização do carregamento de fornos LD. No Capítulo 7,

“Sugestões para Trabalhos Futuros”, são sugeridos temas relevantes para dar continuidade e aprofundamento em tópicos relevantes desta monografia.

## **2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE AÇO E DO PROLEMA**

### **2.1 Considerações iniciais e importância**

O aço é o material mais utilizado, dentre todos os outros materiais existentes, e o que possui as mais diversas aplicações. Seria praticamente impossível imaginar o mundo sem aço e, qualquer sociedade desenvolvida ou que se queira desenvolver passa ou passará pelas etapas de desenvolvimento e consolidação de um parque siderúrgico (ARAUJO, 2009; CHIAVERINI, 2005).

Além disso, como um indicador de desenvolvimento econômico, podemos utilizar a produção e o consumo de aço para medir o grau de desenvolvimento de um país, pois indiretamente estaremos mensurando a construção de edifícios, produção de carros e diversos outros bens que são demandados pelos diversos setores da economia.

### **2.2 Conceito, tipos e aplicações dos aços**

De acordo com Chiaverini (2005, p. 22) “aço é a liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes do processo de fabricação”. A quantidade máxima de 2,11% irá depender da presença ou não nestes aços dos chamados elementos de liga ou de elementos residuais cujos teores encontram-se acima do

normal. Diante disso, Chiaverini (2005) classifica os aços em 2 grandes grupos, a saber:

- Aços-Carbono ou liga ferro carbono contendo geralmente 0,008% a 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais resultantes do processo de fabricação (este grupo subdivide-se em baixo, médio e alto carbono);
- Aços-Liga ou aço carbono que contém outros elementos de liga ou apresenta os elementos residuais em teores acima dos que são considerados normais (este grupo subdivide-se em aços baixo e alta liga).

Segundo Mourão et al. (2007) os produtos siderúrgicos podem ser classificados em 3 grandes categorias, a saber:

- Produtos planos: são aqueles que apresentam formatos planos e que são obtidos via processo de laminação (ex. bobinas e chapas);
- Produtos não planos ou longos: são aqueles obtidos por processos de conformação, como laminação ou trefilação, geralmente na forma de perfis, fios, arames, sendo que uma forma particular deste grupo (longos) são produtos na forma alongada como os vergalhões, tarugos, barras e arames;
- Produtos fundidos: são aqueles cuja peça é obtida por vazamento de metal líquido em formas ou moldes. Blocos de motores, objetos de arte e autopeças são alguns exemplos deste tipo de produto.

O tipo de aço no qual cada produto será feito dependerá da aplicação final, o que na prática, determinará quais as propriedades que os aços deveram ter e por conseqüência por quais processos de fabricação eles deverão passar (MOURÃO et al., 2007). Alguns exemplos de aplicações dos aços em setores diversos da economia seriam os aços estruturais utilizados em estruturas onde se necessita resistência mecânica e soldabilidade, aços para estampagem nos quais podem ser

feitas estampagens profundas e que são tão utilizados na indústria automobilística, aços para tubos utilizados em tubulações de petróleo e gas, aços para vasos de pressão que estarão submetidos a altos níveis de pressão e ambientes corrosivos dentre outros.

### **2.3 Cadeia produtiva (fabricação)**

De acordo com Mourão (2007), as usinas siderúrgicas podem ser divididas em 2 grupos, as usinas integradas e semi-integradas. As usinas integradas são aquelas cujo aço é fabricado a partir do chamado ferro primário, isto é, a matéria-prima é o minério de ferro que é transformado em ferro gusa nos altos-fornos da própria usina (área operacional conhecida como redução) sendo este ferro gusa a principal matéria-prima a ser carregada nos fornos LD (área operacional conhecida como aciaria) juntamente com as sucatas e outras matérias-primas para a fabricação do aço. Já as usinas semi-integradas são aquelas cujo aço é obtido a partir do chamado ferro secundário, isto é, a matéria-prima principal é a sucata de aço comprada no mercado, não necessitando da etapa de redução do minério de ferro dos altos-fornos. Esta sucata é posteriormente carregada com outras matérias-primas nos chamados fornos elétricos a arco onde será fabricado o aço.

No caso específico deste trabalho, estaremos considerando somente a fabricação em uma usina integrada, ou seja, as matérias-primas a serem consideradas serão o ferro gusa, as sucatas, fundentes e escorificantes.

Basicamente as etapas que compõem todo o processo de fabricação de aço podem ser assim resumidas:

1. Extração do ferro (ferro gusa) de seu minério nos altos-fornos (área de redução);
2. Conversão do ferro gusa e sucatas em aço (área de aciaria);
3. Lingotamento do aço líquido (aciaria) de forma a solidificar em forma conveniente para as operações seguintes de laminação;
4. Conformação do aço solidificado na forma de produto acabado ou semi-acabado (laminadoes);

A FIG.1 ilustra o fluxo de produção de uma usina siderúrgica integrada e toda a sequência de etapas desde o recebimento das matérias-primas até os produtos finais.

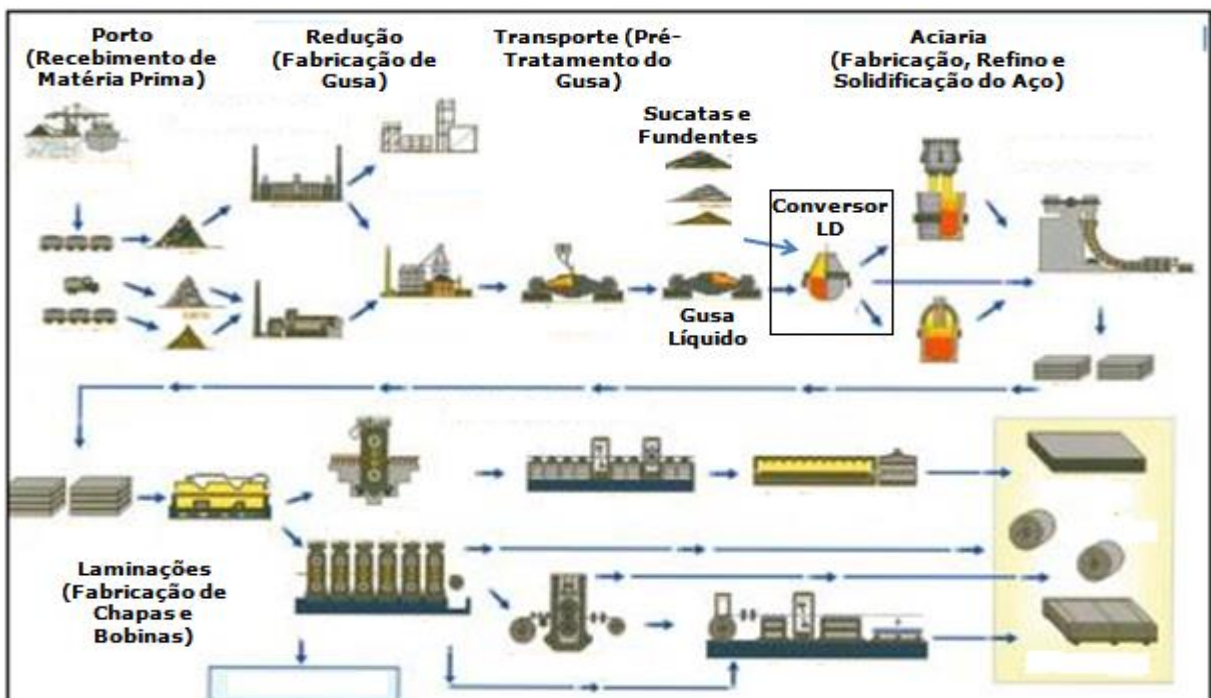


FIG.1 Representação esquemática do fluxo de produção de uma usina siderúrgica integrada.

Vale lembrar que esta monografia visa modelar matematicamente um dos equipamentos (Conversor LD em destaque na FIG.1) que compõe a chamada etapa de fabricação do aço líquido na aciaria.

## 2.4 Estado da arte do processo LD

O processo de fabricação de aço em conversores LD (LINZ DONAWITZ) data dos primórdios dos anos 50, onde a primeira planta de Aciaria LD em Linz, na Áustria, deu início a suas operações.

Em 1949, Voest Linz e Alpine Donawitz levaram a cabo tentativas para oxidar o gusa líquido por sopro com oxigênio puro. Para esta série de ensaios, panelas de transferência de gusa foram primeiramente utilizadas como recipientes de ensaio. A primeira fábrica de aço via BOF ("Basic Oxygen Furnace") entrou em operação na cidade de Linz no outono de 1952, e em Donawitz na primavera de 1953, daí a utilização da sigla "LD" em referência às cidades situadas na Áustria, onde o processo foi originalmente desenvolvido. (MAIA, 2007, p.4)

A partir daí as aciarias de todo o mundo começaram a utilizar o sopro de oxigênio, de alta pureza, em reatores do tipo Conversor LD como principal forma de conversão das matérias primas (gusa líquido, sucatas, fundentes e escorificantes) em aço líquido (BARÃO et al., 2011).

O processo LD foi rapidamente introduzido no Brasil, através da Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira, cuja aciaria LD na usina de João Monlevade, entrou em funcionamento em 07 de outubro de 1957, menos de 5 anos após a de Linz. Em 1963 iniciaram a sua operação as usinas da Companhia Siderúrgica Mannesmann, em Belo Horizonte e Intendente Câmara, da Usiminas, em Ipatinga. A usina de Barão de Cocais iniciou a adoção do processo LD no ano de 1979, pela Cimetal Siderúrgica S.A., empresa integrante do Grupo Siderbrás. (MAIA, 2007, p.7)

Segundo Chaves (2006), cerca de 80% da produção de aço no Brasil é feita através de reatores do tipo conversor LD, sendo que isto se deve principalmente as características deste processo de alta produtividade, custos adequados e grande flexibilidade metalúrgica.

Os outros 20% basicamente é produzido em fornos elétricos a arco (EAF), sendo que a diferença está basicamente nas fontes de energia e na composição da carga metálica e não metálica.

Barão et al. (2011) relata que em comparação com os antigos fornos Siemens-Martin, os fornos LD possuem diversas vantagens como:

- Custos de investimentos e operacionais 40% mais baixos;
- Melhoria significativa na qualidade do aço;
- Maior reprodutibilidade de resultados;
- Redução significativa nos tempos operacionais
- Menores custos de produção

A rápida seqüência de operações de refino em aciarias de elevada capacidade e a operação simultânea de convertedores confere às aciarias LD uma grande produtividade. Por outro lado, com a aplicação de práticas de sopro adequadas, quase todas as reações de refino podem ser obtidas, conferindo ao processo grande versatilidade metalúrgica. (MAIA, 2007, p.5)

Apesar do desenvolvimento muito rápido deste processo, os seus princípios básicos permaneceram praticamente constantes. Entretanto, foram feitos consideráveis desenvolvimentos, não só na capacidade dos fornos, que alcança a ordem de 400 toneladas, mas também na sua forma e dispositivos de sustentação e basculamento, na forma e número dos bicos para sopro do oxigênio, na qualidade dos refratários e de outras variáveis de processo (MUNDIM, 1991).

Basicamente o grande custo envolvido na fabricação em fornos LD está nos custos das matérias-primas metálicas (gusa e sucata) a serem carregados nos conversores. Entretanto, estas matérias-primas estão sujeitas não somente as restrições de custo, mas também de processo (termodinâmicas, físico-químicas, dimensão dos equipamentos).



## 2.5 Descrição do processo de fabricação de aço em conversores LD

A fabricação de aço em reatores do tipo conversor LD, ou convertedor LD, basicamente é um processo de refino primário dos aços no qual as impurezas do gusa (carga metálica líquida) provenientes dos altos-fornos e, eventualmente das sucatas (carga metálica sólida) parcialmente gerada dentro da própria usina e/ou comprada de fornecedores externos, são oxidadas, por oxigênio soprado em uma lança supersônica, incorporando-se à escória formada por compostos não metálicos (fundentes e escorificantes) adicionados durante o processo de sopro dentro destes reatores (ARAÚJO, 2005; BARÃO et al.,2011). Além disso, há a geração de gases do processo e particulados.

Uma representação esquemática do processo pode ser feita como mostrado na FIG.2:

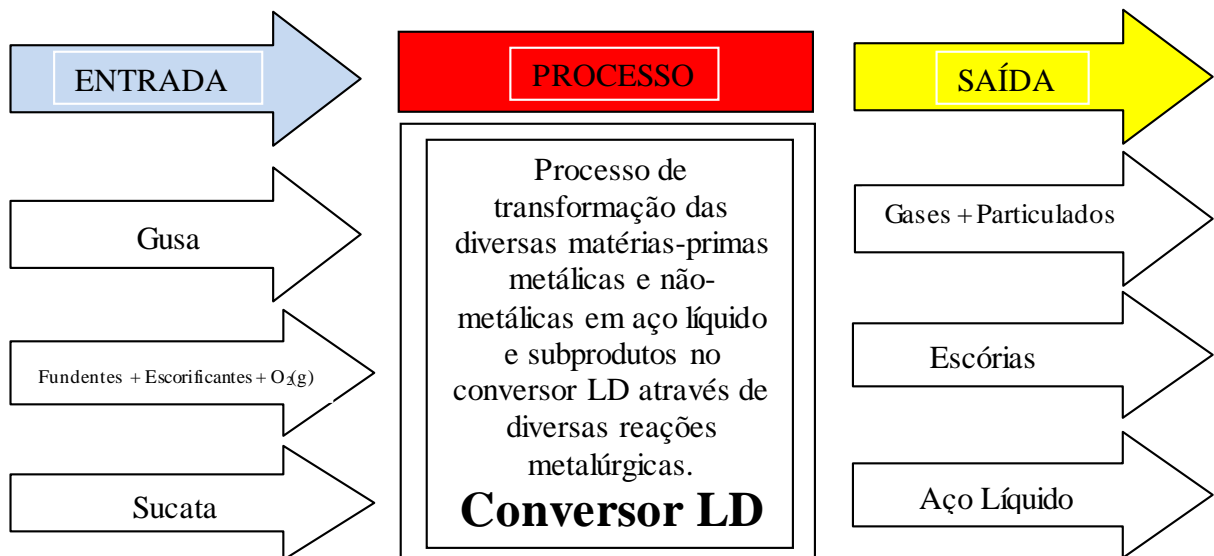


FIG.2 Representação esquemática do processo de fabricação de aço nos conversores LD.

Logo, através das matérias-primas produzidas internamente ou compradas é fabricado o aço líquido e gerados os subprodutos.

O processo de fabricação do aço no LD consiste basicamente em realizar o carregamento das cargas metálicas no reator, inicialmente inclinado, e após o carregamento submeter o banho metálico (gusa e sucatas) a um sopro de oxigênio de alta vazão com uma lança especial para tal finalidade. Durante o sopro são adicionadas outras matérias-primas (fundentes e escorificantes) que formarão uma escória na qual as impurezas do gusa e sucata (Mn, P, S, etc) na forma de óxidos formados pela oxidação destes elementos pelo oxigênio soprado serão retidos. Além disso, o carbono será oxidado nas formas de CO e CO<sub>2</sub> formando um gás que será captado pelo sistema de sucção do forno. Junto a este gás será arrastado particulados pelo sistema de despoejamento (CHO, 1982).

Todo este processo é na sua quase totalidade exotérmico liberando grande quantidade de energia. Segundo Cho (1982), o atendimento às especificações metalúrgicas do aço líquido é conseguido por duas formas: - Pelo cálculo das proporções das matérias-primas a enforar em função das análises químicas e pelo controle da altura de lança. Além disso, segundo este autor, em geral o aço líquido produzido pelo processo LD possui composição química bastante uniforme no final de sopro, sendo que as variedades de tipo de aço são obtidas posteriormente efetuando adições após o processo LD. Nosso modelo irá contemplar somente a fabricação no forno LD, as demais etapas dos processos da aciaria não serão contempladas, pois o objetivo é a otimização do carregamento do forno sem causar grandes transtornos metalúrgicos.

## 2.5.1 Descrição das etapas do processo de fabricação de aço em conversores LD

### 2.5.1.1 Carregamento do forno LD (ETAPA 1)

O carregamento do forno LD inicia-se com o carregamento da carga sólida (sucatas) através das canaletas de sucata e do basculamento do vaso do reator (forno LD) a um ângulo de aproximadamente  $45^\circ$  com relação à vertical para recebimento desta matéria-prima. A canaleta consiste basicamente de uma caçamba aberta no topo e em uma das extremidades, permitindo o deslizamento da sucata quando a caçamba é inclinada. Logo a seguir o ferro-gusa líquido é carregado (com uma panela de gusa) no reator sobre a sucata.

A FIG.3 abaixo ilustra os carregamentos de sucata e do gusa no LD.

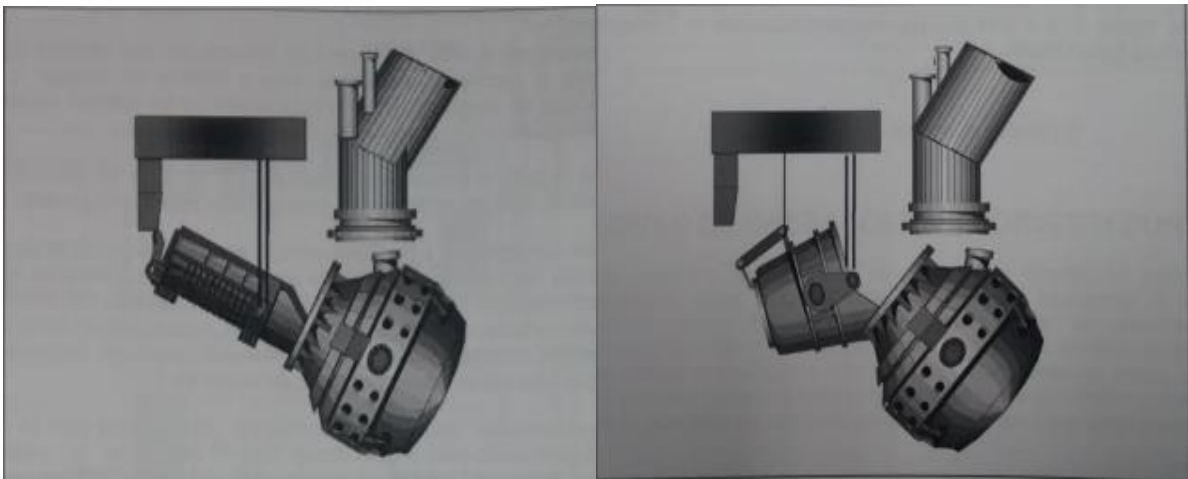


FIG.3 Representação esquemática do carregamento de sucata e gusa respectivamente nos conversores LD.

### 2.5.1.2 Processo de sopro com a lança de oxigênio sobre a carga metálica (ETAPA 2)

Após o carregamento da sucata e do gusa o vaso do reator é basculado para a posição vertical, para que ocorra a descida e posteriormente o sopro de oxigênio por intermédio de uma lança (FIG.4). A lança de oxigênio é refrigerada a água, contendo na sua extremidade os bocais de saída de oxigênio. A lança de oxigênio segue um padrão de altura em relação ao banho metálico durante o sopro, denominada “distância lança-banho”. Este padrão de altura é determinado pelas diferentes etapas do processo sopro (MAIA, 2007).

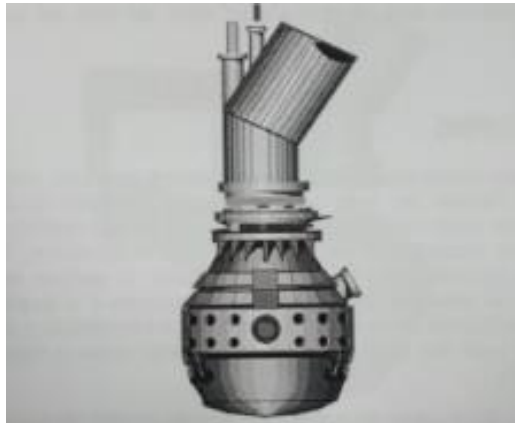


FIG.4 Representação esquemática do sopro de oxigênio nos conversores LD.

A partir daí o processo de sopro (fabricação do aço) se desenvolve em 4 etapas distintas: ignição, formação da escória, descarburização e oxidação para acerto da temperatura. Para iniciar o processo, a lança é abaixada até uma altura que permita a ignição da corrida, ou seja, que ocorra a oxidação de algum elemento do banho pelo oxigênio soprado (MAIA, 2007).

Após a primeira etapa, de ignição da corrida, inicia-se a etapa formação de escória, cuja tem duração é de aproximadamente 6 minutos. Esta etapa, também

denominada de primeiro período da descarburização, é caracterizada pela oxidação quase completa do silício e uma oxidação acentuada do manganês, enquanto a velocidade de descarburização aumenta à medida que os teores destes dois elementos diminuem. A evolução da composição química do metal e da escória durante o sopro é mostrada na FIG.5, caracterizando 3 das 4 etapas distintas, de acordo com a variação da velocidade de reação de descarburização.

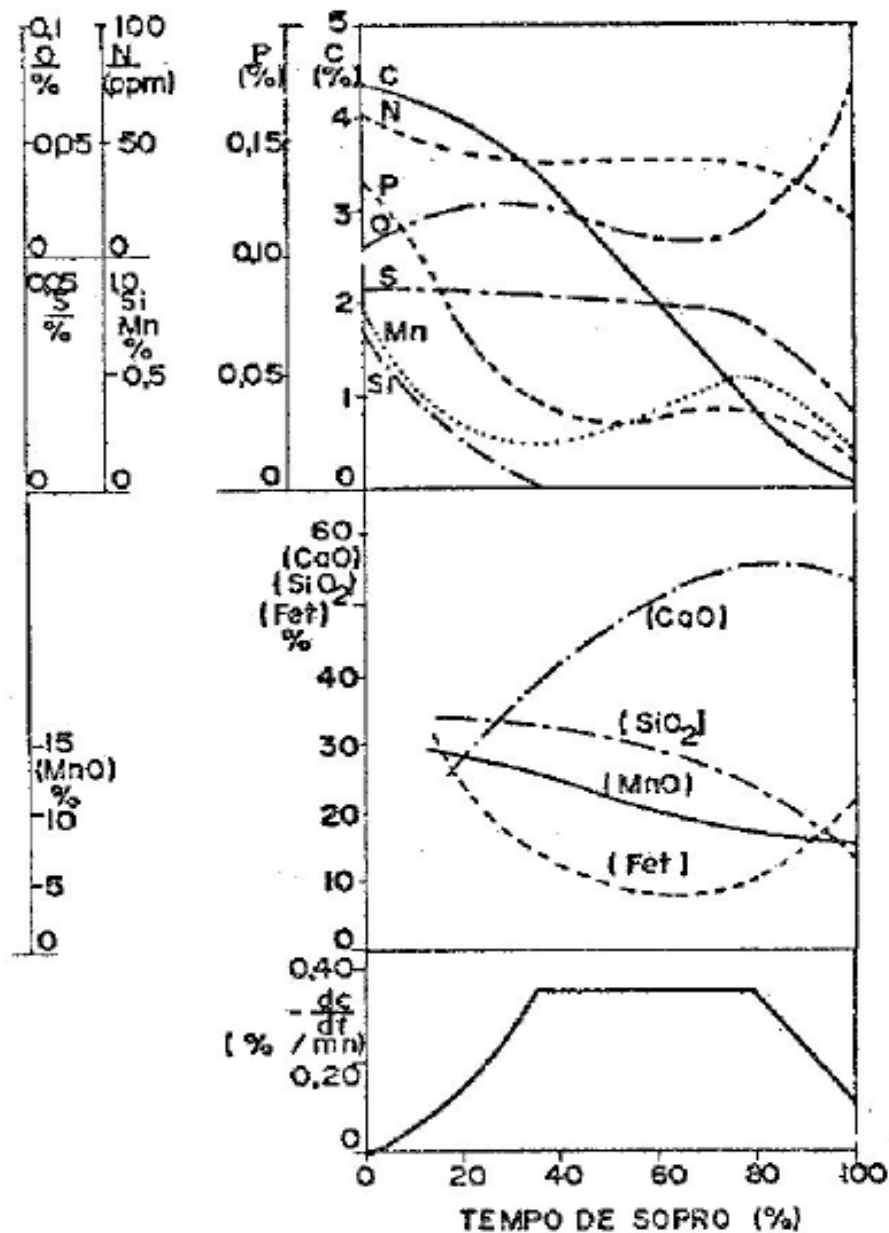


FIG.5 Representação esquemática da evolução da composição química do metal e da escória durante o sopro de oxigênio nos conversores LD.

Durante a etapa inicial de formação da escória, todos os escorificantes e fundentes são adicionados por intermédio de silos aéreos. Os silos aéreos, localizados acima do convertedor, armazenam cal calcítica, cal dolomítica e dolomita crua como escorificantes e minério de ferro utilizado como refrigerante. Os materiais escorificantes são adicionados durante o sopro, provocando o aumento dos percentuais de CaO e MgO na escória. A incorporação destes óxidos básicos dependem da temperatura do banho e dos percentuais de FeO e SiO<sub>2</sub>, que determinam a velocidade de dissolução da cal (MAIA, 2007).

A composição da escória formada vai se alterando no decorrer do período de sopro. A escória formada contém CaO, SiO<sub>2</sub>, FeO, MgO; MnO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, entre outros.

Durante o sopro de oxigênio, a taxa de descarburização varia de acordo com a curva mostrada na FIG.5 ( $-d\%C/dt$ ). O segundo estágio de descarburização envolve principalmente a oxidação do carbono, após a oxidação do Si. As condições no reator são de elevação de temperatura (as reações de descarburização são exotérmicas e elevam a temperatura do banho metálico) e da existência da emulsão metal-gás-escória que favorecem a descarburização, sendo a velocidade da reação determinada somente pela disponibilidade de oxigênio.

Na FIG.5 esta etapa é representada pelo trecho onde  $-d\%C/dt$  é constante. Durante este período a reação de oxidação forma dois produtos, CO e CO<sub>2</sub> com análise variando entre 55 a 70 % de CO e 45 a 30% de CO<sub>2</sub>. A geração de gases (CO e CO<sub>2</sub>) no seio da emulsão metal-escória provoca o “espumamento” da escória e a formação da emulsão metal-gás-escória, que ocupa maior parte do volume do forno, conforme pode ser visto na FIG.6.

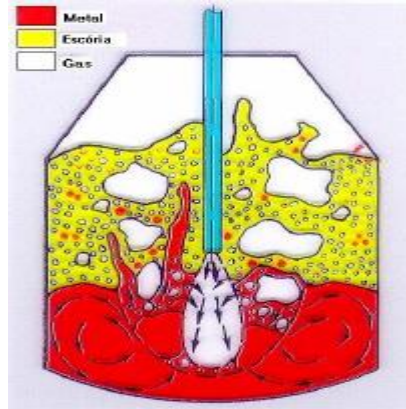


FIG.6 Representação esquemática do sopro de oxigênio nos conversores LD durante a formação da emulsão metal-gás-escória (Malynowskyj, 2004).

O término desta etapa está condicionado ao início da queda na taxa de descarburização (trecho de curva descendente na FIG.5 na qual a descarburização está vinculada não mais pela disponibilidade de oxigênio, mas pela difusão do carbono até a interface de reação).

A última etapa do sopro objetiva o aumento da temperatura do banho metálico, principalmente em processos onde o aporte térmico é comprometido por maiores quantidades de sucata enfiada (MAIA, 2007). Esta etapa é caracterizada pela velocidade decrescente de descarburização e por um aumento gradativo da oxidação do manganês e ferro, na medida em que o teor de carbono no banho diminui. A diminuição da geração de gases provoca a destruição gradual da emulsão, com o coalescimento das partículas metálicas e seu retorno ao banho. A determinação da temperatura de final de sopro considera as perdas térmicas de processamentos e manuseios da corrida posterior à etapa de refino primário.

O período compreendido pelo início e final de sopro determina o tempo total de sopro que varia de 16 a 23 minutos.

Todas estas transformações ocorridas no reator durante o tempo de sopro levam a transformação das matérias-primas carregadas em aço líquida com

composição típica de final de sopro de 0,03 a 0,05% de carbono, em torno de 0,17% de manganês, 0,018% de fósforo, 0,018% de enxofre.

O teor de manganês, fósforo e enxofre no aço dependem das porcentagens destes elementos no ferro-gusa líquido e da sucata sólida e do volume de oxigênio soprado.

### **2.5.1.3 Processo de vazamento do aço do convertedor na panela de aço (ETAPA 3)**

Após término do período de sopro é realizada amostragem do aço e mensurada a temperatura do banho. Caso temperatura e composição química estejam de acordo com a previsão estimada do aço, o convertedor LD é basculado para o vazamento do aço líquido em uma panela de aço. Durante o vazamento, ocorrem adições de materiais desoxidantes e ligas, de acordo com a qualidade do aço a ser produzida. Em seguida, o convertedor é basculado para realizar o vazamento de escória, que acontece do lado contrário do vazamento de aço. Finalmente o convertedor é basculado novamente para a posição de vazamento de aço no ângulo de 45° em relação a vertical, onde ele estará preparado para receber novo carregamento.

O ciclo de produção do LD na aciaria é governado pela seqüência de movimentos do convertedor e equipamentos (lanças de sopro e temperatura).

As etapas 1, 2 e 3 compõe o tempo de ciclo de produção do LD, denominado tempo de processo, atualmente, com tempos entre 38 e 40 minutos por



corrida. Outra forma de medir a produtividade de uma aciaria é através do conceito do “*tap-to-tap*” que considera o tempo de vazamento a vazamento. Neste caso são incorporados todos os eventos de uma corrida à outra, incluindo paradas provocadas por causas externas ou falta de matéria prima (MAIA, 2007).

## 2.6 Descrição do problema

O principal problema enfrentado pelos envolvidos no processo de conversão das cargas metálicas, fundentes e escorificantes em aço nos fornos LD é o de determinar qual a melhor combinação (mix) destas cargas, em termos de composição química e custos, que resulte em um aço com o menor custo possível, dentro das especificações químicas solicitadas.

Além disso, existem restrições de carregamento relativas às capacidades dos equipamentos envolvidos, como o peso máximo suportado pelas pontes de carregamento de sucata e gusa líquido.

Restrições metalúrgicas das fases envolvidas (Líquida = gusa + aço + escória; Sólida = sucatas + fundentes + escorificantes; Gases = CO e CO<sub>2</sub>), em especial, termodinâmicas, devem ser respeitadas e controladas.

Os balanços de massa e térmico do sistema (Conversor LD) devem ser equalizados de forma que o equacionamento matemático reflita as condições reais do sistema.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Estado da arte.**

A siderurgia, ou melhor, o setor siderúrgico é extremamente importante para o desenvolvimento de toda e qualquer sociedade industrializada. A sociedade, que está sempre sofrendo transformações ao longo do tempo, demandará diversos tipos de produtos siderúrgicos e aquela que puder fabricá-los a custos competitivos estará sempre à frente das outras economias.

Diante do exposto acima, a busca constante pela otimização dos processos siderúrgicos, em especial, aqueles que demandam grandes volumes de matérias-primas e de energia, estarão sempre no foco das atenções dos diversos profissionais envolvidos no dia a dia das usinas.

O processo de fabricação de aço em convertedores do tipo LD é amplamente utilizado nas usinas siderúrgicas integradas na etapa intermediária de fabricação de aço conhecida como aciaria. É na aciaria que o ferro gusa produzido nos altos-fornos, juntamente com as sucatas e outros insumos são transformados em aço nas diversas aciarias do mundo.

O uso de modelamento matemático, juntamente com softwares de otimização de processos são ferramentas que podem trazer grandes ganhos em termos de redução de custos e desempenho operacional. Neste contexto, o uso de ferramentas de otimização linear para resolver diversos problemas de otimização

nos diversos tipos de indústria se torna chave na redução de custos e desempenho operacional (JUNIOR, 2013).

Apesar da escassez de literatura a respeito de modelagem de fornos deste tipo, alguns trabalhos de modelagem matemática (programação linear e não linear) já foram feitos com o objetivo de otimizar, ou melhor, determinar as quantidades e tipos ótimos das diversas matérias-primas a serem carregadas em alguns tipos de fornos nas siderúrgicas.

Podemos citar como um dos trabalhos pioneiros nesta área os estudos de Fabian (1958, 1967), no qual uma usina siderúrgica integrada tem uma escolha do uso de vários materiais e processos de produção. Neste trabalho é construído um modelo de programação linear de minimização de custos que é subdividido em três sub-modelos: Um para a fabricação de ferro gusa, um para a fabricação de aço e um para operações de laminação.

A dissertação de mestrado de Cho (1982) traz um modelo de programação linear que otimiza e integra as áreas de sinterização, alto forno e aciaria em termos de determinação dos diferentes tipos de matérias-primas que devem ser utilizadas na produção de gusa e aço, maximizando o lucro e respeitando as restrições metalúrgicas. Além disso, neste trabalho é mostrada uma forma de modelagem matemática e metalúrgica de fornos típicos encontrados em siderúrgicas.

Já Yu (2009) e Bai (2014) descrevem modelos de programação linear buscando otimizar os custos com energia determinando os parâmetros ótimos de operação em termos de carregamento e tempos de operação de fornos elétricos a arco na indústria siderúrgica.

No trabalho desenvolvido por Logunova, O. S. e Pavlov, V. V. (2014) é mostrado um modelo de otimização linear no qual é modelado o carregamento de

um forno elétrico siderúrgico buscando uma alternativa, em termos de elementos residuais e custo de matérias-primas metálicas alternativas, visando obter um aço dentro dos limites de composição química especificados. Os resultados deste trabalho mostraram que a substituição dos principais materiais de carga até então utilizados (ferro gusa líquido e sucata) por materiais alternativos (HBI e ferro gusa sólido) seria uma melhor escolha em termos de custos e residual químico final do aço.

Sakalli, Baykoç e Birgören (2011) construíram um modelo de programação não linear no qual foi possível determinar uma combinação ótima (em termos de custos) de carregamento de forno considerando as flutuações das composições químicas das matérias-primas, em especial do teor metálico, e buscando uma produção dentro dos limites químicos pré-determinados para o produto final.

Conforme trabalho desenvolvido por Taszner (2007) é descrito um modelo para determinar os tipos e as quantidades ótimas de sucata (carga metálica) em função dos preços de compra e quantidade de impurezas visando otimizar a produção de aço.

Trabalho semelhante é descrito por Sutherland, J. e Haapala, K (2007), no qual, é construído um modelo de otimização de carregamento de fornos elétricos a arco visando reduzir o consumo de energia elétrica e conseqüentemente reduzindo os eventuais impactos ambientais decorrentes deste tipo de processo.

Fator importante a ser considerado é com relação às perdas térmicas ocorridas ao longo da campanha destes fornos. Segundo Gerasimenko (2012), a eficiência do processo de fusão das cargas metálicas sólidas dos conversores depende da utilização eficiente da energia disponível. Isso exige correção dos

parâmetros térmicos durante o funcionamento do desgaste progressivo do revestimento destes reatores e uma estimativa do calor associado perdas.

Em um encontro nacional de engenheiros de produção, Santolin (2010), apresentou um trabalho no qual é descrito um modelo de otimização que mostra como reduzir custos de produção de tarugos de uma usina siderúrgica otimizando a carga metálica dos fornos elétricos de tal usina.

De forma geral podemos encontrar trabalhos sobre blendagem de matérias-primas durante o carregamento de fornos (não necessariamente do tipo LD) que possuem princípios que podem ser aplicados a este trabalho. Como exemplos, podemos citar: Bliss (1997), Kim, J. e Lewis, R (1987), Buehlmann, Ragsdale e Gfeller (2000), Ashayeri et al. (1994), Al-Shammari, M. e Dawood, I (1997), Sakalli, U. e Birgoren, B (2009).

Em seu livro de otimização linear, Darci Prado descreve técnicas e softwares capazes de otimizar através de modelos matemáticos e programação linear o carregamento de fornos siderúrgicos (PRADO, 2012).

### **3.2 Considerações iniciais do processo de modelagem do processo de fabricação de aço nos conversores LD.**

Como comentado na seção anterior, apesar de existir pouca literatura a respeito de otimização via modelagem matemática do processo de fabricação de aço em conversores LD, segundo Barão et al. (2011); Cherém (1980) e Cho (1982) a

construção do modelo de otimização do carregamento dos conversores LD pode ser feita através da divisão do trabalho em três partes:

1. Balanço de massa do forno
2. Balanço térmico do forno
3. Construção do modelo (função objetiva e restrições)

Em se tratando de modelamento de sistemas como máquinas e equipamentos metalúrgicos a obtenção das condições ótimas de operação, ou seja, da otimização das variáveis de processo como, por exemplo, os diversos tipos de matérias-primas a serem carregadas, de modo a obter o produto final com o menor custo, dependem em sua essência do correto balanço de massa e energia dos sistemas envolvidos. Neste caso os balanços de massa e de energia são essenciais para o projeto de equipamentos e devem ser satisfeitos, na íntegra, para que um processo seja operado da forma mais econômica possível (MAZZUCCO, 2013).

Os critérios econômicos sejam de materiais, energia ou financeiros, são imperativos na implantação ou operação de um processo. Com isso a análise energética, através do balanço de energia, é imprescindível nos estudos de viabilidade econômica de um processo. Porém, não apenas por questões econômicas, mas também como requisito para o projeto de equipamentos, estudos de impacto ambiental e desenvolvimento de novos processos. (MAZZUCCO, 2015, p.57)

### **3.2.1 Balanço de massa do forno.**

O balanço de massa de sistemas tem como principal objetivo equalizar as entradas e saídas dos diversos constituintes de um dado sistema de modo que o princípio da conservação de massa seja respeitado. Segundo este princípio, “A massa do universo (em estudo) não pode ser criada ou destruída”; esta é a lei sobre

a qual estão baseados os balanços de massa (BARÃO et al., 2011; MAZZUCCO, 2013).

O balanço de massa representa uma peça fundamental do projeto de equipamentos e torna-se complexo quando tratamos de processos constituídos por diversos equipamentos interligados. Esta complexidade aumenta em sistemas multifásicos, heterogêneos e com reações químicas. Por isso, é necessária uma sistematização das informações disponíveis para que seja possível uma solução clara e objetiva. (MAZZUCCO, 2013, p.4)

Para que se realize a otimização das diversas matérias-primas a serem carregadas no reator LD (forno em estudo), ou em qualquer tipo de sistema em estudo deve ser realizado primeiramente o balanço de massa de tais sistemas. Este balanço de massa nada mais é do que o equacionamento (equalização) de todas as entradas e saídas do reator (em termos de matérias-primas, produtos e subprodutos) de modo que não seja criada e nem destruída qualquer tipo de matéria.

Segundo Mazzucco (2013), para que seja realizado o balanço de massa de um dado sistema em estudo é necessário, ou melhor, é indicado que sejam realizados os seguintes passos:

- 1- Formar um diagrama detalhado do processo;
- 2- Delimitar, com uma linha tracejada, a parte do processo que será estudada;
- 3- Quantificar todas as correntes conhecidas, bem como de seus constituintes;
- 4- Reunir todas as equações possíveis, relacionando os diversos constituintes de todas as correntes;
- 5- Reunir informações complementares;
- 6- Escolher uma Base de Cálculo para iniciar os Balanços.

De forma geral os balanços de massa podem ser realizados de duas maneiras:

Dois tipos de Balanços podem ser realizados: um Balanço Global e os Balanços Individuais para cada uma das espécies químicas. Assim sendo, será obtido um sistema de equações, as quais devem ser independentes, ou seja, uma equação não pode ser obtida pela combinação de outras. A partir do balanço de massa, podem ser obtidas tantas equações, quantos forem os componentes do processo (MAZZUCCO, 2013, p.6).

O balanço global será a soma dos balanços individuais e deverá ser estabelecido em uma determinada base de cálculo.

Ao modelar processos metalúrgicos os princípios e fundamentos acima devem ser obedecidos e, o equacionamento do modelo matemático de otimização dos fornos deverá conter as equações de todas as entradas e saídas do sistema (forno). O balanço de massa para qualquer processo metalúrgico está baseado no princípio da conservação de massa ou matéria, que matematicamente pode ser representado da seguinte maneira (BARÃO et al., 2011):

$$\text{ENTRADA DE MASSA} = \text{SAÍDA DE MASSA} + \text{ACUMULAÇÃO DE MASSA}$$

Segundo ainda Barão et al. (2011), em processos metalúrgicos contínuos ou em bateladas não existe acumulação de massa, de modo que é possível igualar as entradas e saídas de massa do sistema (forno) sem quaisquer prejuízos ou incorreções para o processo, ou melhor, modelo matemático de otimização do carregamento. Portanto o balanço de massa se resume a:

$$\text{ENTRADA DE MASSA} = \text{SAÍDA DE MASSA}$$

Obviamente o assunto “Balanço de massa” não se encerra pela breve descrição acima, entretanto o objetivo desta seção é apenas abordar e esclarecer os fundamentos e princípios nos quais este trabalho foi estabelecido e demonstrar



como é possível modelar processos como este. Desta forma, o detalhamento de como foi realizado o balanço de massa para este caso específico será profundamente abordado na seção “METODOLOGIA” deste trabalho.

### **3.2.2 Balanço térmico do forno.**

O balanço térmico, ou melhor, de energia de sistemas tem como principal objetivo equalizar as entradas e saídas de energia de um dado sistema em estudo, de modo que o princípio da conservação de energia seja respeitado. Segundo este princípio, “A energia não pode ser criada nem destruída em um sistema de massa constante, mas pode ser convertida de uma forma para outra” esta é a lei sobre a qual estão baseados os balanços térmicos ou energéticos dos sistemas e, nada mais é do que, a fundamentação da primeira lei da termodinâmica (BARÃO et al., 2011; MAZZUCCO, 2013).

O fundamento principal do balanço de energia está na primeira lei da termodinâmica, que afirma que a variação do conteúdo energético de um sistema fechado é a diferença entre o calor fornecido a este e o trabalho realizado pelo mesmo. Os estudos termodinâmicos são essenciais para a consolidação dos Balanços de Massa e Energia. (MAZZUCCO, 2013, p.57)

O balanço de energia basicamente segue os mesmos preceitos do balanço de massa. Entretanto não realizamos balanço de energia ao nível de espécies químicas somente macroscopicamente. O primeiro pré-requisito é a definição de sistema.

De acordo com Barão et al. (2011), sistema é espaço contido dentro do limite a ser definido pela pessoa que for calcular o balanço térmico. Assim, o sistema pode ser tanto uma chama, como um forno ou uma usina.

O segundo pré-requisito é a realização do balanço de massa do sistema em estudo de forma correta e o conhecimento das reações globais que ocorrem neste sistema. O balanço de massa deve ser realizado antes do balanço de energia, pois sendo a entalpia uma grandeza extensiva (depende da massa), qualquer erro no balanço de massa afetará o balanço de energia (BARÃO et al., 2011; MAZZUCCO, 2013).

Da mesma forma que o balanço de massa, o balanço de energia pode ser matematicamente representado da seguinte forma:

$$\begin{array}{ccc} \text{ENTRADA DE ENERGIA} & - & \text{SAÍDA DE ENERGIA} = \text{ENERGIA ACUMULADA} \\ \text{NO SISTEMA} & & \text{DO SISTEMA} \quad \text{NO SISTEMA} \end{array}$$

Como o termo energia acumulada no sistema geralmente está associado à variação de algum parâmetro (na maioria dos casos a temperatura) com o tempo e normalmente esse tipo de balanço é realizado para estados estacionários o termo de acumulação pode ser desprezado e a formulação acima ficará da seguinte forma (BARÃO, 2011):

$$\begin{array}{ccc} \text{ENTRADA DE ENERGIA} & = & \text{SAÍDA DE ENERGIA} \\ \text{NO SISTEMA} & & \text{DO SISTEMA} \end{array}$$

Da mesma forma que para o balanço de massa o assunto “Balanço de energia” não se encerra pela breve descrição acima, entretanto o objetivo desta seção é apenas abordar e esclarecer os fundamentos e princípios aos quais este trabalho foi estabelecido e demonstrar como é possível modelar processos como

este. Desta forma, o detalhamento de como foi realizado o balanço de energia para este caso específico será profundamente abordado na seção “METODOLOGIA” deste trabalho.

### **3.2.3 Construção do modelo (função objetiva e restrições)**

A construção de modelos matemáticos de otimização de sistemas envolvem basicamente duas etapas: A construção da função objetivo e a determinação das equações relativas às restrições do modelo.

No primeiro caso a função objetivo visa otimizar um dado sistema em estudo o que pode ser feito através da maximização de uma determinada função ou pela sua minimização. O que irá determinar se a função será de maximizar ou minimizar será o tipo de critério em estudo. Por exemplo, se estamos analisando custos de produção provavelmente a função objetivo será de minimização. Agora, se o objetivo for o de aumentar os lucros, provavelmente encontraremos uma função maximizadora.

Com relação às restrições, estas são equações que visam obter as condições de contorno do problema. Ou seja, as restrições serão um conjunto de equações que irão tornar, ou melhor, assegurar que o modelo reflita a quase totalidade das diversas limitações de um dado sistema, de modo que o modelo reflita bem a situação real.

## 4 METODOLOGIA

Para facilitar a compreensão deste capítulo, o mesmo foi organizado seguindo as seguintes etapas:

- A. Realização de considerações iniciais e algumas terminologias usualmente utilizadas
- B. Construção do balanço de massa do forno LD
- C. Construção do balanço térmico do forno LD
- D. Formulação do modelo matemático propriamente dito com as restrições e a função objetivo baseado nas considerações dos itens B e C citados anteriormente

Esta divisão é necessária já que o modelo matemático só pode ser formulado a partir do equacionamento dos balanços de massa e térmico do forno e, obviamente, das restrições operacionais e metalúrgicas as quais o sistema está sujeito.

A etapa A é simplesmente para ajudar o leitor a familiarizar-se com a notação utilizada no texto relativo a algumas variáveis e parâmetros (as demais virão no decorrer dos balanços de massa e térmico).

As etapas B e C estão relacionadas ao consumo das matérias-primas e da energia no LD juntamente com a produção dos produtos, subprodutos e perdas do processo. Além disso, são levadas em consideração a estruturação metalúrgica (termodinâmica) e condições de contorno a que o reator é submetido.

A etapa D, o modelo matemático propriamente dito, é constituída da função objetivo (determinação no mix de carregamento ótimo de menor custo) e das

restrições de processo relativas às etapas B e C (restrições metalúrgicas) e das restrições operacionais (restrições relativas ao dimensionamento dos equipamentos principais e auxiliares).

#### 4.1 Considerações iniciais e terminologias (Etapa A)

Antes de iniciarmos a seção relativa à metodologia, vale relembrar algumas terminologias e definições importantes para a compreensão, não somente matemática, do modelo proposto, mas também a compreensão metalúrgica do modelo. Ainda, no decorrer da construção do modelo matemático, serão adotadas algumas notações com o objetivo de facilitar a sua compreensão. As definições abaixo foram baseadas em Cho (1982).

- Corrida: Retirada periódica de uma quantidade de produtos em estado líquido de um forno.
- Entalpia: Calor contido em uma substância na temperatura  $T$  (K). Por convenção é calculado tomando como referência a temperatura ambiente (298 K). Notação:  $(H_T - H_{298})$ . Unidade: Cal/mol (calorias por mol)
- Entalpia de formação ou calor de formação: Calor gerado ou consumido na formação de uma substância química na temperatura ambiente. Logo, para substâncias químicas na forma elementar deveremos seu calor de formação é nulo. Notação:  $\Delta H_{298}$ . Unidade: Cal/mol (caloria por mol).
- $\text{Nm}^3$ : Normal metro cúbico representa a unidade de volume ocupado pelo gás nas condições normais de pressão e temperatura.

- th: Thérmia, unidade de calor ( $10^6$ ) calorias
- $M_x$ : mol de uma substância química x
- $(X)_i$ : teor de uma substância química x na matéria-prima i.

Outra consideração importante é a de que o modelo aqui proposto está baseado, principalmente, na dissertação de mestrado de Cho (1982), pois esta possui muita similaridade com o objetivo desta monografia.

## **4.2 Fundamentação do modelo matemático (Etapas B e C)**

Para facilitar a compreensão do modelo matemático, a sua construção foi feita em etapas, seções seguintes, nas quais foram descritas as considerações relevantes ao seu entendimento. Inicialmente foram descritos os balanços de massa, de energia, as restrições metalúrgicas e operacionais do forno. Após estas etapas o modelo propriamente dito é descrito considerando toda esta fundamentação.

### **4.2.1 Balanço de massa do forno (Etapa B)**

O balanço de massa, ou melhor, dos materiais, foi esquematizado baseado no princípio da conservação de massa, onde as entradas do forno LD (Gusa, Sucatas, Fundentes, escorificantes e oxigênio) serão transformadas em saídas (Aço, Escória, Gases, Fumaças). A FIG. 7 ilustra as entradas e saídas do

sistema (conversor LD). Nela estão indicadas as matérias-primas com suas respectivas temperaturas ( $T_i$ ) e quantidades ( $P_i$ ).

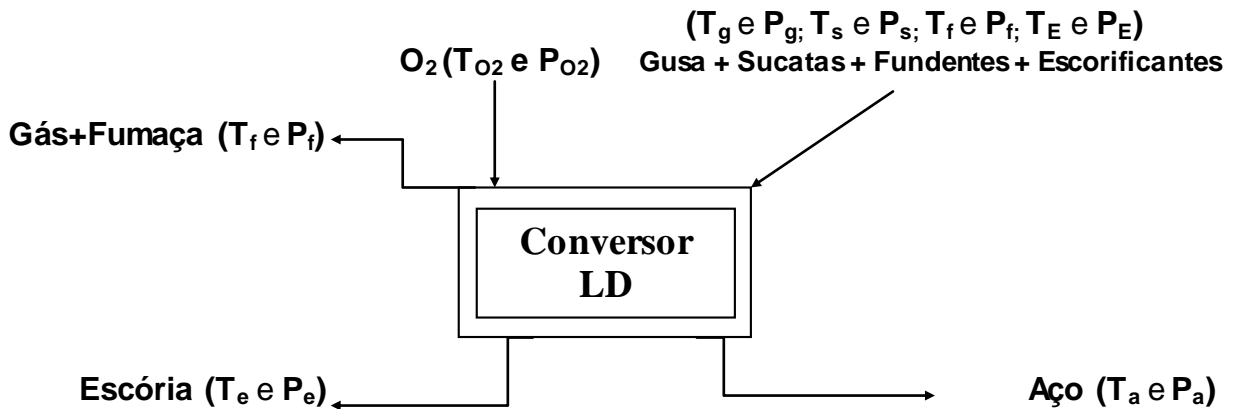


FIG 7 Representação esquemática dos *INPUT* e *OUTPUT* do processo.

Além disso, para que o balanço de massa do forno seja equalizado é necessária a definição das diversas variáveis do sistema. O Quadro 1 apresenta as variáveis (de entrada e de saída) assim como suas definições e unidades respectivas que serão utilizadas no modelo.

Outra consideração importante é relativa aos parâmetros a serem utilizados no modelo (composição química média das matérias-primas, por exemplo). Estes refletirão nos coeficientes das equações do modelo. As Tabelas 1 e 2 ilustram estes parâmetros com suas respectivas descrições e valores utilizados.

Os demais parâmetros serão apresentados no decorrer do trabalho, à medida que os mesmos precisem ser descritos para a compreensão total de cada seção.

QUADRO 1  
 Descrição das variáveis do modelo para o balanço de massa

Variável	Descrição	Unidade	Representação no modelo
AÇO	Quantidade de aço a ser produzida	t.	-
CAÇO	Quantidade de carbono no aço	t.	-
CAL	Quantidade de cal enforcada	t.	$Z_i$
CAO	Quantidade de CAO na escória	t.	-
CAOES	Quantidade de CAO em excesso na escória	t.	-
CARBON	Quantidade de carbono enforcado	t.	-
CALCAR	Quantidade de calcário enforcado	t.	$Z_i$
DOLCAL	Quantidade de dolomita calcinada enforcada	t.	$Z_i$
DOLCRUA	Quantidade de dolomita crua enforcada	t.	$Z_i$
CO	Quantidade de carbono de CO no gás	t.	-
CO <sub>2</sub>	Quantidade de carbono de CO <sub>2</sub> no gás	t.	-
ESCOR	Quantidade de escória	t.	-
FEAÇO	Quantidade de FE no aço	t.	-
FEPERD	Quantidade de FE perdido na fumaça	t.	-
FERRO	Quantidade de FE enforcado	t.	-
FESC	Quantidade de FE na escória	t.	-
FOPERD	Quantidade de fósforo perdido pela fumaça	t.	-
FOSAÇO	Quantidade de fósforo no aço	t.	-
FOSENF	Quantidade de fósforo enforcado	t.	-
FOSES	Quantidade de fósforo na escória	t.	-
GUSOL	Quantidade de gusa sólido enforcado	t.	$Z_i$
GUSA	Quantidade de gusa líquido enforcado	t.	$Z_i$
MGO	Quantidade de MGO enforcado	t.	-
MNAÇO	Quantidade de Mn no aço	t.	-
MNENF	Quantidade de Mn enforcado	t.	-
MNESC	Quantidade de manganês na escória	t.	-
MNPERD	Quantidade de manganês perdido pela fumaça	t.	-
PO2	Quantidade de O <sub>2</sub> consumido	t.	-
REVEST	Consumo de revestimento refratário (MgO)	t.	-
SIAUX	Quantidade de SiO <sub>2</sub> que vai para a escória	t.	-



QUADRO 1(Continuação)  
 Descrição das variáveis do modelo para o balanço de massa

Variável	Descrição	Unidade	Representação no modelo
SIENF	Quantidade total de SiO <sub>2</sub> enornado (SiO <sub>2</sub> + Si)	t.	-
SIESC	Quantidade de silício enornado	t.	-
SILICO	Quantidade de SiO <sub>2</sub> na escória	t.	-
SIOES	Quantidade de SiO <sub>2</sub> enornado	t.	-
SIPERD	Quantidade de SiO <sub>2</sub> perdido pela fumaça	t.	-
TA	Quantidade de sucata de aço recirculada tipo TA enornado	t.	Z <sub>i</sub>
LA	Quantidade de sucata de aço recirculada tipo LA enornado	t.	Z <sub>i</sub>
DP	Quantidade de sucata tipo DP enornado	t.	Z <sub>i</sub>
PE	Quantidade de sucata de aço do tipo PE enornado	t.	Z <sub>i</sub>
LE	Quantidade de sucata de aço do tipo LE enornado	t.	Z <sub>i</sub>
DA	Quantidade de sucata de aço do tipo DA enornado	t.	Z <sub>i</sub>
GP	Quantidade de sucata de gusa interna do tipo GP enornado	t.	Z <sub>i</sub>
VAO <sub>2</sub>	Consumo de O <sub>2</sub> em volume	NM <sup>3</sup>	Z <sub>i</sub>
ENXPERD	Quantidade de enxofre perdido pela fumaça	t.	-
ENXAÇO	Quantidade de enxofre no aço	t.	-
ENXENF	Quantidade de enxofre enornado	t.	-
ENXESC	Quantidade de enxofre na escória	t.	-

TABELA 1  
Composição química das cargas metálicas.

<b>Carga</b>									
<b>Metálica</b>	% Fe	%C	%Mn	%P	%Si	%S	%SiO <sub>2</sub>	%CaO	Outros
Gusa Líquido	94,6	4,0	0,316	0,040	0,448	0,060	-	-	-
Gusa Sólido	94,6	4,0	0,316	0,040	0,448	0,060	-	-	-
PE	99,2	0,150	0,450	0,030	0,150	0,020	-	-	-
LE	99,2	0,150	0,450	0,030	0,150	0,020	-	-	-
DA	99,2	0,150	0,400	0,030	0,150	0,020	-	-	-
TA	85,0	-	2,800	0,480	-	0,030	8,0	-	-
LA	90,0	-	2,800	0,048	-	0,030	8,0	-	-
DP	65,0	-	2,800	0,048	-	0,030	8,0	-	-
GP	85,0	-	2,800	0,048	-	0,060	15,0	-	-

TABELA 2  
Composição química dos fundentes e escorificantes.

<b>Fundentes e Escorificantes</b>	% CAO	%MGO	%Outros
Cal	92	-	8
Calcário	56	-	44
Dolomita Calcinada	55	33	12
Dolomita Crua	33	18	49

Os teores (%) indicados nas tabelas 1 e 2 foram representados nas descrições posteriores com a simbologia  $(X)_i$ , onde X representa o teor do composto químico X na matéria-prima i.

#### 4.2.1.1 Balanço de massa do *INPUT* do forno

A entrada de materiais (em termos de elementos e compostos) no forno foi equalizada da seguinte forma: Seja  $Z_i$  a quantidade de matéria-prima i (em toneladas) efetivamente enforada.

Então teremos para o *INPUT* (Gusa + Sucatas + Fundentes + Escorificantes):

- Balanço de massa para o elemento manganês, sendo  $(MN)_i$  o teor de manganês (%) na matéria-prima i.

$$MNENF = \sum (MN)_i Z_i \quad (4.1)$$

- Balanço de massa para o elemento fósforo, sendo  $(P)_i$  o teor de fósforo (%) na matéria-prima i.

$$FOSENF = \sum (P)_i Z_i \quad (4.2)$$

- Balanço de massa para o elemento silício (na forma de  $SiO_2$ ), sendo  $(SiO_2)_i$  o teor de sílica (%) na matéria-prima i,  $(Si)_i$  o teor de silício (%) na matéria-prima i,  $M_{SiO_2}$  e  $M_{Si}$  as massas molares da  $SiO_2$  e Si respectivamente.

$$SIENF = \sum (SiO_2)_i Z_i + (M_{SiO_2} / M_{Si}) \sum (Si)_i Z_i \quad (4.3)$$

- Balanço de massa para o elemento enxofre, sendo  $(S)_i$  o teor de enxofre (%) na matéria-prima i.

$$\text{ENXENF} = \sum (S)_i Z_i \quad (4.4)$$

- Balanço de massa para o composto MgO, sendo (MgO)<sub>i</sub> o teor de MgO (%) na matéria-prima i.

$$\text{MGO} = \sum (\text{MgO})_i Z_i \quad (4.5)$$

- Balanço de massa para o composto CAO, sendo (CAO)<sub>i</sub> o teor de CAO (%) na matéria-prima i.

$$\text{CAO} = \sum (\text{CAO})_i Z_i \quad (4.6)$$

- Balanço de massa para o elemento carbono, sendo (C)<sub>i</sub> o teor de carbono (%) na matéria-prima i.

$$\text{CARBON} = \sum (\text{C})_i Z_i \quad (4.7)$$

- Balanço de massa para o elemento ferro, sendo (FE)<sub>i</sub> o teor de ferro (%) na matéria-prima i.

$$\text{FERRO} = \sum (\text{FE})_i Z_i \quad (4.8)$$

As matérias-primas acima indicadas, assim como seus teores em termos de composição química, estão indicadas no Quadro 1 e Tabelas 1 e 2.

#### 4.2.1.2 Balanço de massa do *OUTPUT* do forno

Com relação às saídas (*OUTPUT*) de materiais do sistema (em termos de elementos e compostos), estas foram equalizadas considerando que estas saídas são: 1 – Fumaça, 2 – Gás, 3 – Escória, 4 – Aço.

#### 4.2.1.2.1 Fumaça

As perdas de materiais através da fumaça durante o processo de fabricação do aço nos LD's serão consideradas proporcionais às quantidades enforçadas. A Tabela 3 ilustra os parâmetros de proporcionalidades utilizados considerando estimativas e dados operacionais.

TABELA 3  
Parâmetros de proporcionalidades utilizados para estimativas das perdas de materiais através da fumaça.

Composto	Parâmetro	Unidade	Descrição no modelo
Manganês	34,0	%	$a_1$
Fósforo	4,0	%	$a_2$
Silica	10,94	%	$a_3$
Enxofre	0	%	$a_4$
Ferro	6,5	%	$a_5$

Logo, teremos para cada elemento ou composto da Tabela 3, as seguintes estimativas de saídas ou perdas na fumaça do processo:

- Para o manganês:

$$MNPERD = a_1 MNENF \quad (4.9)$$

- Para o fósforo:

$$FOSPERD = a_2 FOSENF \quad (4.10)$$

- Para o silício:

$$SIPERD = a_3 SIENF \quad (4.11)$$

- Para o enxofre:

$$\text{ENXPERD} = a_4 \text{ENXENF} \quad (4.12)$$

➤ Para o ferro

$$\text{FEPERD} = a_5 \text{FERRO} \quad (4.13)$$

Sendo  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$  e  $a_5$  constantes de proporcionalidades indicadas na Tabela 3.

Estes elementos foram considerados porque o estado térmico deles na fumaça é diferente do estado térmico deles durante o enforamento. Já os outros compostos como a Cal, por exemplo, representam a perda antes de serem efetivamente enforados, ou seja, não participam do balanço de massa e térmico.

#### 4.2.1.2.2 Gases

Basicamente o gás do forno LD é composto por CO e CO<sub>2</sub> e, de certa forma, a sua relação (m) reflete o padrão de operação (dados industriais). Sendo assim, conhecido o parâmetro m (aproximadamente 5,7) será possível conhecer esta relação e conseqüentemente a resolução do balanço de massa das equações 4.14 e 4.15. Logo, o carbono enforado será transformado em CO e CO<sub>2</sub> (saídas), de tal forma que:

$$(\text{Volume de CO})/(\text{Volume de CO}_2) = m \quad \text{ou} \quad (\text{CO})/(\text{CO}_2) = m \quad (4.14)$$

$$\text{CARBON} - \text{CAÇO} - \text{CO} - \text{CO}_2 = 0 \quad (4.15)$$

Sendo o Volume de CO e CO em NM<sup>3</sup>.

#### 4.2.1.2.3 Escória

Basicamente a escória é constituída de FeO, MnO, SiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, CaO e MgO. Logo:

$$(1-K) \text{ ESCOR} = (M_{\text{FeO}} / M_{\text{Fe}})\text{FESC} + (M_{\text{MnO}} / M_{\text{Mn}})\text{MNESC} + \text{SILICO} + (M_{\text{P}_2\text{O}_5}/M_{\text{P}_2})\text{FOSES} + \text{CAO} + \text{MGO} \quad (4.16)$$

Sendo K: teor de outros compostos na escória.

$M_x$ : Massa molar do composto x, onde  $x = \{\text{FeO}, \text{Fe}, \text{MnO}, \text{Mn}, \text{P}_2\text{O}_5 \text{ e } \text{P}_2\}$

Para o ajuste do balanço de massa é necessário ainda que sejam estabelecidos os balanços de massa para os elementos Manganês, fósforo, silício e enxofre conforme as equações seguintes:

$$\text{MNENF} - \text{MNAÇO} - \text{MNESC} - \text{MNPERD} = 0 \quad (4.17)$$

$$\text{FOSENF} - \text{FOSAÇO} - \text{FOSES} - \text{FOSPERD} = 0 \quad (4.18)$$

$$\text{SIENF} - \text{SILICO} - \text{SIPERD} = 0 \quad (4.19)$$

$$\text{ENXENF} - \text{ENXAÇO} - \text{ENXESC} - \text{ENXPERD} = 0 \quad (4.20)$$

Algumas considerações devem ser feitas antes do prosseguimento do modelo: - Não se pode estabelecer, a priori, a relação quantitativa dos elementos envolvidos nas reações, pois isso depende, entre outras coisas, do modo com que o processo é operado. Por essa razão será admitido que os teores dos elementos no aço e na escória sejam controláveis separadamente, embora se saiba que a composição da escória influencia a do aço e vice-versa. Uma forma de amenizar isso é restringir a presença de alguns elementos na escória em função de uma dada

composição do aço. Tais restrições seriam obtidas estatisticamente e através da experiência adquirida pelos aciaristas.

$$\text{Min} \leq (\text{ESCOR}/\text{AÇO}) \leq \text{Max} \quad (4.21)$$

$$\text{Min} \leq (\text{FESC}/\text{ESCOR}) \leq \text{Max} \quad (4.22)$$

$$\text{Min} \leq (\text{SILICO}/\text{ESCOR}) \leq \text{Max} \quad (4.23)$$

$$\text{Min} \leq (\text{MNESC}/\text{ESCOR}) \leq \text{Max} \quad (4.24)$$

$$\text{Min} \leq (\text{MGO}/\text{ESCOR}) \leq \text{Max} \quad (4.25)$$

$$\text{Min} \leq (\text{CaO}/\text{SiO}_2) \leq \text{Max} \quad (4.26)$$

$$\text{Min} \leq (\text{CaO} + \text{MGO})/(\text{SiO}_2) \leq \text{Max} \quad (4.27)$$

#### 4.2.1.2.4 Aço

O aço líquido é composto basicamente por Fe e C com pequenos teores de Mn, P e S. Além disso, existem em torno de 5 kg de O<sub>2</sub> em cada tonelada de aço líquido, logo:

$$0,995 \text{ AÇO} = \text{FEAÇO} + \text{CAÇO} + \text{MNAÇO} + \text{FOSAÇO} + \text{ENXAÇO} \quad (4.28)$$

#### 4.2.1.2.5 Considerações operacionais



Além do balanço de massa das entradas e saídas, existem restrições operacionais ligadas aos equipamentos de carregamento das matérias-primas (enfornamento) que devem ser estabelecidos. No caso das cargas sólidas a restrição é sobre os equipamentos ponte rolante e canaleta de sucatas, já com relação a carga líquida a restrição é sobre a ponte rolante e panela de gusa líquido.

- A carga sólida (sucatas + gusa sólido) é carregada em canaletas metálicas que possui um limite de capacidade dada pela seguinte restrição:

$$\sum (SUCATAS + GUSOL) \leq \text{Capacidade da canaleta metálica} \quad (4.29)$$

- A carga líquida também possui um limite que é o limite da panela de carregamento de gusa e da ponte de carregamento:

$$GUSA \leq \text{Capacidade da panela de carregamento de gusa líquido} \quad (4.30)$$

A princípio, as disponibilidades das matérias-primas podem participar das restrições, porém elas não estão sendo consideradas.

## 4.2.2 Balanço térmico do forno (Etapa C)

### 4.2.2.1 Considerações iniciais

Para a estruturação do balanço térmico, assim como foi feito para de massa, é necessário a criação e definição de variáveis e dos parâmetros do sistema relativos ao balanço de energia. O Quadro 2 apresenta estas variáveis (de entrada e de saída), suas definições e unidades respectivas que serão utilizadas no modelo.

QUADRO 2  
Descrição das variáveis do modelo para o balanço térmico

Variável	Descrição	Unidade
CALG	Entalpia do gusa líquido	kcal/t.
CALS	Calor de formação de $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$	kcal/t.
CALS1	Calor de formação de $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ a partir de Si	kcal/t.
CALS2	Calor de formação de $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ a partir de $\text{SiO}_2$	Kcal/t.
CALP	Calor de formação de $\text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8$	Kcal/t.
CALM	Calor de formação de MnO na escória	Kcal/t.
CALF	Calor de formação de FeO na escória	Kcal/t.
CALCO	Calor de formação de CO	Kcal/t.
CALCO2	Calor de formação do $\text{CO}_2$	Kcal/t.
CALPO	Calor de formação do $\text{P}_2\text{O}_5$	Kcal/t.
CALFEP	Calor de formação do FeO na fumaça	Kcal/t.
CALMP	Calor de formação de MnO na fumaça	Kcal/t.
CALFOR	Calor fornecido	Kcal/t.
ENTAÇO	Entalpia do aço	Kcal/t.
ENTES	Entalpia da escória	Kcal/t.
ENTGAS	Entalpia do gás	Kcal/t.
ENTFUM	Entalpia da fumaça	Kcal/t.

O balanço térmico, ou melhor, de energia, foi feito considerando o princípio da conservação de energia, ou seja, a energia térmica contida na entrada das matérias-primas (entalpias) somadas com a energia gerada nas diversas reações exotérmicas será igual à energia consumida nas reações endotérmicas somadas com a energia consumidas pelas diversas matérias-primas de um estado inicial até o estado final térmico e pelas perdas térmicas.

O Quadro 3 traz um resumo do balanço térmico com as considerações das entradas e saídas de energia do sistema em estudo, no caso, o convertedor LD.

QUADRO 3  
Balanço térmico do forno

CALOR FORNECIDO (INPUT)	CONSUMO DE CALOR (OUTPUT)
Entalpia do gusa líquido	Entalpia do aço
Calor de formação da escória	Entalpia da escória
Calor de formação de gás	Entalpia do gás
Calor de formação da fumaça	Entalpia da fumaça
	Perdas

Como considerado para o balanço de massa, aqui também optamos por dividir o modelamento térmico para facilitar a compreensão das diversas etapas.

#### 4.2.2.2 **INPUT** de energia

##### 4.2.2.2.1 Entalpia do gusa líquido (CALG)

A entalpia, ou melhor, calor contido no gusa líquido pode ser estimada a partir da equação 4.31 seguinte. Esta equação foi obtida de tabelas de dados termodinâmicos.

$$\text{➤ } \text{CALG} = [70 + 0,165 \cdot (T_{\text{gusa}} - 25)] \cdot \text{GUSA} \quad (4.31)$$

Onde:  $T_{\text{gusa}}$  é a temperatura do gusa líquido enornado em °C

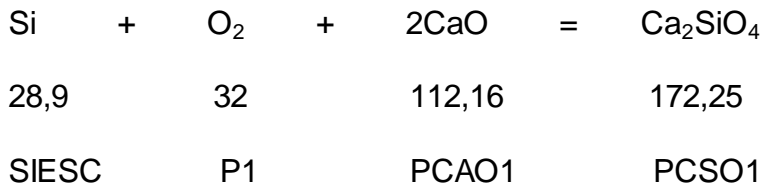
GUSA é a quantidade de gusa líquido enornado em toneladas

##### 4.2.2.2.2 Entalpia de formação da escória (ENTES)

Na escória da aciaria LD o CaO reage com  $\text{SiO}_2$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$  formando silicatos ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ) e fosfatos ( $\text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8$ ) com grande liberação de calor. Mn e Fe também são oxidados. Apenas MgO oriundo da Cal e do revestimento interno dos refratários do forno compõe a escória de forma neutra.

o **Formação de  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  (CALS)**

**Si** pode entrar no forno em 2 formas ( $\text{Si}$  ou  $\text{SiO}_2$ ), logo a partir da estequiometria de reação do silício no forno teremos para **Si**:



$$\text{➤ PCSO1} = (172,25 / 28,09) * \text{SIESC} \quad (4.32)$$

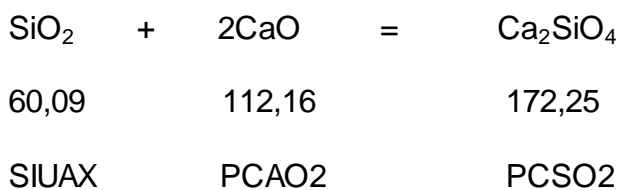
$$\text{➤ P1} = (32 / 28,09) * \text{SIESC} \quad (4.33)$$

$$\text{➤ PCAO1} = (112,16 / 28,09) * \text{SIESC} \quad (4.34)$$

$$\text{➤ CALS1} = \text{PCSO1} * (\Delta H_{298})_{\text{Ca}_2\text{SiO}_4} * (1 / 172,25) - \text{PCAO1} * (\Delta H_{298})_{\text{Ca}} * (1/56,08) \quad (4.35)$$

$$\text{➤ CALS1} = 8835,9 * \text{SIESC} \quad (4.36)$$

Para **Si** na forma de  $\text{SiO}_2$ , teremos:



$$\text{➤ PCSO2} = (172,25 / 60,09) * \text{SIAUX} \quad (4.37)$$

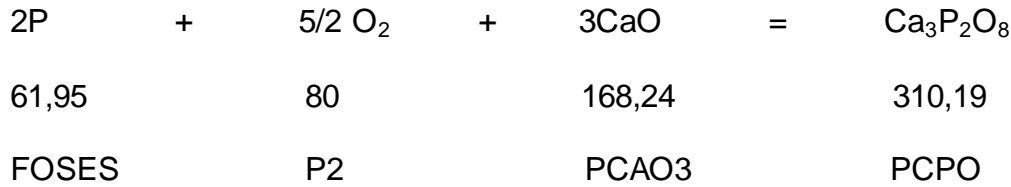
$$\text{➤ PCAO2} = (112,16 / 60,09) * \text{SIAUX} \quad (4.38)$$

$$\text{➤ CALS2} = \text{PCSO2} * (\Delta H_{298})_{\text{Ca}_2\text{SiO}_4} * (1 / 172,25) - \text{PCAO2} * (\Delta H_{298})_{\text{CaO}} * (1 / 56,08) - \text{SIAUX} * (\Delta H_{298})_{\text{SiO}_2} * (1 / 60,09) \quad (4.39)$$

$$\text{➤ CALS2} = 639,9 * \text{SIAUX} \quad (4.40)$$

o **Formação de  $\text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8$  (CALP)**

Uma das formas de entendimento da formação de  $\text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8$  seria a seguinte:



$$\text{➤ } PCPO = (310,19 / 61,95) * FOSES \quad (4.41)$$

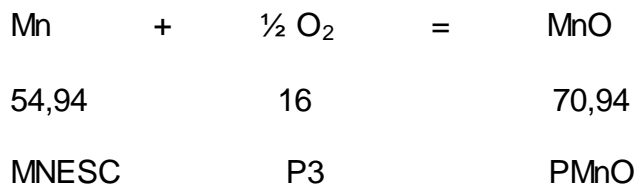
$$\text{➤ } PCAO3 = (168,24 / 61,95) * FOSES \quad (4.42)$$

$$\text{➤ } P2 = (80 / 61,95) * FOSES \quad (4.43)$$

$$\text{➤ } CALP = PCPO * (\Delta H_{298})_{Ca_3P_2O_8} * (1 / 310,19) - PCAO3 * (\Delta H_{298})_{CaO} * (1/56,09) \quad (4.44)$$

$$\text{➤ } CALP = 8577,9 * FOSES \quad (4.45)$$

○ **Formação de MnO (CALM)**



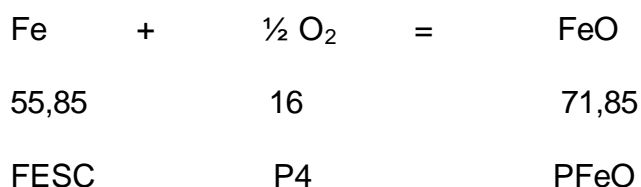
$$\text{➤ } PMnO = (70,94 / 54,94) * MNESC \quad (4.46)$$

$$\text{➤ } P3 = (16 / 54,94) * MNESC \quad (4.47)$$

$$\text{➤ } CALM = PMNO * (\Delta H_{298})_{MnO} * (1 / 70,94) \quad (4.48)$$

$$\text{➤ } CALM = 1675,5 * MNESC \quad (4.49)$$

○ **Formação de FeO (CALF)**



$$\text{➤ } PFeO = (71,85 / 55,85) * FESC \quad (4.50)$$

$$\text{➤ } P4 = (16 / 55,85) * FESC \quad (4.51)$$

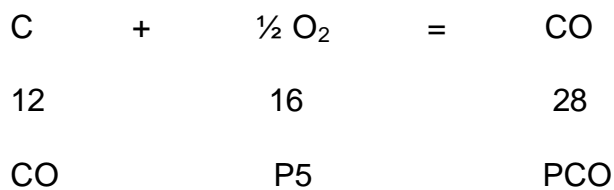
$$\text{➤ } CALF = PFeO * (\Delta H_{298})_{FeO} * (1 / 71,85) \quad (4.52)$$

$$\text{➤ CALF} = 1136,9 \text{ FESC} \quad (4.53)$$

#### 4.2.2.2.3 Entalpia de formação dos gases (ENTGAS)

Considerando que os gases formados são essencialmente CO e CO<sub>2</sub>, Logo teremos a partir da estequiometria das reações de formação destes gases:

##### ○ Formação de CO (CALCO)



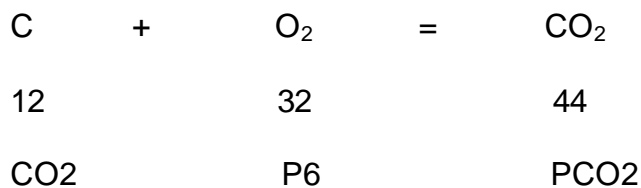
$$\text{➤ PCO} = (28 / 12) * \text{CO} \quad (4.54)$$

$$\text{➤ P5} = (16 / 12) * \text{CO} \quad (4.55)$$

$$\text{➤ CALCO} = \text{PCO} * (\Delta H_{298})_{\text{CO}} * (1 / 28) \quad (4.56)$$

$$\text{➤ CALCO} = 2201,3 * \text{CO} \quad (4.57)$$

##### ○ Formação de CO<sub>2</sub> (CALCO<sub>2</sub>)



$$\text{➤ PCO}_2 = (44 / 12) * \text{CO}_2 \quad (4.58)$$

$$\text{➤ P6} = (32 / 12) * \text{CO}_2 \quad (4.59)$$

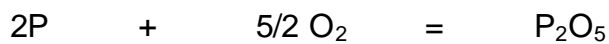
$$\text{➤ CALCO}_2 = \text{PCO}_2 * (\Delta H_{298})_{\text{CO}_2} * (1 / 44) \quad (4.60)$$

$$\text{➤ CALCO}_2 = 7837,7 * \text{CO}_2 \quad (4.61)$$

#### 4.2.2.2.4 Entalpia de formação da fumaça (ENTFUM)

Entre os elementos que compõem a fumaça os de interesse para o balanço térmico são  $P_2O_5$ ,  $FeO$ ,  $MnO$  e  $SiO_2$ . Será suposto que  $SiO_2$  da fumaça provém do  $SiO_2$  enfiado, portanto sem sofrer a oxidação.

##### ○ Formação de $P_2O_5$ (CALPO)



$$61,95 \quad \quad \quad 80 \quad \quad \quad 141,95$$



$$\text{➤ } PP_2O_5 = (141,95 / 61,95) * FOPERD \quad (4.62)$$

$$\text{➤ } P7 = (80 / 61,95) * FOPERD \quad (4.63)$$

$$\text{➤ } CALPO = PP_2O_5 * (\Delta H_{298})_{P_2O_5} * (1 / 141,95) \quad (4.64)$$

$$\text{➤ } CALPO = 5676,3 * FOPERD \quad (4.65)$$

##### ○ Formação de $FeO$ (CALFEP)

Repetindo o raciocínio anterior, mas agora para o ferro:

$$\text{➤ } P8 = (16 / 55,85) * FEPERD \quad (4.66)$$

$$\text{➤ } CALFEP = 1136,9 * FEPERD \quad (4.67)$$

##### ○ Formação de $MnO$ (CALMP)

Similarmente para o manganês:

$$\text{➤ } P9 = (16 / 54,94) * MNPERD \quad (4.68)$$

$$\text{➤ } CALMP = 1675,4 * MNPERD \quad (4.69)$$

#### 4.2.2.2.5 Energia total fornecida ao sistema (*INPUT*)

Logo, o calor total fornecido será:

$$\begin{aligned} \text{➤ } \mathbf{CALFOR} = & \text{CALG} + \text{CALS1} + \text{CALS2} + \text{CALP} + \text{CALM} + \text{CALF} + \text{CALCO} + \\ & \text{CALCO2} + \text{CALPO} + \text{CALFEP} + \text{CALMP} \end{aligned} \quad (4.70)$$

Substituindo as expressões determinadas nas seções anteriores relativas ao *INPUT* de energia na equação 4.70, teremos:

$$\begin{aligned} \text{➤ } \mathbf{CALFOR} = & \text{CALG} + 8835,9 * \text{SIESC} + 639,9 * \text{SIAUX} + 8577,9 * \text{FOSES} + \\ & 1675,5 * \text{MNESC} + 1136,9 * \text{FESC} + 2201,3 * \text{CO} + 7837,7 * \text{CO2} + 5676,3 * \\ & \text{FOPERD} + 1136,9 * \text{FEPERD} + 1675,4 * \text{MNPERD} \end{aligned} \quad (4.71)$$

#### 4.2.2.3 *OUTPUT* de energia

Com relação às saídas de energia do sistema (*OUTPUT*)

##### 4.2.2.3.1 Entalpia do aço (*ENTACO*)

A entalpia, ou melhor, calor contido no aço líquido pode ser estimado a partir da equação 4.72 seguinte. Esta equação foi obtida de tabelas de dados termodinâmicos.



$$\text{ENTACO} = (-1435 + 10,55 * T_a) * (1 / 55,85) * \text{ACO} \quad (4.72)$$

$T_a$ : Temperatura do aço em K

ACO: Quantidade de aço líquido em t.

#### 4.2.2.3.2 Entalpia da escória (ENTES)

Na escória é necessário um excesso de CaO para mante-la fluída e básica para proteger o revestimento refratário interno contra o ataque de  $\text{SiO}_2$  e garantir as reações com as impurezas do gusa e da sucata. Logo:

$$\text{CAO} - \text{PCAO1} - \text{PCAO2} - \text{PCAO3} > 0 \quad (4.73)$$

$$\text{CAO} - 3,99288 * \text{SIESC} - 1,86653 * \text{SIAUX} - 2,71574 * \text{FOSES} - \text{CAOES} = 0 \quad (4.74)$$

Ou

$$\text{CAO} - 3,99288 * \text{SIESC} - 1,86653 * \text{SIAUX} - 2,71574 * \text{FOSES} - \text{CAOES} = 0 \quad (4.75)$$

$$\begin{aligned} \text{ENTES} = & [(H_{Te} - H_{298})_{\text{Ca}_2\text{SiO}_4} * (1 / 172,25) * (\text{PCSO1} + \text{PCSO2}) + (H_{Te} - \\ & H_{298})_{\text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8} * (1 / 310,19) * \text{PCPO} + (H_{Te} - H_{298})_{\text{MnO}} * (1 / 70,94) * \text{PMnO} + \\ & (H_{Te} - H_{298})_{\text{FeO}} * (1 / 71,85) * \text{PFeO} + (H_{Te} - H_{298})_{\text{CaO}} * (1 / 56,08) * \text{CAOES} + \\ & (H_{Te} - H_{298})_{\text{MgO}} * (1 / 40,32) * \text{MGO}] \quad (4.76) \end{aligned}$$

Onde:  $T_e$  é a temperatura da escória do forno LD em K

#### 4.2.2.3.3 Entalpia dos gases (ENTGAS)

A partir dos valores de geração de CO e CO<sub>2</sub> calculados anteriormente podemos estimar a energia nestes gases utilizando a equação 4.77 seguinte.

$$\text{ENTGAS} = (H_{Tg} - H_{298})_{CO} * (1 / 28) * PCO + (H_{Tg} - H_{298})_{CO2} * (1 / 44) * PCO2$$

(4.77)

Onde: Tg é a temperatura do gás no forno LD em K

#### 4.2.2.3.4 Entalpia da fumaça (ENTFUM)

$$\text{ENTFUM} = (H_{Tf} - H_{298})_{SiO2} * (1 / 60,09) * SIPERD + (H_{Tf} - H_{298})_{P2O5} * (1 / 141,95) * PP2O5 + (H_{Tf} - H_{298})_{FeO} * (1 / 55,85) * FEPERD + (H_{Tf} - H_{298})_{MnO} * (1 / 54,94) * MNPERD$$

(4.78)

Onde: Tf é a temperatura da fumaça em K

#### 4.2.2.3.5 Perda Térmica

O fechamento do balanço térmico é realizado computando as perdas térmicas ocorridas no forno, de forma que as entradas de energia sejam iguais as saídas de energia do sistema, Logo:

$$\text{➤ Perda Térmica} = \text{CALFOR} - \text{ENTACO} - \text{ENTES} - \text{ENTGAS} - \text{ENTFUM}$$

(4.79)

Diversos autores quantificam esta perda em torno de 4% a 6%, dependendo do tipo de sucatas enforadas e estado do revestimento interno do forno. Últimas considerações antes da construção do modelo propriamente dito. Para o cálculo da quantidade de oxigênio a ser utilizado teremos:

#### 4.2.2.4 Considerações finais

##### 4.2.2.4.1 Considerações relativas ao consumo de oxigênio

Todas as reações ocorridas no forno são decorrentes, direta ou indiretamente da oxidação dos elementos e compostos das cargas metálicas, fundentes e ecorificantes pelo oxigênio soprado no forno. Logo o consumo deste pode ser assim estimado:

**Consumo de O<sub>2</sub>** = Oxidação do aço + Oxidação da escória + Formação da fumaça  
+ Formação do gás

$$\text{➤ PO}_2 = 0,005 * \text{ACO} + \sum \text{Pi} \quad (4.80)$$

$$\text{➤ VAO}_2 = (22,4 / 32) * \text{PO}_2 * 10^3 \quad (\text{NM}^3) \quad (4.81)$$

Onde Pi: é o consumo de oxigênio relativo a oxidação dos elementos e compostos das cargas do forno indicados pelas estequiometrias dos balanços de massa e térmico do convertedor LD.

#### 4.2.2.4.2 Considerações relativas às matérias-primas utilizadas no modelo

Foram utilizadas como matéria-prima dos fornos as seguintes cargas metálicas: 1- Gusa Líquido, Gusa Sólido, Sucata de Aço (PE, LE e DA), Sucata Tipo A (TA, LA e DP) e Sucata Tipo B (GP). Além disso, outros materiais como fundentes e escorificantes são utilizados nos fornos, a saber: 1-Cal, 2-Calcário, 3-Dolomita Calcinada, 4-Dolomita Crua.

Todos os dados referentes à composição química destas matérias-primas estão indicadas nas Tabelas 1 e 2 indicadas nas seções anteriores.

#### 4.2.2.4.3 Considerações relativas à escória

Outra restrição importante considerável é com relação ao peso de escória formada durante o processo. Estes valores geralmente são estimados considerando sua proporção em relação ao peso de aço produzido. Este valor, segundo estudos fica entre os seguintes limites:  $0,045 \leq \text{Peso da Escória} / \text{Peso do Aço} \leq 0,1$ , sendo sua composição típica média de acordo com a TABELA 4.

TABELA 4  
Composição química típica da escória.

<b>Compostos</b>	<b>% FeO</b>	<b>%SiO<sub>2</sub></b>	<b>%CaO</b>	<b>%MnO</b>	<b>%MgO</b>
Min	18,8	10,3	39,9	2,7	8,2
Máx	21,1	11,0	42,2	2,9	8,7

Os demais pesos dos outros compostos da escória como,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  etc. foram estimados em 4,5% da escória. A basicidade da escória foi estimada entre os limites:  $2,8 \leq [(\text{CaO}+\text{MgO}) / (\text{SiO}_2)] \leq 3,2$ .

#### **4.2.2.4.4 Considerações relativas ao aço líquido a ser produzido**

Como composição padrão para o aço líquido a ser produzido, o modelo considerou inicialmente, os valores de 0,2% de Mn, 0,018% de P e 0,08% de C. Esta composição é uma composição típica média dos aços produzidos. Porém, esta variável pode ser facilmente alterada de acordo com as características de cada planta operacional.

#### **4.2.2.4.5 Considerações relativas aos custos unitários**

A tabela 5 ilustra os valores dos custos unitários para as diversas matérias-primas considerados no modelo. Uma consideração importante é sobre a confidencialidade dos custos da empresa. Sendo estes valores não passíveis de serem divulgados, adotou-se para efeito de análise o uso de valores não reais da empresa. Porém, para que a análise pudesse ser utilizada para efeito real, adotou-se uma parametrização onde foram mantidas as diferenças relativas entre os preços,

somente mudando os valores absolutos. Assim, a análise pôde ser extrapolada para a realidade operacional.

**TABELA 5**  
Valores adotados para custos unitários das matérias – primas.

<b>Matéria-Prima</b>	<b>Descrição</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Gusa Líquido	GUSLIQ	397,19	R\$/t
Gusa Sólido	GUSOL	470,05	R\$/t
PE	PE	277,04	R\$/t
LE	LE	277,04	R\$/t
DA	DA	315,04	R\$/t
TA	TA	273,65	R\$/t
LA	LA	273,65	R\$/t
DP	DP	8,24	R\$/t
GP	GP	361,31	R\$/t
Cal	CAL	198,61	R\$/t
Calcário	CALCAR	48,73	R\$/t.
Dolomita Crua	DOLCRUA	51,73	R\$/t.
Dolomita Calcinada	DOLCAL	201,56	R\$/t
O <sub>2</sub>	VAO <sub>2</sub>	0,09	R\$/NM <sup>3</sup>

#### **4.2.2.4.6 Outras considerações**

Com relação ao carregamento foram consideradas as seguintes restrições:

1. Capacidade máxima da panela de gusa líquido = 165 t.
2. Capacidade máxima da canaleta de sucata = 40 t.

Já com relação às temperaturas envolvidas e tomadas como referência, foram tomados os seguintes valores:

1. Temperatura do gusa líquido: 1350 °C = 1623 K
2. Temperatura do aço líquido: 1670 °C = 1943 K
3. Temperatura da escória: 1710 °C = 1983 K
4. Temperatura do gás: 1620 °C = 1893 K
5. Temperatura da fumaça: 1620 °C = 1893 K

#### 4.2.3 Definição da função objetivo e das restrições (modelo matemático) (Etapa D)

A partir de toda a fundamentação metalúrgica e operacional descrita nas seções anteriores o modelo matemático pode ser assim descrito:

- **Função Objetivo**: minimização dos custos

$$\text{➤ Minimizar} = \sum C_i Z_i \quad (4.81)$$

Onde:

$C_i$  = custo por tonelada da matéria-prima  $i$

$Z_i$  = quantidade de matéria-prima  $i$

Sendo os custos ( $C_i$ ) e as matérias-primas ( $Z_i$ ) indicados na Tabela 5. O conjunto domínio das variáveis é o dos números reais maiores ou iguais a zero.

Uma forma mais prática de visualização da função objetivo descrita acima é a seguinte:

➤ **Minimizar** =  $397,19 * GUSLIQ + 470,05 * GUSOL + 277,04 * PE + 277,04 * LE + 315,04 * DA + 273,65 * TA + 273,65 * LA + 8,24 * DP + 361,31 * GP + 198,61 * CAL + 48,73 * CALCAR + 201,56 * DOLCAL + 51,73 * DOLCRUA + 0,09 * VAO2$

- **Sujeito as seguintes restrições:** (Todas as variáveis e parâmetros abaixo indicados são descritos nos Quadros 1 e 2, Tabelas 1, 2, 3 e 4)

- Restrições relativas ao balanço de massa (INPUT de materiais) – Seção 4.3.1.1

I.  $0,003 * GUSLIQ + 0,0045 * PE + 0,0045 * LE + 0,004 * DA + 0,028 * TA + 0,028 * LA + 0,028 * DP + 0,028 * GP + 0,009 * GUSOL - MNENF = 0$   
(4.82)

II.  $0,0005 * GUSLIQ + 0,0003 * PE + 0,0003 * LE + 0,0003 * DA + 0,0048 * TA + 0,0048 * LA + 0,0048 * DP + 0,0048 * GP + 0,0015 * GUSOL - FOSENF = 0$   
(4.83)

III.  $0,003 * GUSLIQ + 0,0015 * PE + 0,0015 * LE + 0,0015 * DA + 0,008 * GUSOL - SIESC = 0$  (4.84)

IV.  $0,08 * TA + 0,08 * LA + 0,08 * DP + 0,1506 * GP + 0,0146 * CAL - SIOES = 0$   
(4.85)

V.  $2,1392 * SIESC + SIOES - SIENF = 0$  (4.86)

VI.  $0,33 * DOLCAL + 0,18 * DOLCRUA - MGO = 0$  (4.87)



$$\text{VII. } 0,92 * \text{CAL} + 0,56 * \text{CALCAR} + 0,55 * \text{DOLCAL} + 0,33 * \text{DOLCRUA} - \text{CAO} = 0$$

(4.88)

$$\text{VIII. } 0,04 * \text{GUSLIQ} + 0,0015 * \text{PE} + 0,0015 * \text{LE} + 0,0015 * \text{DA} + 0,038 * \text{GUSOL} - \text{CARBON} = 0$$

(4.89)

$$\text{IX. } 0,946 * \text{GUSLIQ} + 0,992 * \text{PE} + 0,992 * \text{LE} + 0,992 * \text{DA} + 0,85 * \text{TA} + 0,90 * \text{LA} + 0,65 * \text{DP} + 0,85 * \text{GP} + 0,946 * \text{GUSOL} - \text{FERRO} = 0$$

(4.90)

$$\text{X. } 0,0006 * \text{GUSLIQ} + 0,0002 * \text{PE} + 0,0002 * \text{LE} + 0,0002 * \text{DA} + 0,0003 * \text{TA} + 0,0003 * \text{LA} + 0,0003 * \text{DP} + 0,0006 * \text{GP} + 0,0006 * \text{GUSOL} - 0,01 * \text{CAL} - \text{ENXENF} = 0$$

(4.91)

○ Restrições relativas ao balanço de massa (OUTPUT de materiais) – Seção 4.3.1.2

$$\text{XI. } \text{MNPERD} - 0,3417 * \text{MNENF} = 0$$

(4.92)

$$\text{XII. } \text{FOPERD} - 0,0393 * \text{FOSENF} = 0$$

(4.93)

$$\text{XIII. } \text{SIPERD} - 0,1664 * \text{SIENF} = 0$$

(4.94)

$$\text{XIV. } \text{FEPERD} - 0,0135 * \text{FERRO} = 0$$

(4.95)

$$\text{XV. } \text{ENXPERD} - 0,01 * \text{ENXENF} = 0$$

(4.96)

$$\text{XVI. } \text{FEACO} + \text{CACO} + \text{MNACO} + \text{FOSACO} + \text{ENXACO} - 0,995 * \text{ACO} = 0$$

(4.97)

$$\text{XVII. } \text{MNACO} - 0,002 * \text{ACO} = 0$$

(4.98)

$$\text{XVIII. } \text{FOSACO} - 0,00018 * \text{ACO} = 0$$

(4.99)

$$\text{XIX. } \text{CACO} - 0,0008 * \text{ACO} = 0$$

(4.100)

$$\text{XX. } \text{ENXACO} - \text{ENXENF} + \text{ENXPERD} + \text{ENXESC} = 0$$

(4.101)

$$\text{XXI. } \text{ENXESC} = 0$$

(4.102)

- XXII.  $1,3485 * FESC + 1,3535 * MNESC + 1,0482 * SILICO + 2,4019 * FOSES +$   
 $1,0482 * CAO + 1,0482 * MGO - 0,95 * ESCOR = 0$  (4.103)
- XXIII.  $MNENF - MNACO - MNPERD - MNESC = 0$  (4.104)
- XXIV.  $FOSENF - FOSACO - FOPERD - FOSES = 0$  (4.105)
- XXV.  $SIENF - SIPERD - SILICO = 0$  (4.106)
- XXVI.  $SIOES - SIPERD - SIAUX = 0$  (4.107)
- XXVII.  $FERRO - FESC - FEPERD - FEACO = 0$  (4.108)
- XXVIII.  $ESCOR - 0,085 * ACO \geq 0$  (4.109)
- XXIX.  $-ESCOR + 0,1 * ACO \geq 0$  (4.110)
- XXX.  $FESC - 0,09313 * ESCOR \geq 0$  (4.111)
- XXXI.  $-FESC + 0,21059 * ESCOR \geq 0$  (4.112)
- XXXII.  $SILICO - 0,1369 * ESCOR \geq 0$  (4.113)
- XXXIII.  $-SILICO + 0,2157 * ESCOR \geq 0$  (4.114)
- XXXIV.  $MNESC - 0,0271 * ESCOR \geq 0$  (4.115)
- XXXV.  $-MNESC + 0,0712 * ESCOR \geq 0$  (4.116)
- XXXVI.  $MGO - 0,03 * ESCOR \geq 0$  (4.117)
- XXXVII.  $-MGO + 0,09 * ESCOR \geq 0$  (4.118)
- XXXVIII.  $CAO + MGO - 2,8 * SILICO \geq 0$  (4.119)
- XXXIX.  $-CAO - MGO + 3,2 * SILICO \geq 0$  (4.120)
- XL.  $CO - 5,7 * CO2 = 0$  (4.121)
- XLI.  $CARBON - CO - CO2 - CACO = 0$  (4.122)
- XLII.  $PE + LE + DA + TA + LA + DP + GP + GUSOL - SUCENF = 0$   
(4.123)

- Restrições relativas às capacidades dos equipamentos e restrições operacionais

XLIII.	$SUCENF - CALHA \leq 0$	(4.124)
XLIV.	$CALHA \leq 40$	(4.125)
XLV.	$GUSLIQ - CAPPAN \leq 0$	(4.126)
XLVI.	$CAPPAN \leq 160$	(4.127)
XLVII.	$PE + LE + DA + TA + LA + DP + GP + GUSOL + GUSLIQ \leq CAPPAN + CALHA$ (4.128)	
XLVIII.	$0,25 * ACO - SUCENF \geq 0$	(4.129)
XLIX.	$GUSA - 0,8 * ACO \geq 0$	(4.130)
L.	$-GUSA + 1,135 * ACO \geq 0$	(4.131)
LI.	$TA + DP + LA - 0,31 * SUCENF \leq 0$	(4.132)
LII.	$DP + LA - 0,207 * SUCENF \leq 0$	(4.133)
LIII.	$DP - 0,1034 * SUCENF \leq 0$	(4.134)
LIV.	$PE - 0,1 * LE = 0$	(4.135)

- Restrições relativas ao balanço térmico do forno (INPUT de Energia) –  
Seção 4.3.2.2.5

LV.	$288,625 * GUSA + 8835,9 * SIESC + 639,9 * SIAUX + 8577,9 * FOSSES + 1675,5 * MNESC + 1136,9 * FESC + 2201,3 * CO + 7837,7 * CO2 + 5676,3 * FOPERD + 1136,9 * FEOPERD + 1675,4 * MNPERD - CALFOR = 0$ (4.136)
-----	---

- Restrições relativas ao balanço térmico do forno (OUTPUT de Energia) –  
Seção 4.3.2.3

LVI.  $CAO - 3,9929 * SIESC - 1,8665 * SIAUX - 2,7157 * FOSES - CAOES = 0$   
(4.137)

LVII.  $1315,6 * SILICO + 2263,2 * FOSES + 404,4 * MNESC + 568,7 * FESC +$   
 $383,8 * CAOES + 501,4 * MGO - ENTES = 0$  (4.138)

LVIII.  $1035,8 * CO + 1655,9 * CO2 - ENTGAS = 0$  (4.139)

LIX.  $437,6 * SIPERD + 1071,5 * FOPERD + 531,0 * FEPPERD + 373,7 * MNPERD$   
 $- ENTFUM = 0$  (4.140)

- Restrições relativas ao fechamento do balanço térmico e às perdas  
térmicas (INPUT = OUTPUT) – Seção 4.3.2.3.5

LX.  $CALFOR - 341,34 * ACO - ENTES - ENTGAS - ENTFUM - CALPERD = 0$   
(4.141)

LXI.  $CALPERD - 0,06 * CALFOR < 0$  (4.142)

LXII.  $- CALPERD + 0,04 * CALFOR < 0$  (4.143)

- Restrição relativa ao consumo total de oxigênio para as diversas reações  
químicas do sistema - Seção 4.3.2.4.1

LXIII.  $3,5 * ACO + 797,3 * SIESC + 203,7 * MNESC + 203,7 * MNPERD + 200,2 *$   
 $FESC + 200,2 * FEPPERD + 933,1 * CO + 1866,9 * CO2 + 903,7 * FOSES +$   
 $903,7 * FOPERD - VAO_2 = 0$  (4.144)

Uma consideração final a respeito da descrição do modelo no formato acima, e não na forma de somatórios, foi devido à ênfase no detalhamento e obtenção dos valores específicos dos parâmetros do forno LD.

## 5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Para a análise dos resultados do modelo de otimização do carregamento dos convertedores, em termos de resultados de custo e validação dos resultados, foram testados alguns cenários em termos de quantidades e tipos de matérias-primas carregadas, pois o objetivo principal desta monografia é a construção do modelo em si, e não, a análise de inúmeros cenários possíveis. Os cenários e as diferentes condições de planejamento virão no decorrer do dia a dia operacional. Neste caso pode-se dividir a análise em dois grupos, a saber: 1-Grupo das cargas metálicas e 2-Grupo de fundentes e escorificantes.

As instâncias consideradas para os experimentos computacionais ditos anteriormente foram de utilizar os valores médios, em termos de composição química das cargas metálicas, fundentes e escorificantes, assim como um valor médio de composição química do aço produzido. Estes valores médios foram baseados em valores utilizados pela usina em condições normais de operação.

Outra consideração importante é a de que, devido à condição de confidencialidade de dados e informações relativos aos preços das matérias-primas, os dados relativos aos preços não são os valores reais praticados pela Usiminas, porém para que as análises sejam válidas e possam ser extrapoladas para as condições reais da fábrica em termos de direcionamento das decisões e respostas, foram mantidas as proporcionalidades entre os preços das matérias-primas.

A implementação do modelo foi feita via ferramenta de otimização (*Software LINGO*).

## 5.1 Avaliação das cargas metálicas.

A avaliação das cargas metálicas considerou principalmente os percentuais de carga sólida carregadas e os tipos de sucatas enforçadas.

### 5.1.1 Variação do custo em função dos percentuais de carga sólida (sucatas) carregadas.

A quantidade de carga sólida, em termos percentuais da carga metálica total carregada, foi avaliada com relação ao seu impacto no custo total da carga metálica por tonelada de aço líquido produzido. A FIG.8 ilustra os resultados do modelo.

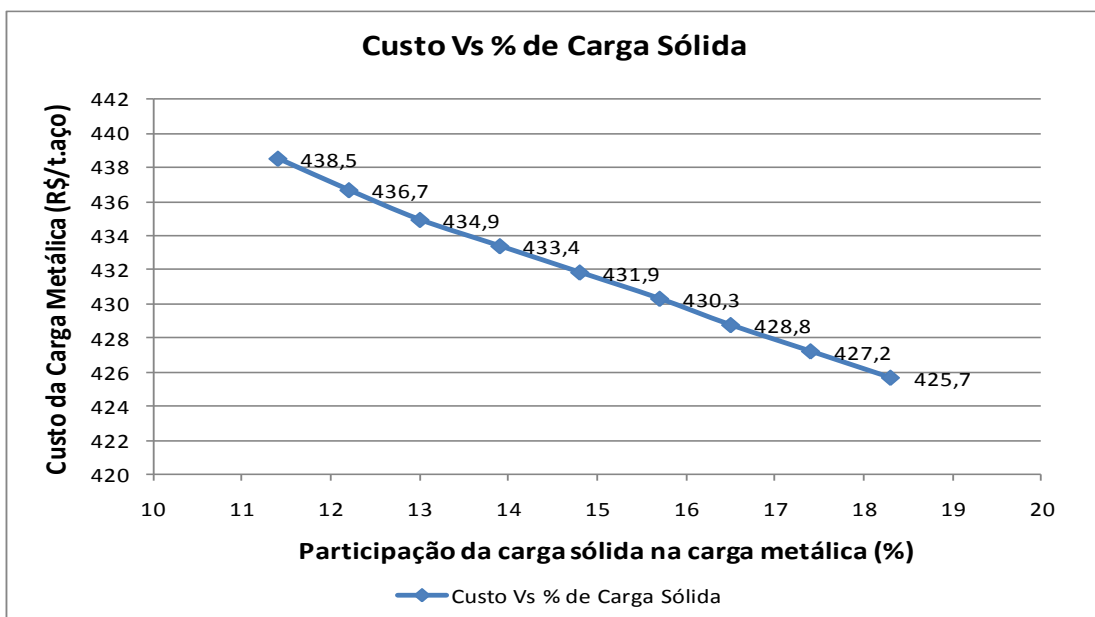


FIG 8 Impacto do % de carga sólida no custo de produção do aço líquido.

Os resultados acima evidenciam que, com os preços atuais praticados na compra das diversas sucatas juntamente com os preços praticados das sucatas

aproveitadas internamente, levam ao uso da maior quantidade possível de carga sólida em relação à carga metálica total carregada nos LD's. As faixas consideradas na avaliação acima da participação da carga sólida (11 a 19%) foram devidas ao que se considera em termos de condições normais de processo. Ou seja, dentro destas faixas as premissas metalúrgicas adotadas no modelo podem ser tomadas com grande probabilidade de sucesso.

### 5.1.2 Análise do custo reduzido para algumas cargas metálicas.

A análise do custo reduzido dos resultados da FIG.8 pode ser vista na FIG. 9. O custo reduzido representa o quanto eu devo pagar para a introdução de uma unidade da variável em análise. Ou melhor, o quanto eu deveria reduzir no meu lucro com a introdução de uma unidade da variável.

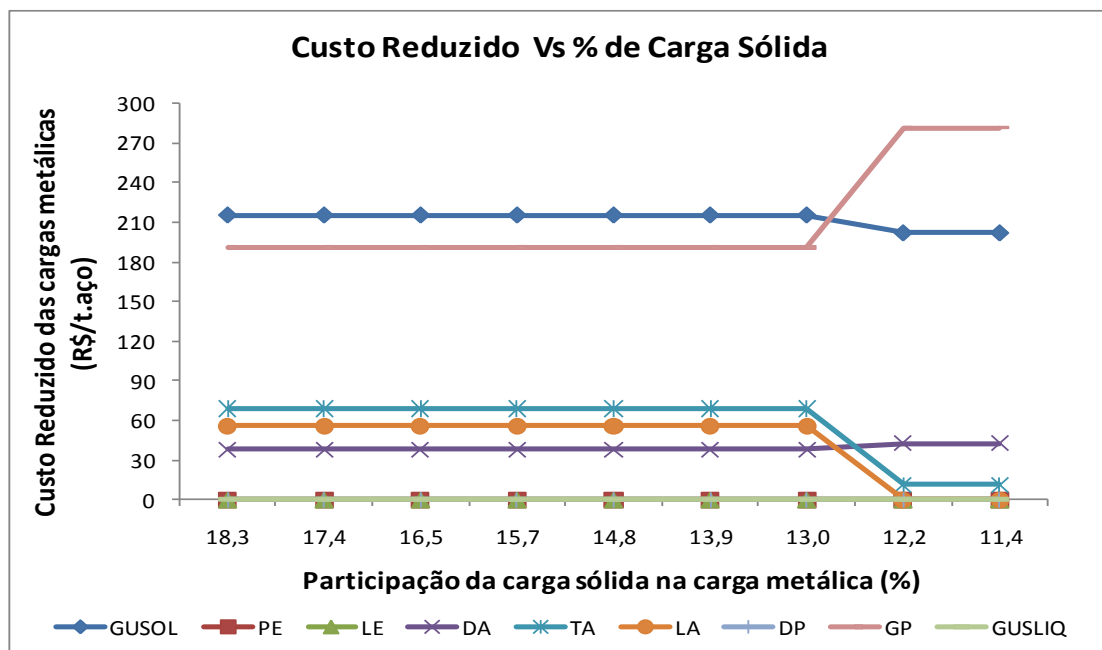


FIG 9 Custo reduzido das diversas cargas metálicas.

A FIG.9 mostra que para as matérias-primas sucata pesada (PE), sucata leve (LE) e gusa Líquido (GUSLIQ) o custo reduzido é zero em toda a faixa analisada. Isto significa que, com os preços e composições químicas atuais destes materiais, a tendência é que as decisões sejam no intuito de aumentar as quantidades utilizadas destas cargas metálicas em detrimento das demais. Obviamente, de acordo com a FIG.8 o uso do gusa líquido deve ser reduzido quando comparado com as sucatas leve (LE) e pesada (PE).

Outro fato interessante é com relação ao uso da sucata DA. Esta possui características químicas similares as sucatas PE e LE, porém por ser uma sucata comprada no mercado (as sucatas PE e LE são reaproveitamento interno na usina) possui preço maior do que suas similares. Isto nos leva a dizer que o uso interno das sucatas de aço (PE e LE) geradas nos diversos processos de fabricação do aço devem ser otimizadas em relação à compra de DA no mercado.

Com relação às sucatas TA e LA, observa-se um custo reduzido intermediário. Estas sucatas possuem custo menor do que as sucatas PE e LE, porém o teor em ferro (Fe) é menor também. Isso faz com que no balanço final haja uma tendência, para os níveis de preço praticados atualmente, que o modelo escolha a utilização de sucatas com maiores teores de ferro e com um custo (preço) um pouco maior. Neste caso a introdução das sucatas TA e LA penalizariam o custo final com seus respectivos custos reduzidos indicados na FIG.9.

Fato interessante é o custo reduzido da sucata DP (zero). Isto é explicado devido ao seu baixo custo (preço) em relação às demais cargas metálicas, mesmo contendo um menor teor de ferro é aconselhável a sua utilização (dentro das restrições metalúrgicas utilizadas no modelo).



Já o gusa sólido (GUSOL) e a sucata GP apresentam os maiores custos reduzidos. No primeiro caso o fator custo (preço) de aquisição desta matéria prima praticamente inviabiliza o seu uso. No segundo caso, os fatores custo (preço) e teor de ferro (baixo) tornam a sua utilização impraticável no momento.

Fato interessante é a mudança nos custos reduzidos de algumas cargas metálicas a partir da utilização de 12,2 % de carga sólida na carga metálica. Este parece ser um patamar a partir do qual há uma mudança entre os balanços de ferro e custo (preço) das matérias primas.

## **5.2 Avaliação dos fundentes e escorificantes**

A avaliação da quantidade e dos tipos de fundentes e escorificantes foram feitas baseadas principalmente com relação aos percentuais de silício do gusa líquido carregado, já que esse elemento é o principal fator que determina as quantidades a serem carregadas destas matérias-primas.

### **5.2.1 Variação do custo em função do silício do gusa líquido e dos fundentes e escorificantes carregados.**

Com relação aos fundentes e escorificantes carregados, estes materiais possuem finalidades diferentes no forno. Enquanto as cargas metálicas tem por objetivo transformar-se em aço, os fundentes e escorificantes possuem a função de

absorver os diversos compostos não metálicos formados e as impurezas como o elemento químico fósforo. Este processo se dá por meio da formação da escória do forno. No caso foram considerados quatro tipos de fundentes: 1-Dolomita calcinada (DOLCAL), 2-Dolomita Crua (DOLCRUA), 3-Calcário (CALCAR) e Cal. Além disso, o teor de silício do gusa é o fator principal que determina as quantidades de fundentes e escorificantes carregados, além é claro de ser o elemento químico que mais impacta no balanço térmico do forno.

A FIG.10 ilustra o impacto no custo em função dos teores de silício do gusa líquido carregado.

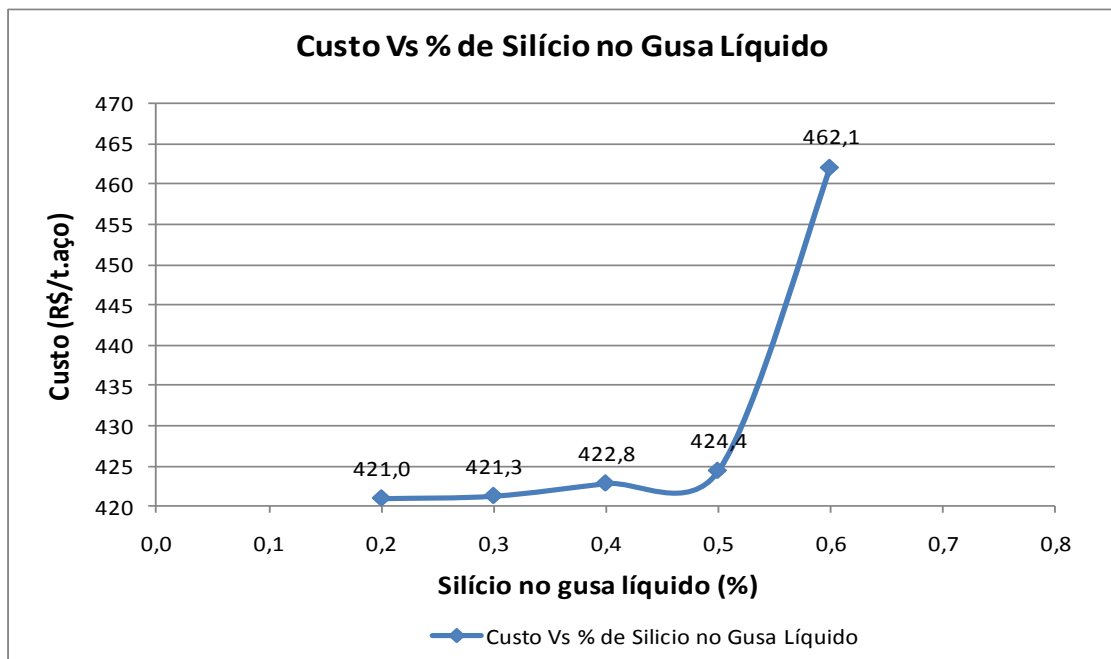


FIG 10 Influência do % de silício do gusa no custo.

A FIG.10 ilustra a previsão da evolução dos custos do carregamento em função dos percentuais de silício na carga. À medida que o silício aumenta é necessária uma quantidade cada vez maior dos fundentes e escorificantes carregados para manter uma basicidade visada do forno. Além disso, o gráfico acima revela o grande impacto para valores de silício do gusa líquido acima de 0,5%.

### 5.2.2 Análise do custo reduzido dos fundentes e escorificantes.

A análise do custo reduzido revela os altos valores de penalidade, ou melhor, de custo a ser pago pela introdução dos fundentes Cal e Dolomita Calcinada FIG.11.

A escolha pelos fundentes e escorificantes Calcário e Dolomita Crua se deve, principalmente, pelos baixos custos (preços) destes insumos. Uma análise detalhada da FIG. 11 revela também que o custo (preço) máximo a ser pago para a utilização da Cal e Dolomita Calcinada seriam, para as faixas de silício do gusa mencionadas no item anterior, em torno de 50% menores ao valores praticados atualmente. Média dos custos da Cal e Dolomita Calcinada (aproximadamente R\$ 200/t.) e custos reduzidos ao redor de R\$ 100/t.

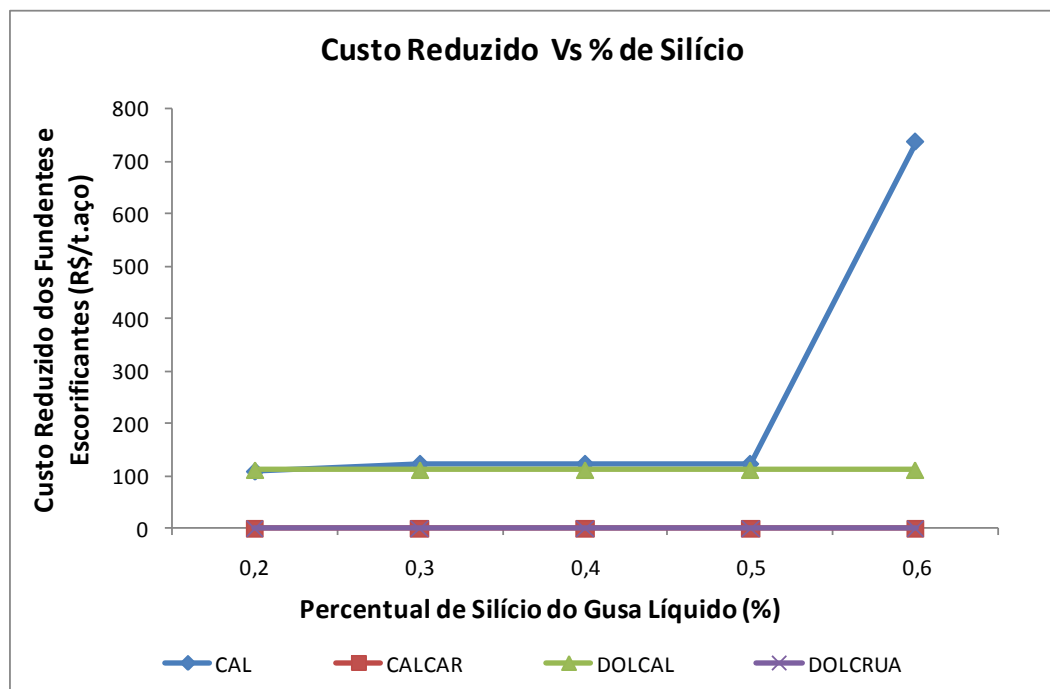


FIG 11 Custo reduzido dos fundentes e escorificantes.

### 5.3 Avaliação dos limites de perda térmica possíveis

A avaliação dos limites impostos à perda térmica é de extrema importância para o modelo. Durante o balanço térmico do forno é necessário estimar quais são os percentuais a serem considerados, em relação ao *IMPUT* de energia, que serão destinados às perdas para o refratário do forno e para o meio ambiente. Segundo alguns autores, estes valores ficam entre 4% e 6%. O modelo teve como premissa essa hipótese, porém sabe-se que à medida que o refratário vai se desgastando as perdas tendem a aumentar. Logo no final da campanha (vida) do refratário dos fornos provavelmente estas perdas serão maiores.

O modelo é capaz de fazer estes ajustes e limitar as quantidades de cargas sólidas a serem carregadas em função do aumento destas perdas, já que neste caso a energia disponível para fundir a carga será menor à medida que a vida do forno se prolonga. A FIG. 12 ilustra o impacto do aumento das perdas térmicas em termos de restrição de aumento do % de carga sólida a ser enforcada.

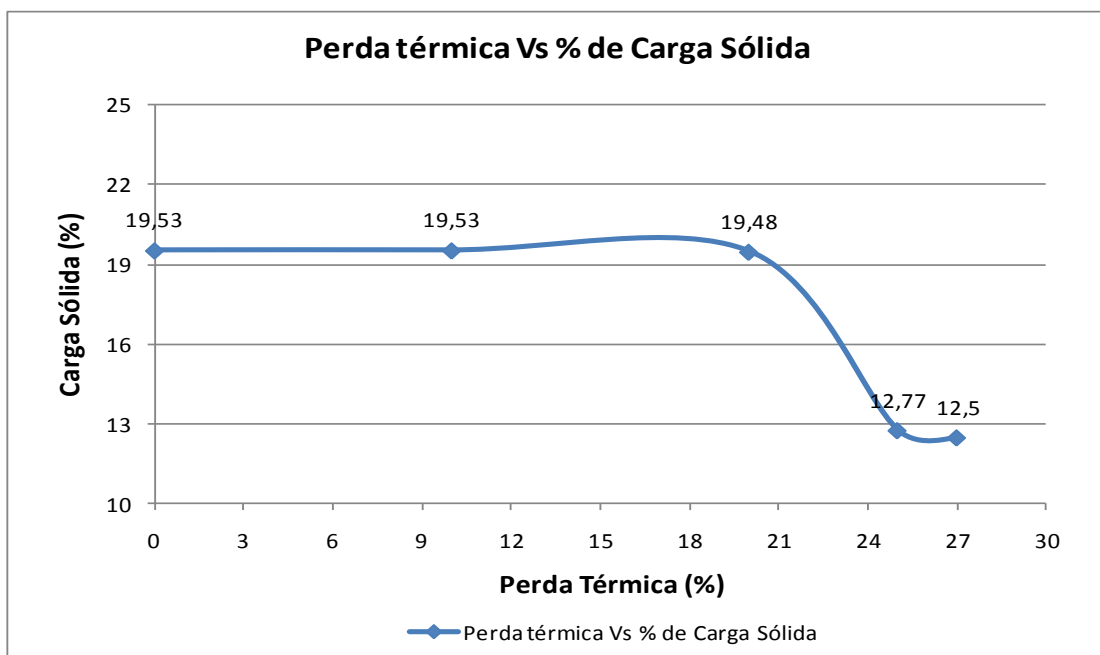


FIG 12 Impacto da perda térmica no % de carga sólida enforcada.

A FIG. 12 revela exatamente o esperado. O aumento das perdas provoca limitações nas quantidades a serem enforadas de carga sólida. Além disso, como o custo estava sendo reduzido a medida que aumentava-se a carga sólida, espera-se que com o aumento da perda térmica este custo seja aumentado.

Outra análise relevante é com relação ao ponto de 21% de perda térmica estimado. A partir daí os valores de carga sólida possíveis de serem enforados são extremamente reduzidos e, aos 27% de perda térmica chega-se a uma espécie de limite térmico para o forno.

Obviamente estes limites são funções da temperatura e do silício do gusa. Mudando-se estes parâmetros as análises acima também mudarão.

## 6 CONCLUSÕES

Foi possível construir um modelo de otimização, utilizando o software LINGO, que é capaz de otimizar em termos de custo mínimo as diversas matérias-primas enformadas nos fornos LD da Usiminas. A otimização é fundamentada não somente pelos custos (preços) das matérias-primas, mas pelas restrições metalúrgicas, térmicas e físicas do sistema.

Através deste modelo é possível prever e testar vários cenários de carregamento dos fornos em função de diversos cenários de preços, composição e disponibilidade de matérias-primas.

Algumas conclusões previstas pela realidade atual dos preços e composições direcionam o planejamento a aumentar as chamadas cargas metálicas sólidas (sucatas) em detrimento do gusa líquido fabricado internamente. Além disso, verifica-se o impacto que o aumento percentual de elementos como o silício do gusa causam nos custos de carregamento destes fornos, principalmente em termos de consumo de fundentes e escorificantes.

Importante consideração que não foi discutida neste modelo é o da contabilização dos subprodutos que são gerados no forno LD e que são vendidos no mercado gerando uma receita extra à empresa. A maior geração destes compostos apesar de afetar os rendimentos do forno deve ser convertida em valores de receita (abatimento no custo) do modelo previsto.

## 7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como o objetivo deste trabalho foi o de construir um modelo que pudesse otimizar o carregamento dos fornos LD e não o de testar os inúmeros cenários de carregamento e condições metalúrgicas, não foram desenvolvidos os inúmeros cenários possíveis de carregamento e de restrições de processo. Portanto, sugere-se a realização destes testes.

Sugere-se também a contabilização dos valores dos subprodutos gerados neste forno e que são vendidos no mercado gerando receita extra à empresa.

Outro trabalho relevante e que complementaria o modelo aqui proposto seria o de desenvolver um modelo para as áreas de redução e integralo ao modelo do LD de forma que o custo do gusa líquido seja otimizado juntamente com o do aço líquido do LD. Assim teríamos o carregamento do LD integrado ao dos altos-fornos de forma a obter a melhor condição de custos das matérias-primas das áreas de redução e aciaria.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-SHAMMARI, M., & DAWOOD, I. **LINEAR PROGRAMMING APPLIED TO A PRODUCTION BLENDING PROBLEM**: a spreadsheet modeling approach. *Production and Inventory Management*, v.38, p. 1–7. 1997.
- ARAÚJO, L. A. **MANUAL DE SIDERURGIA**. 2ª Edição, Brasil: Editora Arte e Ciência, 2009. Vol.1.
- ASHAYERI, J., VAN EIJS, A. G. M., & NEDERSTIGT, P. **BLENDING MODELLING IN A PROCESS MANUFACTURING**: a case study. *European Journal of Operational Research*, v.72, p. 460–468. 1994.
- BARÃO, C. D. et. al. **ACIARIA A OXIGÊNIO**. Brasil, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Curso intitulado Aciaria a Oxigênio, 2011.
- BAI, E. W. **Minimizing Energy Cost in Electric Arc Furnace Steel Making by Optimal Control Designs**. In: *Journal of Energy*, Hindawi Publishing Corporation, IOWA, U.S, p.1-9, 2014.
- BLISS, N. G. **ADVANCES IN SCRAP CHARGE OPTIMIZATION**. *American Foundrymen's Society Transactions*, v.105, p. 27–30. 1997.
- BUEHLMANN, U., RAGSDALE, C. T., & GFELLER B. **A SPREADSHEET-BASED DECISION SUPPORT SYSTEM FOR WOOD PANEL MANUFACTURING**. *Decision Support Systems*, v. 29, p. 207–227. 2000.
- CHAVES, A. J. M. **AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO OPERACIONAL DE UM CONVERTEDOR LD ATRAVÉS DO DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE SOPRO COM LANÇA DE QUATRO FUIROS**. 2006. 123 f. Dissertação (mestrado) – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- CHERÉM, P. **BALANÇO DE MASSA E TÉRMICO DE UMA CORRIDA LD**, Publicação interna CSBM, João Monlevade, 1980.
- CHIAVERINI, V. **AÇOS E FERROS FUNDIDOS**. 7ª Edição. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005. 599 p.
- CHO, D. S. **OTIMIZAÇÃO DOS PROCESSOS SINTERIZAÇÃO, ALTO FORNO, ACIARIA LD ATRAVÉS DA PROGRAMAÇÃO LINEAR**. 1982. Dissertação (mestrado) – Departamento de Engenharia elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1982.
- FABIAN, T. **A LINEAR PROGRAMMING MODEL OF INTEGRATED IRON AND STEEL PRODUCTION**. *Management Science*. v. 4, p. 415-449. 1958.
- FABIAN, T. **BLAST FURNACE PRODUCTION PLANNING - A LINEAR PROGRAMMING EXAMPLE**. *Management Science*. v. 14, p.1-27. 1967.



GERASIMENKO, I. P. et al. **Calculation of the Heat Losses from an Oxygen Converter in the Optimization of Smelting.** Steel in Translation, v. 42, n 4, p. 285–289. 2012.

KIM, J.; LEWIS, R. L. **A LARGE SCALE LINEAR PROGRAMMING APPLICATION TO LEAST COST CHARGING FOR FOUNDRY MELTING OPERATIONS.** Transactions of the American Foundrymen's Society, 95, p. 735–744. 1987.

JUNIOR, P. A. M. **TEORETICAL AND COMPUTATION ISSUES FOR IMPROVING THE PERFORMANCE OF LINEAR OPTIMIZATION METHODS.** 2013. 119 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação – USP, São Carlos. 2013.

LOGUNOVA, O. S., & PAVLOV, V. V. (2014). **STABILIZING THE RESIDUAL CONTENTS OF ELEMENTS IN STEEL BY USING ALTERNATIVE MATERIALS IN THE METALLIC CHARGE OF AN ARC STEELMAKING FURNACE.** Metallurgist. New York, Vol. 58, n. 3–4, p. 299 – 305, July. 2014.

MAIA, B. T. **EFEITO DA CONFIGURAÇÃO DO BICO DA LANÇA NA INTERAÇÃO JATO-BANHO METÁLICO EM CONVERTEDOR LD.** 2007. Dissertação (mestrado) – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

MALYNOWSKYJ, A. Altura:19.05cm. Largura:14.14cm. 1 desenho, color. Figura apresentada no Curso de Fabricação de Aço em Forno Básico a Oxigênio. 2004.

MAZZUCCO, M. M. **Introdução aos Balanços de Massa e Energia.** Notas de Aula. 111 p., Universidade do Sul de Santa Catarina, 2013.

MOURÃO, M. B. et al. **Introdução à Siderurgia.** Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. ABM. São Paulo, 2007.

MUNDIM, M. J., Introdução. In:ETRUSCO, G. S. P., SIGWALT, J. F. G., MUNDIM, M. J., CHAVES, C. A., Curso sobre Aciaria LD. São Paulo. Associação Brasileira de Metais, 1991, Cap. 1.

Prado, D. S. do. **Programação Linear.** 6ª Ed. Nova Lima (MG), 2012. 232p.

SANTOLIN, R.C. et al. **Minimização do custo do tarugo de aço produzido em uma indústria siderúrgica por meio da otimização da carga metálica do forno elétrico.** In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2010, SÃO CARLOS, SP.

SAKALLI, U. S., & BIRGÖREN, B. **A SPREADSHEET-BASED DECISION SUPPORT TOOL FOR BLENDING PROBLEMS IN BRASS CASTING INDUSTRY.** Computers & Industrial Engineering, 56, p. 724–735. 2009.

SUTHERLAND, J. W.; HAAPALA, K.R. **Optimization of Steel Production to Improve Lifecycle Environmental Performance.** In: Annals of the CIRP, Vol. 56/1/2007.

TASZNER, O. Grega. **OPTIMIZATION OF SCRAP CHARGE IN TERMS OF IMPURITY REQUIREMENTS OF PRODUCED STEEL.** In: 7th International Conference on Clean Steel, Balatonfüred, Hungary, p .1-9. 2007.

SAKALLI, U. S., BAYKOÇ, O. F. & BIRGOREN, B. **STOCHASTIC OPTIMIZATION FOR BLENDING PROBLEM IN BRASS CASTING INDUSTRY ANN OPER RES** 186:141–157. 2011.

YU, J.A. et al. **STUDY OF THE MATERIALS AND ENERGY CONDITION OF USING FOUR FURNACE CHARGES IN EAF STEELMAKING PROCESS – BEIJING KEJI DAXUE XUEBAO.** J. Univ. Sci. Technol. Beijing, v. 31, p. 80–83. 2009.

## APÊNDICE I – FORMA DO MODELO IMPLEMENTADO NO SOFTWARE LINGO

```

!Modelo de Otimização do Carregamento dos Conversores LD
MIN 397.19GUSLIQ + 470.05GUSOL + 277.04PE + 277.04LE + 315.04DA + 273.65TA
+ 273.65LA + 8.24DP + 361.31GP + 198.61CAL + 48.73CALCAR + 201.56DOLCAL +
51.73DOLCRUA + 0.09VAO2
st
0.00316GUSLIQ + 0.0045PE + 0.0045LE + 0.004DA + 0.028TA + 0.028LA + 0.028DP
+ 0.028GP + 0.009GUSOL - MNENF = 0
0.0004GUSLIQ + 0.0003PE + 0.0003LE + 0.0003DA + 0.0048TA + 0.0048LA +
0.0048DP + 0.0048GP + 0.0015GUSOL - FOSENF = 0
0.00448GUSLIQ + 0.0015PE + 0.0015LE + 0.0015DA + 0.008GUSOL - SIESC = 0
0.08TA + 0.08LA + 0.08DP + 0.1506GP + 0.0146CAL - SIOES = 0
2.1392SIESC + SIOES - SIENF = 0
0.33DOLCAL + 0.18DOLCRUA - MGO = 0
0.92CAL + 0.56CALCAR + 0.55DOLCAL + 0.33DOLCRUA - CAO = 0
0.04GUSLIQ + 0.0015PE + 0.0015LE + 0.0015DA + 0.04GUSOL - CARBON = 0
0.946GUSLIQ + 0.992PE + 0.992LE + 0.992DA + 0.85TA + 0.90LA + 0.65DP +
0.85GP + 0.946GUSOL - FERRO = 0
0.0006GUSLIQ + 0.0002PE + 0.0002LE + 0.0002DA + 0.0003TA + 0.0003LA +
0.0003DP + 0.0006GP + 0.0006GUSOL + 0.01CAL - ENXENF = 0
MNPERD - 0.3417MNENF = 0
FOPERD - 0.0393FOSENF = 0
SIPERD - 0.1064SIENF = 0
FEPERD - 0.065FERRO = 0
ENXPERD - 0.01ENXENF = 0
FEACO + CACO + MNACO + FOSACO + ENXACO - 0.995ACO = 0
MNACO - 0.001ACO = 0
FOSACO - 0.00018ACO = 0
CACO - 0.0008ACO = 0
ENXACO - ENXENF + ENXPERD + ENXESC = 0
ENXESC = 0
1.3485FESC + 1.3535MNEESC + 1.0482SILICO + 2.4019FOSES + 1.0482CAO +
1.0482MGO - 0.95ESCOR = 0
MNENF - MNACO - MNPERD - MNEESC = 0
FOSENF - FOSACO - FOPERD - FOSES = 0
SIENF - SIPERD - SILICO = 0
SIOES - SIPERD - SIAUX = 0
FERRO - FESC - FEPERD - FEACO = 0
ESCOR - 0.045ACO > 0
-ESCOR + 0.1ACO > 0
FESC - 0.09313ESCOR > 0
-FESC + 0.21059ESCOR > 0
SILICO - 0.1369ESCOR > 0
-SILICO + 0.157ESCOR > 0
MNEESC - 0.0271ESCOR > 0
-MNEESC + 0.0712ESCOR > 0
MGO - 0.03ESCOR > 0
-MGO + 0.09ESCOR > 0
CAO + MGO - 2.8SILICO > 0
-CAO - MGO + 4.2SILICO > 0
CO - 5.7CO2 = 0
CARBON - CO - CO2 - CACO = 0
PE + LE + DA + TA + LA + DP + GP + GUSOL - SUCENF = 0
SUCENF - CALHA < 0

```

```
CALHA = 40
GUSLIQ - CAPPAN < 0
CAPPAN = 165
0.22ACO - SUCENF > 0
GUSLIQ + PE + LE + DA + TA + LA + DP + GP + GUSOL < 205
GUSLIQ - 0.8ACO > 0
-GUSLIQ + 1.135ACO > 0
TA + DP + LA - 0.31SUCENF < 0
DP + LA - 0.207SUCENF < 0
DP - 0.1034SUCENF < 0
PE - 0.1LE = 0
288.625GUSLIQ + 8835.9SIESC + 639.9SIAUX + 8577.9FOSES + 1675.5MNESEC +
1136.9FESC + 2201.3CO + 7837.7CO2 + 5676.3FOPERD + 1136.9FEPERD +
1675.4MNPERD - CALFOR = 0
CAO - 3.9929SIESC - 1.8665SIAUX - 2.7157FOSES - CAOES = 0
1315.6SILICO + 2263.2FOSES + 404.4MNESEC + 568.7FESC + 383.8CAOES + 501.4MGO
- ENTES = 0
1035.8CO + 1655.9CO2 - ENTGAS = 0
437.6SIPERD + 1071.5FOPERD + 531.0FEPERD + 373.7MNPERD - ENTFUM = 0
CALFOR - 341.34ACO - ENTES - ENTGAS - ENTFUN - CALPERD = 0
CALPERD - 0.06CALFOR < 0
-CALPERD + 0.04CALFOR < 0
3.5ACO + 797.3SIESC + 203.7MNESEC + 203.7MNPERD + 200.2FESC + 200.2FEPERD +
933.1CO + 1866.9CO2 + 903.7FOSES + 903.7FOPERD - VAO2 = 0
ACO = 165
end
```