

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais –  
PPGE3M

Modelos de Eficiência Metálica, Carregamento e Otimização de Composição  
Química para Ligas Ferrosas em Fundições

**Tiago Moura Kohmann**

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2015

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais –  
PPGE3M

MODELOS DE EFICIÊNCIA METÁLICA, CARREGAMENTO E OTIMIZAÇÃO  
DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA PARA LIGAS FERROSAS EM FUNDIÇÕES

Tiago Moura Kohmann

Trabalho realizado no Laboratório de Siderurgia do Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa / Tecnologia Mineral.

Orientador: Prof. Dr. Ing. Antônio Cezar Faria Vilela

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Wagner Bielefeldt – LASID/DEMET/PPGE3M/UFRGS

Prof. Dr. Carlos R. Frick Ferreira – CT/EE/UFRGS

Prof. Dr. Vinícius Karlinski de Barcellos – LAFUN/DEMET/PPGE3M/UFRGS

Porto Alegre

2015

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	5
LISTA DE TABELAS .....	8
LISTA DE SÍMBOLOS .....	9
RESUMO .....	11
ABSTRACT .....	12
1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVOS.....	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1. Cenário da Fundição Mundial e no Brasil .....	16
3.2. Relevância Econômica das Sucatas como Matérias-Primas.....	18
3.3. Tipos de Modelos Numéricos .....	19
3.4. Tipos de Otimização.....	19
3.5. Modelos para Planejamento de Produção.....	21
3.6. Modelos para Produção no Forno .....	23
3.7. Modelos de Controle de Qualidade.....	29
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
4.1. Processo de Fundição .....	30
4.2. Modelos Numéricos.....	32
4.2.1. Rendimento Metálico .....	33
4.2.2. Carregamento .....	35
4.2.3. Otimização da Composição .....	37

4.3.2.	Fluxogramas de Resolução .....	40
4.4.	Aços e Ferro-Fundido Produzidos .....	46
4.5.	Matérias-Primas e Insumos.....	46
4.6.	Custos Relativos das Matérias-Primas .....	48
4.7.	Coleta das Amostras de Escórias .....	48
4.8.	Metodologia de Validação .....	50
4.8.1.	Coleta dos Dados para Validação .....	50
4.8.2.	Modelo de Rendimento Metálico .....	58
4.8.3.	Modelo de Carregamento .....	58
4.8.4.	Modelo de Otimização.....	59
4.8.5.	Avaliação das Ligas SAE 1030 e FeCr18% .....	59
5.	Resultados e Discussão .....	60
5.1.	Modelo de Eficiência Metálica .....	60
5.2.	Modelo de Carregamento .....	62
5.3.	Modelo de Otimização .....	77
5.4.	Avaliação das Ligas SAE 1030 e FeCr18%.....	82
6.	CONCLUSÕES .....	90
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	92
9.	APÊNDICE .....	95

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Crescimento da indústria de fundição entre 2004 e 2014 no Brasil. Fonte: Anuário Abifa 2015.....	16
Figura 2 - Fluxograma de uma fundição. Fonte: BALLESTÍN, MALLOR e MATEO, 2012 (modificado). .....	22
Figura 3 – Exemplo de redes neurais utilizadas na otimização de corridas. Fonte: WEI-PING, QUAN e CHUN, 2009 (modificado). .....	25
Figura 4 – Exemplo de função de filiação retangular $\mu_x$ da variável $x$ com limites inferior e superior iguais a $a$ e $b$ , respectivamente. Fonte: ZIÓLKOWSKI e WRONA, 2007. ....	26
Figura 5 – Relação entre uma função de filiação possibilística $fAx$ com valores $(a, a, a)$ e uma probabilística $px$ com Média $\beta$ . Fonte: RONG e LAHDELMA, 2008 (modificado). .....	27
Figura 6 – Composição final resultante da soma de várias composições probabilísticas. Fonte: SAKALLI e BAYKOÇ, 2011 (modificado). .....	28
Figura 7 - Fluxograma do processo de fundição. ....	30
Figura 8 – Fluxograma do forno.....	31
Figura 9 – Fluxograma para resolução do modelo de carregamento.....	40
Figura 10 - Fluxograma de resolução para o modelo de otimização.....	41
Figura 11 – Custos Relativos de cada matéria-prima. ....	48
Figura 12 – Transformação Granulométrica das Amostras de Escória. ....	49
Figura 13 - Cargas do carregamento (sucatas) das 82 corridas da liga 0030. ....	51
Figura 14 - Cargas do carregamento (adições) das 82 corridas da liga 0030. ....	51
Figura 15 - Cargas da otimização para as 82 corridas da liga 0030. ....	52
Figura 16 - Custo relativo por kg das cargas das 82 corridas da liga 0030. ....	52
Figura 17 - Composições químicas do carbono prevista e esperada, após o carregamento e após a otimização para as 82 corridas da liga 0030. ....	53
Figura 18 - Composições químicas do silício prevista e esperada, após o carregamento e após a otimização para as 82 corridas da liga 0030. ....	53
Figura 19 - Composições químicas do manganês prevista e esperada, após o carregamento e após a otimização para as 82 corridas da liga 0030. ....	54
Figura 20 - Cargas do carregamento (sucatas) das 13 corridas da liga SAE 1045. ....	55
Figura 21 - Cargas do carregamento (adições) das 13 corridas da liga SAE 1045. ....	55
Figura 22 - Cargas da Otimização para as 13 corridas da liga SAE 1045. ....	56
Figura 23 - Custo Relativo por kg das Cargas das 13 Corridas da Liga SAE 1045. ....	56
Figura 24 - Composições químicas do carbono prevista e esperada, após o carregamento e após a otimização para as 13 corridas da liga SAE 1045. ....	57
Figura 25 - Composições químicas do silício prevista e esperada, após o carregamento e após a otimização para as 13 corridas da liga SAE 1045. ....	57
Figura 26 - Composições químicas do manganês prevista e esperada, após o carregamento e após a otimização para as 13 corridas da liga SAE 1045. ....	58
Figura 27 - Média das Eficiências Metálicas Mínimas e Máximas de cada Elemento para a Liga SAE 1030M. ....	60
Figura 28 - Média das Eficiências Metálicas Mínimas e Máximas de cada Elemento para a Liga SAE 1045. ....	61
Figura 29 – Resultados do modelo de carregamento para as cargas das sucatas das 82 corridas da liga 0030. ....	62

Figura 30 – Resultados do modelo de carregamento para as cargas das adições das 82 corridas da liga 0030.....	62
Figura 31 – Resultados do modelo de carregamento para o custo relativo das cargas para as 82 corridas da liga 0030. ....	63
Figura 32 – Resultados do modelo de carregamento para as cargas das sucatas das 13 corridas da liga SAE 1045. ....	63
Figura 33 – Resultados do modelo de carregamento para as cargas das adições das 13 corridas da liga SAE 1045. ....	64
Figura 34 – Resultados do modelo de carregamento para o custo relativo das cargas para as 13 corridas da liga SAE 1045.....	64
Figura 35 - Composições químicas resultantes do modelo para o Carbono, na liga 0030 .....	66
Figura 36 - Composições químicas resultantes do modelo para o Silício, na liga 0030	66
Figura 37 - Composições químicas resultantes do modelo para o Manganês, na liga 0030 .....	67
Figura 38 - Composições químicas resultantes do modelo para o Carbono, na liga SAE 1045 .....	67
Figura 39 - Composições químicas resultantes do modelo para o Silício, na liga SAE 1045 .....	68
Figura 40 - Composições químicas resultantes do modelo para o Manganês, na liga SAE 1045 .....	68
Figura 41 - Indicadores $\zeta_j$ e $\zeta_j\text{Fe}$ aplicados às matérias-primas. ....	70
Figura 42 - Valores dos Indicadores $\tau_j0030$ , $\tau_j1030$ , $\tau_j1045$ e $\tau_j\text{FeCr}$ aplicados para as matérias-primas. ....	71
Figura 43 - Valores do Indicador $\zeta\tau_{\text{liga}}$ aplicados para as matérias-primas.....	73
Figura 44 - Valores do indicador $\zeta\text{Fe}\tau_{\text{liga}}$ aplicados para as matérias-primas. ....	74
Figura 45 - Indicadores para a liga 0030 produzidos a partir dos dados da indústria. ...	75
Figura 46 - Indicadores para a liga 1045 produzidos a partir dos dados da empresa. ....	75
Figura 47 - Indicadores para a liga 0030 produzidos a partir dos dados simulados.....	76
Figura 48 - Indicadores para a liga 1045 produzidos a partir dos dados simulados.....	76
Figura 49 - Cargas de Otimização das Adições Obtidas a Partir do Modelo para a Liga 0030 .....	78
Figura 50 - Cargas de Otimização das Adições Obtidas a Partir do Modelo para a Liga SAE 1045.....	78
Figura 51 - Concentrações Mássicas dos Elementos da Liga 0030 Após a Etapa de Otimização.....	79
Figura 52 - Concentrações Mássicas dos Elementos da Liga 1045 Após a Etapa de Otimização.....	79
Figura 53 - Análise Múltipla de Médias entre as Massas de Carbono Adicionadas às 82 Corridas da Liga 0030. ....	80
Figura 54 - Análise Múltipla de Médias entre as Massas de Carbono Adicionadas às 13 Corridas da Liga SAE 1045.....	81
Figura 55 - Resultados do Carregamento da Liga SAE 1030 com Acréscimos de 0%, 50% e 100% no Custo Relativo da Sucata Comum. ....	82
Figura 56 - Composição Química do Carbono para os Carregamentos com Custo Relativo da Sucata Comum Inflacionado para a Liga SAE 1030.....	83
Figura 57 - Composição Química do Silício para os Carregamentos com Custo Relativo da Sucata Comum Inflacionado para a Liga SAE 1030. ....	83
Figura 58 - Composição Química do Manganês para os Carregamentos com Custo Relativo da Sucata Comum Inflacionado para a Liga SAE 1030.....	84

Figura 59 - Composição Química do Cromo para os Carregamentos com Custo Relativo da Sucata Comum Inflacionado para a Liga SAE 1030. ....	84
Figura 60 - Resultados do Carregamento da Liga FeCr18% com Acréscimos de 0%, 50% e 100% no Custo Relativo da Sucata Comum. ....	85
Figura 61 - Composição Química do Carbono para os Carregamentos com Custo Relativo da Sucata Comum Inflacionado para a Liga FeCr18%. ....	86
Figura 62 - Composição Química do Silício para os Carregamentos com Custo Relativo da Sucata Comum Inflacionado para a Liga FeCr18%. ....	86
Figura 63 - Composição Química do Manganês para os Carregamentos com Custo Relativo da Sucata Comum Inflacionado para a Liga FeCr18%. ....	87
Figura 64 - Composição Química do Cromo para os Carregamentos com Custo Relativo da Sucata Comum Inflacionado para a Liga FeCr18%. ....	87

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Custo Homem <i>versus</i> Hora em 2005. Fonte: Abifa/Apex (2006a). .....	17
Tabela 2 – Informações Técnicas do Exemplo da Metodologia de Cálculo .....	40
Tabela 3 – Especificações Químicas de Carbono, Silício, Manganês e Cromo nas Ligas Produzidas pela Empresa.....	46
Tabela 4 – Especificações Químicas de Carbono, Silício, Manganês e Cromo nas Sucatas Utilizadas.....	47
Tabela 5 – Especificações Químicas de Carbono, Silício, Manganês e Cromo nas Adições Utilizadas.....	47
Tabela 6 – Composição Química (% mássico) das Amostras de Escória da Liga SAE 0030M, junto com a média (M) e o desvio padrão (DV). .....	50
Tabela 7 – Resultados do Carregamento e dos Custos Relativos para a Indústria e o Modelo.....	65
Tabela 8 - Indicadores com Custo da Sucata Comum Variando 0%, 50% e 100%.....	88

## LISTA DE SÍMBOLOS

Coefficiente da função de perda de Taguchi	$T'$
Coefficiente do i-ésimo elemento em sua reação de oxidação	$n_i$
Coefficiente do i-ésimo termo da função de perda de Taguchi	$T'_i$
Coefficiente do oxigênio na reação de oxidação do i-ésimo elemento	$n_{O,i}$
Constante da reação de oxidação do i-ésimo elemento	$K_i$
Constante dos gases ideais	$R$
Custo da j-ésima sucata	$c_j$
Custo da k-ésima adição	$d_k$
Delta de especificação do i-ésimo termo da função de perda de Taguchi	$\Delta_i$
Eficiência metálica da j-ésima sucata	$\phi_j$
Eficiência metálica da k-ésima adição	$\psi_k$
Eficiência metálica do i-ésimo elemento	$\varphi_i$
Eficiência metálica máxima do i-ésimo elemento	$\overline{\varphi_i}$
Eficiência metálica mínima do i-ésimo elemento	$\underline{\varphi_i}$
Fração mássica do i-ésimo elemento na fase do banho	$[i]$
Fração mássica do i-ésimo elemento na j-ésima sucata	$w_{i,j}$
Fração mássica do i-ésimo elemento na k-ésima adição	$v_{i,k}$
Fração mássica do óxido do i-ésimo elemento na fase da escória	$(i)$
Fração mássica do óxido do i-ésimo elemento na fase da escória no início do processo	$(i)^i$
Fração mássica do oxigênio na fase do banho no final do processo	$[O]^f$
Fração mássica do oxigênio na fase do banho no início	$[O]^i$
Fração mássica do oxigênio na fase do banho	$[O]$
Função custo	$F$
Função de filiação retangular do i-ésimo elemento na j-ésima sucata	$\mu_j(i)$
Função de perda de Taguchi	$Z$
I-ésima variável medida	$X_i$
I-ésimo elemento dissolvido na fase do banho	$\underline{i}$
Importância relativa do i-ésimo termo da função de perda de Taguchi	$R_i$
Indicador de custo-benefício da j-ésima matéria-prima	$\zeta_j$
Indicador de custo-benefício referente a adição de Ferro da j-ésima matéria-prima	$\zeta_j^{Fe}$
Indicador de suprimento de elementos de liga da j-ésima matéria-prima à liga em questão	$\tau_j^{liga}$
Limite inferior da fração mássica do i-ésimo elemento na fase do banho	$\underline{[i]}$
Limite inferior da fração mássica do i-ésimo elemento na j-ésima sucata	$\underline{w_{i,j}}$
Limite superior da fração mássica do i-ésimo elemento na fase do banho	$\overline{[i]}$
Limite superior da fração mássica do i-ésimo elemento na j-ésima sucata	$\overline{w_{i,j}}$

Massa da fase da escória	$m_e$
Massa da fase de escória no início	$m_e^i$
Massa da fase do banho	$m_b$
Massa da fase do banho no final do processo	$m_b^f$
Massa da fase do banho no início do processo	$m_b^i$
Massa da j-ésima sucata	$s_j$
Massa da k-ésima adição	$a_k$
Massa de oxigênio que reage	$m_{r,O}$
Massa do i-ésimo elemento adicionada	$m_{a,i}$
Massa do i-ésimo elemento que reage	$m_{r,i}$
Massa do i-ésimo elemento que reage	$m_{r,i}$
Massa molar do óxido do i-ésimo elemento	$\overline{M}_{O,i}$
Massa molar média do i-ésimo elemento	$\overline{M}_i$
Massa molar média o oxigênio	$\overline{M}_O$
Massa que reage	$m_r$
Número de adições	$K$
Número de sucatas	$J$
Óxido do i-ésimo elemento na fase da escória	$(i_{n_i} O_{n_{o,i}})$
Oxigênio dissolvido na fase do banho	$\underline{O}$
Percentual dos moles de oxigênio consumidos na reação de oxidação do i-ésimo elemento	$\%O_i$
Pressão de oxigênio formada na reação do i-ésimo elemento	$P_{O,i}$
Temperatura	$T$
Valor da meta da i-ésima variável medida	$Y_i$
Valor da meta da variável medida	$Y$
Variável medida	$X$
Volume	$V$

## **RESUMO**

Tem-se na indústria da fundição de metais ferrosos o desafio de se produzir diferentes ligas de aço e ferro fundido com composições químicas diversas. As empresas possuem uma gama ampla de sucatas e adições disponíveis para realizar seus processos, e diversas composições de escórias são possíveis de serem alcançadas, diversificando as eficiências metálicas a cada corrida. O presente trabalho objetiva desenvolver três modelos inéditos, a saber, de rendimento metálico, de carregamento do forno e de otimização da composição química final do banho, com a intenção de auxiliar no planejamento de corridas. Também são apresentados indicadores de custo-benefício e de capacidade de suprimento de elementos de liga para fornecer critérios práticos às tomadas de decisão envolvendo as etapas de produção. Com os modelos desenvolvidos, foram obtidos resultados de eficiência metálica com patamares similares às estimativas de eficiência da prática na indústria. Os resultados de carregamento se mostraram melhores em termos econômicos, e tanto este modelo quanto o de otimização da composição resultaram em corridas tecnicamente equivalentes às práticas encontradas na indústria.

## **ABSTRACT**

The challenge of producing different steel alloys and cast iron in various chemical compositions is verified in the foundry industry. Companies have a wide range of scraps and additions available to perform their processes, and various slag compositions are possible to be achieved, diversifying the metallic efficiencies in each tap. This work intends to develop three unpublished models, namely metallic yield, furnace loading and optimization of the final chemical composition, aiming to assist the planning of foundry process. Indicators of cost-effective and supply capacity of alloying elements are also presented to provide practical criteria for decision making involving their steps. Results were obtained with efficiencies similar to estimates of metallic efficiency in the practice of the industry. Its charging results proved best in economic terms, and both this model and the optimization of the composition resulted in taps technically equivalent to the practices found in the industry.

## 1. INTRODUÇÃO

A fundição consiste, basicamente, em inserir metal líquido dentro de um molde (etapa chamada de vazamento), e em seu subsequente resfriamento para solidificação do metal. A retirada da peça solidificada depende do tipo de molde utilizado. Os moldes mais comuns são feitos de areia quente e de cera (moldes não metálicos), podendo ser metálicos também. No caso dos moldes não metálicos, ele é destruído e a peça removida. Ela sofre ainda processos posteriores, como retirada dos canais de alimentação, rebarbação, por vezes necessita passar por tratamentos térmicos e termoquímicos, e outras vezes também necessita passar por acabamentos mecânicos, como usinagem.

As propriedades mecânicas da peça são intrinsicamente dependentes das microestruturas formadas durante a solidificação e o tratamento térmico da peça, além de defeitos macroscópicos. Sua microestrutura, todavia, será formada de acordo com seu resfriamento e composição química no momento do vazamento. Dessa forma, torna-se importante acertar sua composição antes do momento de vazamento no molde.

Realizar todo o processo, desde o vazamento até a entrega da peça final, com um custo baixo de produção e alta eficiência, também é um desafio que a prática da fundição encontra dentro das empresas. Além de sobreviver às crises do mercado e a sua competição nacional e internacional, as empresas de fundição necessitam superar a alta carga tributária trabalhista e sobre os bens e serviços, frente aos países que também produzem e exportam fundidos com facilidade. Dessa forma, as empresas brasileiras têm de entregar produtos com alta qualidade tecnológica e com potencial competitivo em um cenário muitas vezes mais exigente do que o encontrado pelos países do BRICS, por exemplo.

Assim sendo, a empresa de fundidos ferrosos depende em especial de sucatas de outras empresas da cadeia produtiva metal mecânica, além de desempenhar um papel importante no reciclo e reaproveitamento de materiais metálicos. Uma vez que se têm variadas sucatas e adições disponíveis em diversas composições e preços, acertar a composição química do aço ou ferro fundido produzido de maneira eficiente e com otimização do seu custo e de sua qualidade de produção torna-se um desafio.

A simulação computacional a partir de modelos numéricos surge como ferramenta de auxílio a este desafio, uma vez que permite melhor conhecimento do processo

estudado, a encenação de cenários, e a pesquisa de novos produtos e processos, enquanto poupa seu usuário dos custos de uma pesquisa em um modelo físico, sem comprometer a linha de produção do processo em questão.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo geral trata de desenvolver e aplicar modelos numéricos na área de fundição de ligas ferrosas.

Têm-se por objetivos específicos para este trabalho:

- Desenvolver um modelo numérico capaz de descrever e prever o rendimento metálico.
- Desenvolver um modelo numérico que auxilie o carregamento inicial do forno.
- Desenvolver um modelo numérico de ajuste ótimo da composição química da liga ferrosa.
- Introduzir, para as matérias-primas utilizadas, indicadores de eficiência, de forma a auxiliar o planejamento. Esses indicadores são:
  - Custo-benefício;
  - Capacidade de suprimento dos elementos envolvidos.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Cenário da Fundição Mundial e no Brasil

Segundo CASOTTI, FILHO e CASTRO, 2011, a produção de fundidos no mundo supera a casa dos 90 milhões de toneladas por ano. No Brasil, desde 2000, a indústria de fundição vinha crescendo de forma consistente 4,5% ao ano até 2008, ano da crise financeira internacional, havendo uma queda de 2% com relação a 2007.

O efeito prolongado da crise gerou redução na produção de veículos comerciais pesados em todo o mundo, e por consequência, nova queda no setor de fundição em 2009. Nos EUA, essa redução no setor automotivo comercial pesado foi de 39%, sendo 49% no Japão e 64% na Europa. No Brasil, essa redução foi de 31%.

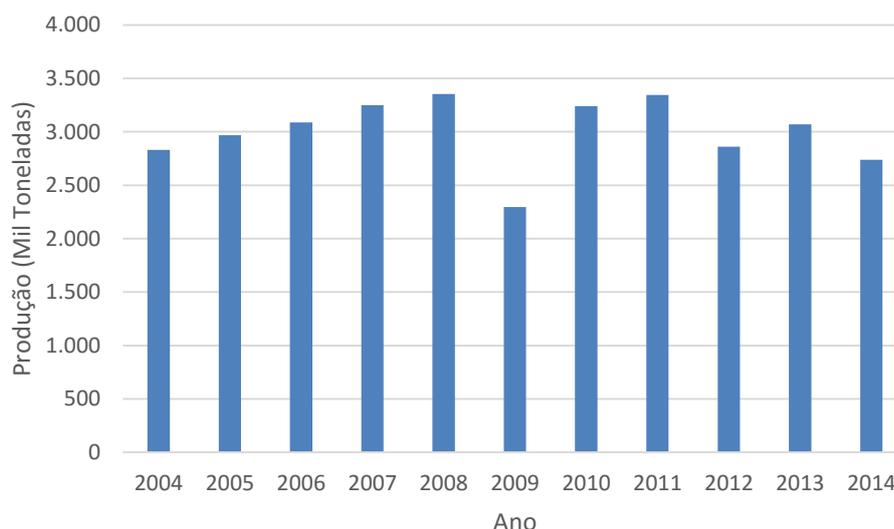


Figura 1 - Crescimento da indústria de fundição entre 2004 e 2014 no Brasil. Fonte: Anuário Abifa 2015

Em 2010, houve recuperação do mercado. Os principais responsáveis foram as indústrias de fundição dos países emergentes, que acompanharam o crescimento da economia dos seus países juntamente com maiores pressões ambientais sobre os países desenvolvidos. A China é o maior exemplo desse fenômeno: de 1998 a 2008, a indústria de fundidos chinesa cresceu 335% aproximadamente, passando a ser responsável por mais de um terço da produção mundial do setor. A qualidade dos produtos chineses

também sofreu significativa melhora desde os anos 1990, sendo comparável com os produtos da indústria brasileira, porém com vantagens tributárias: os encargos trabalhistas da China são de cerca de 12%, enquanto que no Brasil esse valor é de 65%.

Outro dado interessante sobre disparidades nos fatores de produção é o custo homem / hora, em US\$, entre os países desenvolvidos e emergentes. Segundo dados de 2005, esse valor chegava a 25,4 ordens de magnitude de diferença entre o custo mais caro e o mais barato, conforme pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 – Custo Homem *versus* Hora em 2005. Fonte: Abifa/Apex (2006a).

Maior Custo	País	US\$ / hora
1º	Alemanha	25,40
2º	França	19,50
3º	EUA	17,57
4º	Espanha	16,10
5º	Canadá	14,63
6º	Brasil	4,60
7º	Rússia	3,50
8º	China	1,75
9º	México	1,70
10º	Índia	1,00

Os maiores importadores do setor são os EUA, que importaram em 2006 3,2 milhões de toneladas. Dessa quantia, 768 mil toneladas vieram da China, 416 mil da Europa e 352 mil do Brasil. Europa também é grande importadora de fundidos, porém supre sua demanda intra continentalmente.

A posição do Brasil no cenário mundial de produção de fundidos passou de 10º produtor mundial em 1998 para 7º em 2008, sendo responsável por 2% da produção mundial (3 milhões de toneladas). As regiões em que se concentram a maioria das fundições no país são as regiões Sudeste e Sul. Somente o estado de São Paulo responde por 36% da produção nacional, e a região Sul por 28%, mesmo valor que a região Centro-Oeste somada à produção de Minas Gerais. Rio de Janeiro participa com 6%, enquanto as regiões Norte e Nordeste representam juntas 2%.

O setor que mais consome fundidos no Brasil é o automotivo, com 58% do mercado. 78% das indústrias brasileiras possuem menos de 100 funcionários, sendo 90% das indústrias composta por micro, pequenas e médias empresas, com 97% do total de empresas de capital nacional.

A participação da indústria de fundição no PIB industrial brasileiro é de 3%, o que pode significar pouco em termos percentuais, mas se torna importante quando analisado os setores que ela alimenta, como o setor automotivo, responsável por 23% do PIB industrial, que adquire 58% da produção nacional de fundidos.

### **3.2. Relevância Econômica das Sucatas como Matérias-Primas**

Preços de sucatas ferrosas são estabelecidos de acordo com oferta e demanda no cenário mundial, conforme AYLEN e ALBERTSON, 2006, afetando diretamente o preço de seus substitutos ou indiretamente nas negociações anuais de minérios de ferro. O mercado de sucatas ferrosas é o maior e mais antigo que existe, havendo sido reciclados em 2003 em torno de 400 milhões de toneladas.

A estrutura do mercado de sucatas, na maioria dos países, pode ser aproximada a uma estrutura piramidal, em que há poucas empresas maiores que consolidam e processam o material, passando sua sucata para um maior número de empresas de menor tamanho no nível seguinte, e assim por diante, até se chegar às fundições domésticas, que se apresentam em maior número. Não há evidências de que o sucesso das empresas neste mercado esteja associado com seu tamanho, mas sim com decisões em oportunidades fora do controle individual delas, como variações na demanda ou aumentos excessivos nas taxas de interesse, permanecendo o mercado competitivo apesar de consolidações locais.

A sucata é considerada uma *commodity*, mas com a diferença para outras *commodities* de não apresentar mercado futuro. Isto é explicado, dentre várias razões, por não se ter informação financeira suficiente e pela dificuldade de se especificar gradações precisas para uma *commodity* heterogênea. Apesar disso, é possível haver contratos ‘futuros’ em grandes obras de demolições, nos quais indústrias consumidoras de sucata a recolhem à medida que ela se torna disponível, pagando por ela de acordo com uma fórmula de preço pré-estabelecida. A ausência de mercado futuro para sucatas

também ajuda a explicar porque ele é um mercado com características de memória longa: negociações futuras são direcionadas pelos preços passados dessa *commodity*.

Sofrendo influência de custo de transporte e energia para processamento, seu preço é definido em um cenário em que a demanda por material gerou o próprio canal de suprimento, fazendo surgir mercados de reciclagem. Segundo AYLEN e ALBERTSON, 2006, sua demanda não apresenta resposta a seu preço, mas é capaz de gerar aumento em seu suprimento até o ponto em que ele igualmente se torna sem resposta a preços, sendo também afetado por episódios de ‘bolha’ de preços e eventuais quedas.

### **3.3. Tipos de Modelos Numéricos**

Existem muitas categorias de classificações para modelos numéricos. Segundo SHIFLET, A. B.; SHIFLET, GEORGE W., as principais classificações de um modelo que se propõe a analisar problemas do mundo real e, portanto, naturalmente complexos, são os que seguem:

- Um sistema que apresenta algum elemento de chance é dito probabilístico ou estocástico. Quando essa chance não obedece a área matemática da probabilidade, mas apresenta elementos da área de conjuntos lógicos, ele é dito possibilístico. Caso contrário, ele é dito determinístico, por ser possível determinar com exatidão seu comportamento.
- Um sistema é dito discreto quando seus elementos são separados em grandezas que envolvem faixas de valores. Quando essa faixa de valores é suficientemente pequena para considerar que não existem grupos de separação, ele é dito contínuo.
- Um sistema que não considera o tempo em seu modelo é dito estático. Quando é considerado que ele muda com o tempo, ele é dito dinâmico.

### **3.4. Tipos de Otimização**

Segundo, IQBAL, K, o propósito do desenho de sistemas de engenharia é selecionar uma ou mais variáveis de forma que se alcance um conjunto de objetivos. Quando uma dessas variáveis é uma função de custo, um melhor desenho do sistema pode ser obtido reduzindo-se essa variável. Quando essa variável, isto é, a função custo, for a menor

possível dentre todos os desenhos do sistema, diz-se que este desenho do sistema de engenharia é ótimo ou otimizado.

Há muitas técnicas desenvolvidas para a otimização de diversos tipos de sistemas em engenharia. Para este trabalho, serão apontados dois principais métodos de otimização. O primeiro é um método utilizado em sistemas lineares, onde as condições de contorno podem ser equações ou inequações, sendo chamado de programação linear.

O segundo método é utilizado em sistemas que possuem algum tipo de curvatura, ou melhor, algum tipo de não linearidade, em sua função de custo. Isto faz com que eles tenham pontos ótimos que são ótimos locais, isto é, são ótimos para aquele conjunto de desenhos, mas que não necessariamente sejam o melhor ponto ótimo. Quando a função custo possui algum ponto que seja um ponto ótimo global, ela é dita convexa. Para este tipo de função custo, o método utilizado é o do vetor gradiente.

### **3.4.1. Programação Linear**

Problemas de programação linear formam um subconjunto importante de problemas de otimização, já que são amplamente encontrados em problemas de economia e que apresentam limitação de recursos. Eles também se diferenciam dos demais problemas por sua função custo (ou também função objetivo) e suas condições de contorno serem todas equações e/ou inequações lineares.

O algoritmo de otimização especializado para este tipo de problema é o método Simplex. Ele divide as variáveis entre básicas e não-básicas, sendo estas últimas iguais a zero. Juntas, elas formam uma solução básica. Em seguida, é feita uma atualização iterativa que atualiza as variáveis básicas, formando uma sequência de soluções em que cada função de custo possui um valor menor que a solução anterior. Há um custo reduzido associado com as variáveis não-básicas. A solução ótima é alcançada quando todos os custos reduzidos associados a essas variáveis são não-negativas.

Mais informações sobre esse método podem ser alcançadas em IQBAL, K.

### **3.4.2. Vetor Gradiente**

O vetor gradiente apresenta propriedades importantes em problemas convexos, isto é, com um único ponto ótimo global, pois ele sempre terá sua direção apontada para ele.

Notar que para problemas de mínimos globais, o vetor gradiente possui sentido oposto. Cada componente do vetor é composto pela derivada parcial da função custo associada àquela variável.

Dessa forma, na minimização de funções de custo, parte-se de um ponto inicial (em geral a origem), e avança-se na direção do vetor gradiente até se chegar ao ponto ótimo. Mínimos globais podem ser evitados inserindo-se um fator de inércia ao método, assemelhando-se a problemas da física de deslocamento (com posição, velocidade e aceleração).

Os parâmetros deste método podem ser fixos, mas apresentam melhor desempenho quando são iterativamente atualizados. Maiores detalhes podem ser encontrados em SUTTON, R. S.; BARTO, A. G.

### **3.5. Modelos para Planejamento de Produção**

Um dos problemas enfrentados por empresas de fundição é a organização do cronograma de produção de forma a maximizar a produtividade e diminuir atrasos nas entregas. BALLESTÍN, MALLOR e MATEO, 2012 desenvolveram e compararam dois modelos voltados para esta etapa, o primeiro sendo uma programação matemática e o segundo, um modelo meta-heurístico, ambos para produtos fundidos em moldes de areia.

O fluxograma de produção da empresa estudada está representado pela Figura 2, onde nas áreas de moldagem e vazamento há o consumo de recursos necessários à produção nestas etapas (área, moldes e caixas para a área de moldagem, e forno para vazamento) e a produção de caixas para moldagem na área de desmoldagem.

O modelo matemático resultante é um modelo de programação linear de números inteiros mistos, baseado no problema de produção com horizonte rolante, em que novas tarefas são acrescentadas à agenda de cada área de acordo com o término de atividades atuais e novos pedidos inseridos à lista de espera.

Já o modelo meta-heurístico é baseado no problema de gerenciamento de projeto, onde é feita uma correlação entre as peças a serem fabricadas e as atividades do projeto. Cada área envolvendo a linha de produção de uma peça é considerada um subprojeto. Foi desenvolvido um algoritmo próprio para a resolução de tal problema. Seus autores encontraram resultados satisfatórios com ambos os modelos desenvolvidos, sendo os resultados do primeiro claramente melhorados pelo segundo.

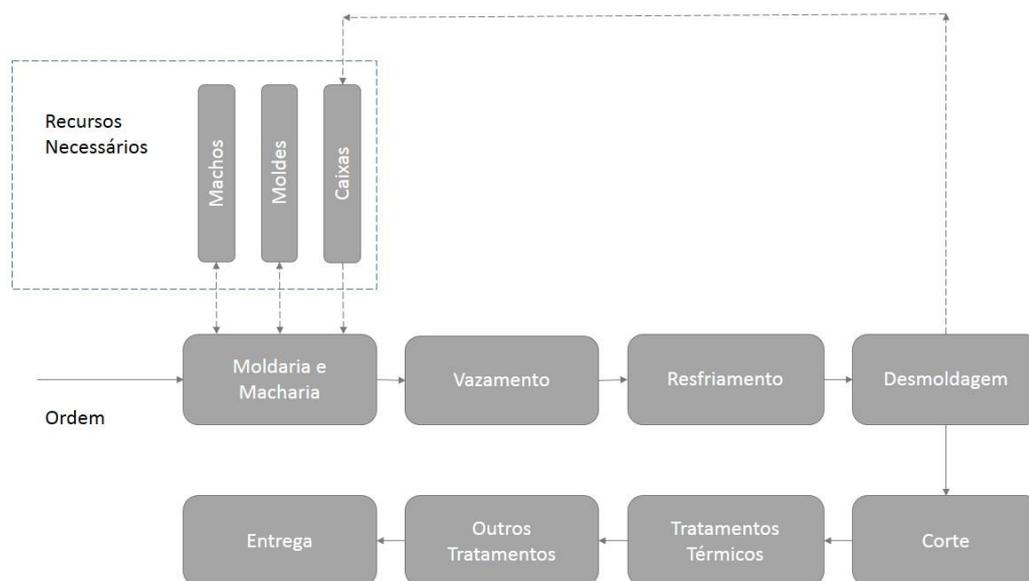


Figura 2 - Fluxograma de uma fundição. Fonte: BALLESTÍN, MALLOR e MATEO, 2012 (modificado).

Foram realizados trabalhos de otimização da programação de cargas de fornos para aços inox por SILVA e MORABITO, 2004 em uma empresa de fundição de pequeno porte. Possuindo três fornos de capacidades distintas, seu problema foi abordado pelos autores através da ótica do problema de corte e empacotamento. Nele, se deseja cortar (ou empacotar) peças pequenas de (ou em) uma peça maior. No caso aplicado, deseja-se programar as corridas dos fornos (no problema, representados pela peça maior) maximizando-se a produção e a margem de lucro carregando-se o forno com as peças a serem fundidas (representado pelas peças menores).

Seu algoritmo de resolução se baseia em procurar uma combinação de carregamentos mais valiosa para cada dia, associando os carregamentos calculados com a demanda de cada peça e das ligas a serem produzidas. Dispondo de três fornos de capacidades diferentes, o modelo planejou o carregamento para duas semanas distintas com redução de um dia de produção.

Os autores ARAUJO e ARENALES, 2003, e ARAUJO, ARENALES e CLARK, 2003, desenvolveram trabalhos parecidos com o anterior, também modelados com programação linear, onde buscam a otimização do dimensionamento de lotes e programação de fornos em fundições de porte médio e pequeno, respectivamente. A

área de moldagem é considerada o problema de dimensionamento de lotes, e a área do forno, de programação da produção, sendo ambos os problemas resolvidos simultaneamente. No primeiro trabalho, os autores propõem um método de solução heurístico que parte da solução do mesmo problema com condições de contorno menos rígidas. Com isso, conseguiram alcançar resultados em um período de tempo muito menor do que quando aplicados métodos tradicionais. No segundo trabalho, são propostos dois modelos para resolução do problema: o primeiro sendo o de horizonte rolante, isto é, em que há um número constante de bateladas planejadas e que acompanha a produção, e o segundo, de busca local. Ambos os modelos propostos foram resolvidos com redução de custo computacional e melhor otimização da função objetivo.

### **3.6. Modelos para Produção no Forno**

Em SHEHATA, 1997, há a modelagem simples do problema de carregamento e otimização química de ferros fundidos em um único modelo com o propósito de otimizar o uso de qualquer número de cargas metálicas, tais como ferro-gusa, sucatas diversas e adições como ferrosilício e ferromanganês.

Assume-se nesse modelo que os materiais podem ou não ser utilizados até a quantidade disposta no inventário, com preços necessitando serem atualizados caso mudem com o tempo e sendo conhecidos de fundição para fundição; cargas similares são agrupadas em uma mesma categoria; e para alguns elementos há ganho de massa, enquanto que para outros há perda, ambos considerados conhecidos de antemão ao uso do modelo.

Sua função objetivo é a minimização da função de custo do carregamento, com as condições de contorno sendo inequações restritivas oriundas do balanço de massa global e parcial. Sua resolução é feita com técnicas de programação linear. O autor obteve uma economia de US\$ 1.338,80 por dia.

As principais vantagens atribuídas ao modelo de SHEHATA, 1997 são que as análises de composição final estão muito próximas das previstas pelo uso do modelo e que a escolha das matérias-primas foi feita da maneira mais econômica, inclusive com economia de tempo. Todavia, seu modelo assume que todas as matérias-primas têm composição química conhecida, não contemplando seu conhecimento subjetivo no caso de não ser possível uma análise de sua composição. Além disso, há a necessidade do

conhecimento prévio das eficiências metálicas, não levando em consideração a composição química das escórias formadas durante o processo.

Redes neurais com retro propagação (RN-RP) (Figura 3) foram usadas por WEI-PING, QUAN e CHUN, 2009 para a adição de ferrosilício e silício-manganês na fabricação de ferros fundidos em convertedores. Sua arquitetura possui duas camadas intermediárias de 3 e 4 neurônios, respectivamente, além das camadas de entrada e saída. Seus dados de entrada contemplam as massas de ferro, carbono, silício e manganês em ferro líquido, ferro gusa e sucatas de aço, volume de oxigênio durante o sopro juntamente com seu tempo de sopro, volume de carburante e sua quantidade de carbono, além da composição final e das últimas quantidades de silício e manganês utilizadas no convertedor.

O aprendizado da rede neural é feito sobre um banco de dados amostral aberto, isto é, no qual podem ser acrescentadas corridas para aumentar o espectro de conhecimento da rede. A RN-RP é o método artificial mais utilizado, apresentando falhas como convergência lenta e a não garantia de mínimo global. Para evitar estes pontos negativos, o autor utiliza o método do gradiente descendente para convergência da RN-RP, além de acrescentar um termo de *momentum* numérico para evitar mínimos locais e acelerar a convergência.

Como resultado, conseguiu-se simplificar um problema altamente não-linear por conter reações com oxigênio e escória a um modelo de rede neural, onde os erros foram mantidos abaixo dos 5%. Seu ponto negativo é que não há um modelo declarado para o problema de WEI-PING, QUAN e CHUN, 2009, havendo no lugar dele um modelo artificial.

Já em ZIÓLKOWSKI e WRONA, 2007, faz-se uso de conjuntos difusos para descrever o não-conhecimento pleno das composições químicas de matérias-primas envolvidas, como sucatas, e da liga sendo produzida. Seu modelo também é empregado na etapa de otimização em vez de na etapa de carregamento.

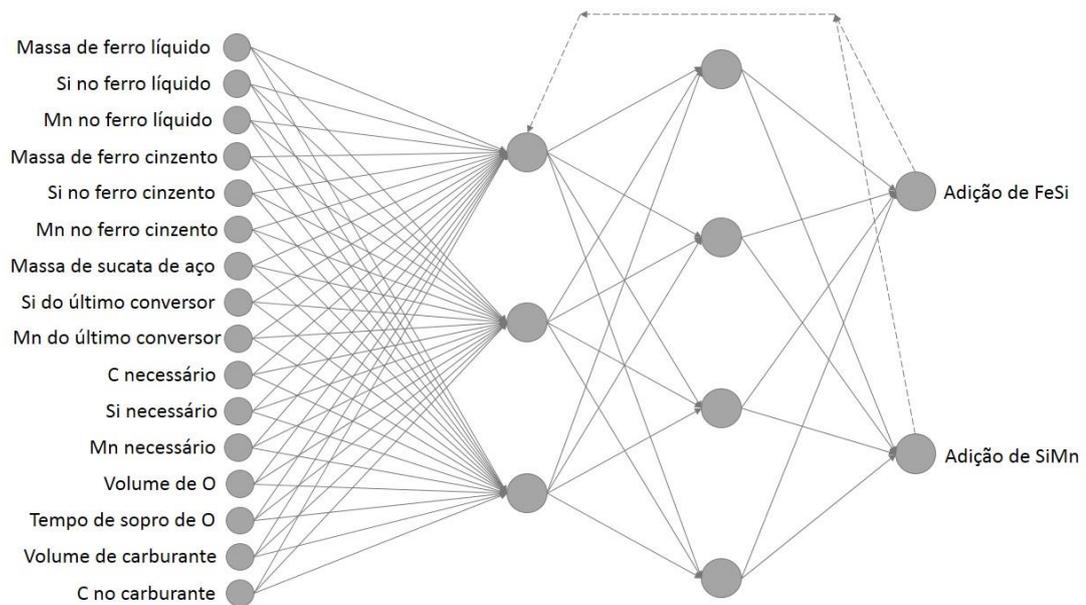


Figura 3 – Exemplo de redes neurais utilizadas na otimização de corridas. Fonte: WEI-PING, QUAN e CHUN, 2009 (modificado).

Suas principais considerações ao levantar seu modelo são que a composição química inicial da corrida a ser corrigida é conhecida, além de sua carga total, e que eventuais mudanças nos resultados do balanço de massa parcial decorrem das eficiências metálicas, assumidas também conhecidas. Os autores levantam a possibilidade de se utilizar formas variadas para a função de filiação. Dentre elas, citam-se funções de filiação poligonais, Gaussianas simétricas e assimétricas, senoidais, harmônicas simétricas e assimétricas, e polinomiais. Para simplificação do seu modelo de otimização, eles escolheram para a função de filiação a forma retangular, conforme pode ser visto na Figura 4. Desse modo, composições desconhecidas de sucatas ou até mesmo seus preços desconhecidos podem ser representados por um limite inferior e outro superior, estando seu verdadeiro valor entre esses limites.

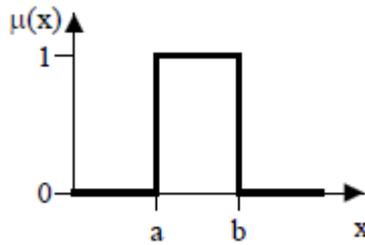


Figura 4 – Exemplo de função de filiação retangular  $\mu(x)$  da variável  $x$  com limites inferior e superior iguais a  $a$  e  $b$ , respectivamente. Fonte: ZIÓLKOWSKI e WRONA, 2007.

Sua função objetivo não contempla custos, de forma que minimiza a carga utilizada durante a otimização. Suas condições de contorno provêm dos balanços de massa parciais dos elementos envolvidos, fazendo-se introdução dos limites inferior e superior da função de filiação. Agindo-se dessa forma, dobra-se o número de condições de contorno.

Fazendo uso de seu modelo, ZIÓLKOWSKI e WRONA, 2007 otimizaram a composição química de uma corrida industrial com o mínimo de massa adicionado. Seu modelo se mostra útil quando a carga total da corrida é um fator crítico, não sendo necessariamente crítico seu fator econômico de otimização. Ressaltam, porém, que é possível obter economia com seu modelo, porém não sempre.

Suas principais desvantagens são que, dependendo das matérias-primas dispostas para otimização, pode haver acréscimo excessivo de uma delas, de forma a fazer transbordar o forno. Há a necessidade, também, de se verificar o tempo de corrida disposto para a otimização. Caso não haja tempo o suficiente, deve-se proceder com a otimização em etapas subsequentes ao vazamento do forno, o que não é técnico-economicamente eficiente.

RONG e LAHDELMA, 2008 desenvolveram um modelo de programação linear restringido por conjuntos difusos, em que a função de filiação é poligonal triangular, sendo transformada em uma função de filiação estocástica, conforme a Figura 5. O problema enfrentado pelos autores do artigo é o uso de sucatas de graduação diversa organizadas por grupos. Dessa forma, dentro de um grupo, há chances diferentes de ocorrer uma composição química determinada, pois pode haver grande heterogeneidade inclusive dentro de um mesmo grupo.

A especificação da liga produzida também é tomada como um número difuso de forma triangular. Além disso, como suas sucatas provém de reciclagens não necessariamente da indústria siderúrgica, há também fatores de impurezas em suas cargas. Seu processo ocorre não em fornos de indução, mas em fornos elétricos a arco, sendo dividido em três etapas principais: a fusão da carga, a descarburização do banho e a otimização da composição.

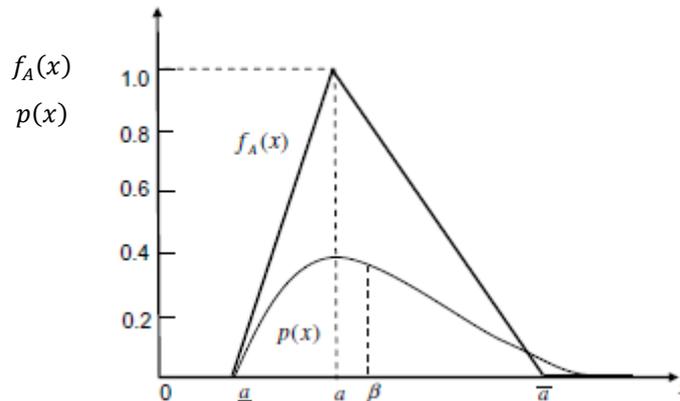


Figura 5 – Relação entre uma função de filiação possibilística  $f_A(x)$  com valores ( $\underline{a}$ ,  $a$ ,  $\bar{a}$ ) e uma probabilística  $p(x)$  com Média  $\beta$ . Fonte: RONG e LAHDELMA, 2008 (modificado).

O modelo desenvolvido, pelos outros citados anteriormente, contempla o carregamento simultâneo de mais de uma corrida, otimizando assim o uso da matéria-prima em um horizonte maior de planejamento. Sua função de minimização é a soma dos custos individuais dos carregamentos. Suas condições de contorno são obtidas com o balanço de massa parcial para cada elemento envolvido. Diferentemente de ZIÓLKOWSKI e WRONA, 2007, os autores não duplicam o número de condições de contorno obtidas por balanço de massa, mas obtêm seu modelo determinístico equivalente. Eles também trabalham com uma variável de risco de falha dentro do modelo de programação linear difuso.

Sua validação experimental ocorre através de simulação numérica. A concentração das sucatas é adotada através de uma distribuição normal entre os valores mínimos e máximos para cada categoria. Dois cenários de simulação são montados. No primeiro, o

grau de incerteza (desvio padrão) máximo de conhecimento da composição química de um elemento é de 30%. No segundo cenário, o grau de incerteza é dobrado.

Como resultados, eles chegaram à conclusão que há uma troca entre diminuir a chance de riscos e aumentar os custos da corrida para ambos os cenários. Em média, o custo aumenta 1,15% quando o risco de falha cai de 5% para abaixo de 0,3%. Quando o grau de incerteza aumenta sobre a composição das matérias-primas, para se manter a mesma chance de risco há também um aumento de custo que varia de 2% a 2,5%, aproximadamente. Seu modelo pode ser utilizado por empresas tanto para planejamentos de curta duração quanto como ferramenta de orientação na aquisição de matérias-primas.

SAKALLI e BAYKOÇ, 2011, trabalham com um modelo misto entre variáveis determinísticas, probabilísticas e possibilísticas. Seu problema envolve a produção de ligas de bronze a partir de matérias-primas puras e sucatas, sendo que a composição destas últimas pode se enquadrar em qualquer um dos três grupos de variáveis.

Eles consideram que os elementos em cada uma das sucatas apresentam distribuição normal em sua concentração, argumentando que a teoria probabilística é mais bem equipada para tratar da fundição de ligas de bronze. A razão é que, caso se utilize a teoria probabilística, então o produto final só pode ser resultado da soma de várias distribuições normais, resultando no gráfico da Figura 6.

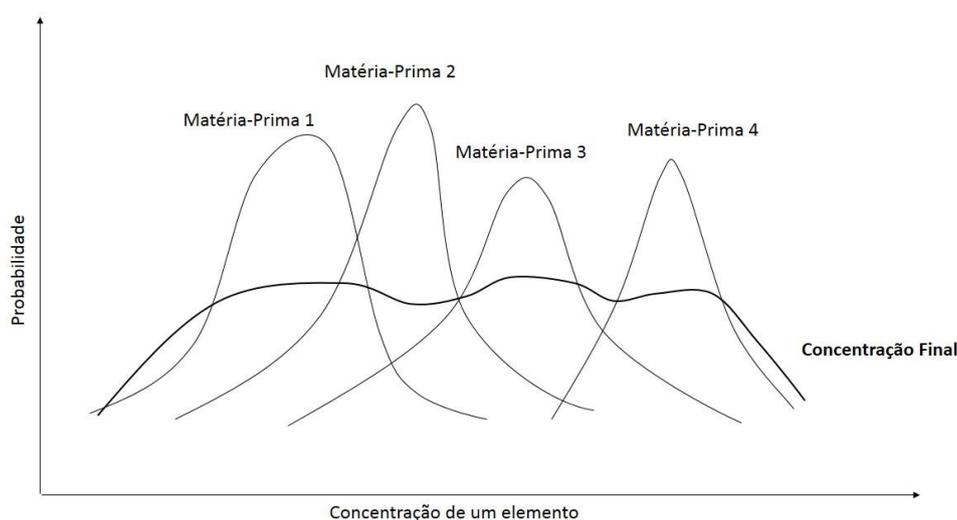


Figura 6 – Composição final resultante da soma de várias composições probabilísticas. Fonte: SAKALLI e BAYKOÇ, 2011 (modificado).

Similarmente a (RONG e LAHDELMA, 2008), eles adotam funções poligonais triangulares (simétricas e assimétricas) para caracterizar a composição das matérias-primas que se enquadram no grupo possibilístico. Em seguida, eles realizam uma transformação em suas variáveis, passando-as para o grupo de variáveis probabilísticas, com distribuição aproximadamente normal. Após, eles convertem o problema probabilístico em um problema determinístico não linear.

Sua função objetivo é similar a dos demais modelos apresentados anteriormente: o custo total da corrida é baseado na soma dos preços de suas matérias-primas. As condições de contorno também surgem do balanço de massa parcial para os elementos envolvidos, sendo, porém, resultado da soma de variáveis determinísticas e probabilísticas. Seu modelo é resolvido utilizando-se o *solver* GAMS/Baron.

Como resultados, eles concluem que quanto maior é a probabilidade mínima para acerto, maiores são os custos do carregamento, aumentando em torno de 0,50% quando a probabilidade mínima para acerto sobre de 85% para 99%. Eles também comparam seus resultados com os de modelos determinísticos e possibilísticos. Desta forma, ele obtém um custo aproximadamente 1,9% mais elevado que o modelo determinístico, porém aproximadamente 1,5% menor que o modelo difuso.

Suas principais limitações são a necessidade de conhecimentos ainda não existentes para transformação de variáveis possibilísticas e, portanto, incompletas, em estocásticas e completas, visto que as distribuições normais assim obtidas são aproximações da curva Gaussiana. Além disso, há a necessidade de se realizar várias simulações a diferentes critérios de escolha, elegendo-se o melhor carregamento baseado na experiência e conhecimento do operador.

### **3.7. Modelos de Controle de Qualidade**

Segundo TAGUCHI, G.; ELSAYED, E. A.; HSIANG, T., e também de acordo com RIBEIRO, J. L. D., a qualidade de um processo é proporcional ao quadrado da diferença entre o padrão de qualidade e a qualidade atual. A variável que mede a qualidade pode ser qualquer medida quantitativa do processo ou produto, conforme pode ser visto em CATEN, C. S. T., onde há a evolução do método utilizando-se múltiplas variáveis para se medir a qualidade de produtos e processos.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, uma descrição do processo de fundição se encontra no item 4.1. Em seguida, os modelos numéricos são desenvolvidos no item 4.2. No item 4.3, os fluxogramas de resolução desses modelos são apresentados. Nos subcapítulos seguintes, as ligas ferrosas produzidas pela empresa, suas matérias-primas e insumos, seus custos relativos, e a composição da escória são demonstrados nos itens 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7, respectivamente. Finalmente no item 4.8, se encontra a metodologia de validação dos modelos numéricos.

### 4.1. Processo de Fundição

Na empresa, onde a parte experimental deste trabalho foi desenvolvida, o processo de fundição está dividido em quatro áreas. São eles: (1) *Macharia e Moldagem*, (2) *Fornos*, (3) *Vazamento*, e (4) *Rebarbação e Tratamento Térmico*, conforme .

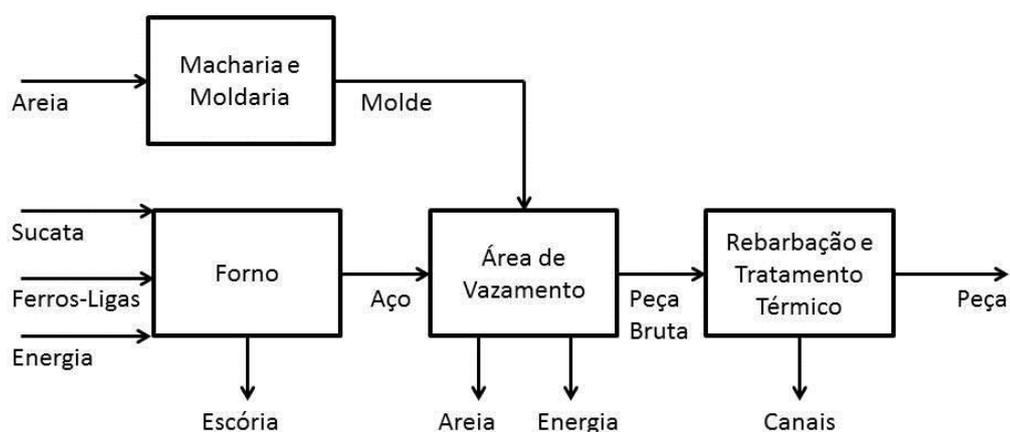


Figura 7 - Fluxograma do processo de fundição.

Na área da *Macharia e Moldaria*, os machos e os moldes são fabricados em areia verde. A geometria da peça, as velocidades de resfriamento e solidificação e os canais de alimentação são projetados, aparecendo nas formas destes componentes.

Na área dos *Fornos*, sucatas, ferroligas e energia são fornecidos a um ou mais fornos, que são revestidos internamente com refratários e preparados para suportar os ataques químicos e térmicos desta etapa. O forno recebe energia até que as matérias-primas se fundam, resultando no metal líquido, também chamado de *banho*. O banho

está em contato com uma fase sobrenadante líquida composta de óxidos dos elementos que a compõem, chamada *escória*.

Apesar de a escória ser considerada um rejeito por conter as impurezas do banho, ela tem um papel importante em isolar o banho do contato com o ar atmosférico, retardando dessa forma que oxigênio se dissolva nele e ocasione em uma perda maior dos elementos contidos nele por oxidação. Além disso, ela também contribui com seu isolamento térmico. O produto desta área é o metal líquido, que é transportado até a *Área de Vazamento*, onde os moldes já estão posicionados.

Na área chamada de *Área de Vazamento*, o metal líquido é vazado para dentro dos moldes, onde perderá energia térmica e se solidificará na geometria das peças, que podem estar dispostas em forma de cachos e ligadas pelos canais de alimentação. Terminada a solidificação, o molde de areia é destruído para a retirada da peça bruta, que segue para a próxima etapa.

Na última área, *Rebarbação e Tratamento Térmico*, as peças contidas no cacho são separadas, é feita sua rebarbação, e então elas seguem para o tratamento térmico apropriado, segundo a microestrutura que se deseja formar nelas.

O presente trabalho está focado na área dos *Fornos*. O forno industrial deste trabalho é um forno de indução de 5 toneladas de capacidade máxima e potência de 800 kW. No fluxograma do forno, há duas etapas principais: o *Carregamento* e a *Otimização*.

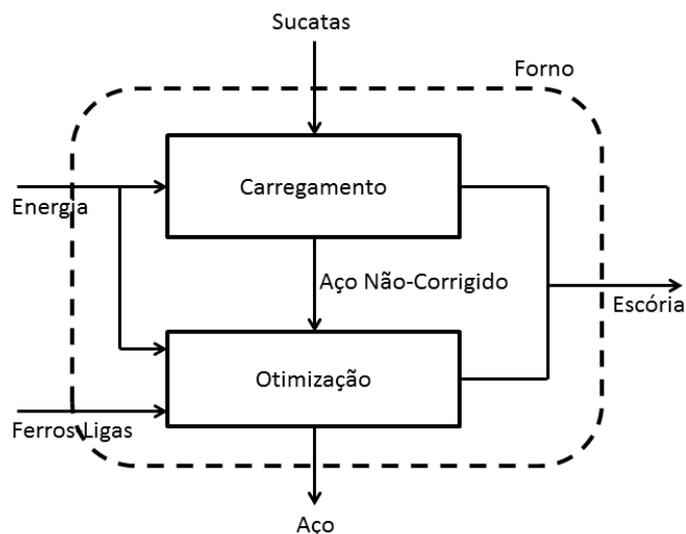


Figura 8 – Fluxograma do forno.

No *Carregamento*, consta a seleção das sucatas para composição do aço e a inserção de energia para sua fusão. Esta etapa tem por finalidade compor a carga do forno, de forma a aproximar a composição química do banho à composição final desejada. Assim, diminui-se os custos com sua posterior correção.

Já na *Otimização*, é avaliada a composição química do aço não corrigido, e os devidos acréscimos de cada elemento são feitos com adições para levar o aço até as especificações do produto.

Durante o *Carregamento*, as sucatas separadas para a corrida programada são introduzidas no forno em partes, de acordo com a taxa de fusão, isto é, a velocidade em que a sucata inserida se transforma em metal líquido. Cal é inserida de tempos em tempos, segundo a avaliação da viscosidade da escória pelo operador. FeSi é introduzido em uma quantidade fixa estabelecida pela carga total que o forno irá receber e pelo grau de limpeza da sucata. O forno também pode receber outras adições nesta etapa se houver elementos na liga produzida com alta concentração, com a intenção de agilizar a etapa seguinte (*Otimização*).

Quando toda a carga está fundida, é feito o acompanhamento de sua temperatura. Ao se alcançar tal temperatura, é retirada uma amostra do banho, que é solidificada e preparada para avaliação no espectrômetro. Durante todo o processo de *Carregamento*, a escória é renovada mais de uma vez por motivos de limpeza do banho.

Tendo a posse da composição química do banho, inicia-se a etapa de *Otimização* da composição química. Na empresa que foi acompanhada, seus cálculos são feitos baseados na experiência do operador, utilizando-se uma interpolação lagrangeana de primeiro grau (ou, vulgarmente, uma regra-de-três). Então são calculadas as quantias de cada adição a serem introduzidas no banho, de forma a corrigir sua composição química para dentro da especificação da liga que está sendo produzida. Após as adições serem introduzidas, espera-se o banho fundi-las e alcançar a temperatura de vazamento. Retira-se, então, nova amostra de composição do banho, sendo ela solidificada e analisada para conferência. Finalmente, o metal líquido do forno é vazado.

## **4.2. Modelos Numéricos**

A seguir são apresentados os modelos desenvolvidos para cálculo do rendimento metálico do banho, para a etapa de carregamento e para a etapa de otimização da composição química.

#### 4.2.1. Rendimento Metálico

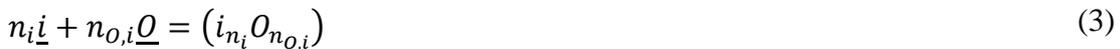
Segundo CAMPOS, 1985, a eficiência metálica do  $i$ -ésimo elemento  $\varphi_i$  é definida pela razão entre a massa que não reagiu do  $i$ -ésimo elemento,  $m_{a,i} - m_{r,i}$ , e sua massa adicionada ao banho,  $m_{a,i}$ , conforme a equação (1).

$$\varphi_i = \frac{m_{a,i} - m_{r,i}}{m_{a,i}} = 1 - \frac{m_{r,i}}{m_{a,i}} \quad (1)$$

A massa que reage do  $i$ -ésimo elemento,  $m_{r,i}$ , é obtida ao se realizar um balanço de massa parcial para a fase da escória e o  $i$ -ésimo elemento,  $m_e(i)$ , e uma vez que não há escória inicial,  $m_e^i$ , chega-se à equação (2), onde os termos entre parêntesis são as frações metálicas dos elementos que se encontram na fase da escória, e os termos sobrescritos com  $^i$  se referem ao início da etapa.

$$m_{r,i} = m_e(i) - m_e^i(i) = m_e(i) \quad (2)$$

É considerada a equação (3) como a reação de oxidação do  $i$ -ésimo elemento contido no banho, onde os coeficientes  $n_i$  e  $n_{o,i}$  são os coeficientes da reação de oxidação para o  $i$ -ésimo elemento, formando o óxido não gasoso de composição  $i_{n_i}O_{n_{o,i}}$ , onde os termos subscritos com um traço se encontram dissolvidos na fase metálica líquida do banho.



Há uma relação estequiométrica entre as massas de cada elemento que reagem para formar o óxido do  $i$ -ésimo elemento, conforme equação (4), onde o termo  $m_{r,o}$  se refere à massa de oxigênio necessária à reação para formar o óxido  $i_{n_i}O_{n_{o,i}}$ , e o termo  $\bar{M}$  é a massa molar do elemento subscrito.

$$\frac{n_{o,i}}{\bar{M}_i} m_{r,i} = \frac{n_i}{\bar{M}_O} m_{r,o} \quad (4)$$

Pode-se aplicar um balanço de massa para o oxigênio na fase do banho, segundo equação (5), para assim se obter sua massa que reage, onde o termo  $m_b$  se refere à carga total do forno, e o termo entre colchetes se refere à fração mássica.

$$m_{r,o} = m_b([O]^i - [O]) \quad (5)$$

Além disso, é necessário multiplicar a massa que reage do  $i$ -ésimo elemento pelo percentual de oxigênio, na equação (6), do seu óxido presente na massa total de oxigênio reagido, sendo esse o termo  $\%O_i$ .

$$\%O_i = \frac{n_{o,i}(i)}{\sum_{i'} n_{o,i'}(i')} \quad (6)$$

Dessa forma, juntando-se as equações (4), (5) e (6), chega-se na massa que reage do  $i$ -ésimo elemento, conforme equação (7).

$$m_{r,i} = m_b([O]^i - [O]) \frac{\bar{M}_i}{n_{o,i}} \frac{n_i}{\bar{M}_O} \frac{n_{o,i}(i)}{\sum_{i'} n_{o,i'}(i')} \quad (7)$$

Para o caso da oxidação do  $i$ -ésimo elemento formando um óxido na forma gasosa, é possível obter sua pressão de gás  $P_{O,i}$  formado através de seu equilíbrio com o banho, segundo a equação (8):

$$K_i = \frac{P_{O,i}}{[i]^{n_i} [O]^{n_{o,i}}} \quad (8)$$

Após, usa-se a equação dos gases ideais para se converter a pressão do óxido gasoso formado, chegando-se em sua massa que reagiu, conforme equação (9), onde  $R$  é a constante dos gases ideais,  $T$  é a temperatura do banho, e  $V$  é o volume de 1 mol de gás ideal.

$$m_{r,i} = \frac{K_i [i]^{n_i} [O]^{n_{o,i}} \overline{VM_{O,i}}}{n_i RT} \quad (9)$$

A massa adicionada do i-ésimo elemento é obtida somando-se as frações mássicas do i-ésimo elemento presente na j-ésima sucata,  $w_{i,j}$ , e do i-ésimo elemento presente na k-ésima adição,  $v_{i,k}$ , multiplicadas pelas respectivas cargas da j-ésima sucata,  $s_j$ , e da k-ésima adição,  $a_k$ , conforme equação (10).

$$m_{a,i} = \sum_j w_{i,j} s_j + \sum_k v_{i,k} a_k \quad (10)$$

#### 4.2.2. Carregamento

Deseja-se minimizar a função objetivo ‘F’ que representa o custo desta etapa, sendo constituída pela soma da multiplicação entre as cargas das j-ésimas sucatas,  $s_j$ , e k-ésimas adições,  $a_k$ , com seus respectivos custos,  $c_j$  para a sucata e  $d_k$  para a adição, conforme equação (11).

$$F = \sum_j s_j c_j + \sum_k a_k d_k \quad (11)$$

Ao se realizar um balanço de massa parcial para o i-ésimo elemento, chega-se à equação (12), onde do lado esquerdo há a soma das j-ésimas sucatas e k-ésimas adições com suas respectivas composições químicas do i-ésimo elemento,  $w_{i,j}$  e  $v_{i,k}$ , e do lado direito há a massa desejada do i-ésimo elemento no banho, com  $[i]$  sendo sua fração mássica na fase metálica do banho e  $m_b$  a carga do banho metálico no forno.

$$\sum_j s_j w_{i,j} + \sum_k a_k v_{i,k} = [i] m_b \quad (12)$$

A composição química do  $i$ -ésimo elemento na  $j$ -ésima sucata ou no produto final é definida de acordo com a distribuição retangular de filiação dos conjuntos difusos  $\mu_j(i)$ , equação (13), onde os termos subscritos com um traço são os limites inferiores da função de filiação, e os termos sobrescritos com um traço, seus limites superiores.

$$\mu_j(i) = \begin{cases} 1, \underline{w_{i,j}} \leq w_{i,j} \leq \overline{w_{i,j}} \\ 0, w_{i,j} < \underline{w_{i,j}} \text{ ou } \overline{w_{i,j}} < w_{i,j} \end{cases} \quad (13)$$

A função de filiação  $\mu_j(i)$  pode ser entendida como uma função de conjunto, isto é, quando a composição química do  $i$ -ésimo elemento na  $j$ -ésima sucata ou produto final  $w_{i,j}$  estiver dentro dos seus limites de composição  $\underline{w_{i,j}}$  e  $\overline{w_{i,j}}$ , então a  $j$ -ésima sucata ou produto final terá aquela composição do  $i$ -ésimo elemento. Outra maneira de se entendê-la é: quando não se sabe a composição química do  $i$ -ésimo elemento da  $j$ -ésima sucata ou produto final, porém sabendo-se que a  $j$ -ésima sucata possui a função de filiação  $\mu_j(i)$  para o  $i$ -ésimo elemento, então o  $i$ -ésimo elemento possui 100% de chance de possuir seu valor entre os seus limites de definição.

Diferentemente de uma distribuição estatística, em que a soma da área abaixo de sua função de distribuição deve somar 100%, na distribuição difusa quadrada, todo e qualquer valor individual dentro dos seus limites terá 100% de chance de ocorrer, sempre (podendo sua área abaixo da curva não necessariamente totalizar 100%).

Assim, tem-se duas condições de contorno provenientes do balanço de massa parcial para o  $i$ -ésimo elemento, ou seja, uma para cada limite de composição, conforme é visto na equação (14):

$$\begin{cases} \sum_j s_j \underline{w_{i,j}} + \sum_k a_k v_{i,k} \geq \underline{[i]}m_b \\ \sum_j s_j \overline{w_{i,j}} + \sum_k a_k v_{i,k} \leq \overline{[i]}m_b \end{cases} \quad (14)$$

Multiplica-se, então, cada condição de contorno pela respectiva eficiência metálica do  $i$ -ésimo elemento, chegando-se à equação (15).

$$\left\{ \begin{array}{l} \left( \sum_j s_j \underline{w}_{i,j} + \sum_k a_k v_{i,k} \right) \underline{\varphi}_i \geq \underline{[i]} m_b \\ \left( \sum_j s_j \overline{w}_{i,j} + \sum_k a_k v_{i,k} \right) \overline{\varphi}_i \leq \overline{[i]} m_b \end{array} \right. \quad (15)$$

Além disso, há a condição de contorno adicional, equação (16), proveniente do balanço de massa global, em que a soma das cargas das j-ésimas sucatas e k-ésimas adições deve ser no mínimo igual à massa do banho desejada.

$$\sum_j s_j \phi_j + \sum_k a_k \psi_k \geq m_b \quad (16)$$

Os termos  $\phi_j$  e  $\psi_k$  representam as eficiências metálicas das j-ésimas sucatas e k-ésimas adições, respectivamente, surgindo da soma ponderada das eficiências metálicas dos i-ésimos elementos multiplicados pelas respectivas composições químicas  $w_{i,j}$  e  $v_{i,k}$ . Para o termo  $\phi_j$ , foi-se utilizada a média dos valores mínimo e máximo obtidos a partir dos valores difusos de  $w_{i,j}$ .

Para a resolução deste modelo, utilizou-se o algoritmo de programação linear, que será apresentado no item 4.3.2. Seu funcionamento ocorre com a construção da matriz do problema, onde se busca o pivô da coluna com menor coeficiente positivo na função de minimização. Seu valor na função de minimização é reduzido ao máximo, dentro dos limites das condições de contorno. Esse procedimento é repetido até que todos os coeficientes da função de otimização sejam negativos (convergência), ou até que sejam detectadas, ou as iterações se repitam *ad infinitum*, ou até a divergência.

#### 4.2.3. Otimização da Composição

Segundo TAGUCHI, ELSAYED e HSIANG, 1990, a qualidade de um processo Z possui um comportamento aproximadamente quadrático, relacionando o afastamento da variável medida X de sua meta Y, conforme equação (17):

$$Z = T'(Y - X)^2 \quad (17)$$

Para mais de uma variável monitorada, é realizada a soma dos seus termos, como é visto na equação (18):

$$Z = \sum_i T'_i (Y_i - X_i)^2 \quad (18)$$

O coeficiente  $T'$ , que faz a transcrição entre a variável mensurada e seu valor comercial, é definido pela razão entre sua importância relativa e seu limite de especificação, sendo sua importância relativa igual à perda, em unidades monetárias, que o processo implica caso esteja fora de especificação, conforme equação (19):

$$T'_i = \frac{R_i}{(Y_i \pm \Delta_i)^2} \quad (19)$$

Dessa forma, o modelo para a etapa de *Otimização* do forno é definido de acordo com a função de perda de Taguchi, equação (20), onde o termo  $R_i$  representa a importância relativa do  $i$ -ésimo elemento.

$$Z = \sum_i \frac{R_i}{\left(\frac{[\bar{i}] - [\underline{i}]}{2}\right)^2} \left(\frac{([\underline{i}] + [\bar{i}])/2 - [i]}{1}\right)^2 \quad (20)$$

Realizando-se um balanço de massa na fase do banho, tem-se que sua massa,  $m_b$ , é o resultado da soma entre sua massa inicial,  $m_b^i$ , e as  $k$ -ésimas adições,  $m_k$ , subtraída a massa que reage,  $m_r$ , equação (21):

$$m_b = m_b^i + \sum_k m_k - m_r \quad (21)$$

Ao se aplicar a equação (21) de forma parcial, usando-se as equações (7) e (9) para representar as massas que reagem e isolando-se a fração mássica total, chega-se à composição química do  $i$ -ésimo elemento na fase do banho para óxidos sólidos e gasosos, respectivamente, segundo as equações (22) e (23).

$$[i] = \frac{m_b^i}{m_b^f} [i]^i + \sum_{k=1}^K \frac{m_k}{m_b^f} v_{i,k} - \left( \frac{m_b^i}{m_b^f} [O]^i - [O]^f \right) \frac{\bar{M}_i n_{O,i}}{n_i \bar{M}_O} \frac{n_{O,i}(i)}{\sum_{i'} n_{O,i'}(i')} \quad (22)$$

$$[i] = \frac{m_b^i}{m_b^f} [i]^i + \sum_{k=1}^K \frac{m_k}{m_b^f} v_{i,k} - \frac{K_i [i]^{n_i} [O]^{n_{O,i}} V \bar{M}_{O,i}}{n_i RT} \quad (23)$$

Para a resolução do modelo aqui desenvolvido, empregou-se o algoritmo de otimização baseado no vetor gradiente, que será apresentado no item 4.3.2. A função de perda de Taguchi, dentro dos limites das condições de contorno, é convexa com um ponto de mínimo global. Iniciando-se da origem, procede-se em direção ao ponto de mínimo através do sentido oposto ao do vetor gradiente normalizado, calculado a cada iteração. Esse procedimento é repetido até que se cumpra o critério de precisão numérica especificado.

### 4.3. Metodologia de Cálculo

A seguir será apresentada a metodologia de cálculo para os três modelos numéricos elaborados no item anterior. Os subitens seguintes apresentam as especificações técnicas deste exemplo pedagógico e seguem a ordem dos modelos, abordando a rotina de cálculo necessária para a sua resolução.

#### 4.3.1. Contextualização do Cenário

Seja uma Fundição que deseja produzir uma liga ferrosa designada “Produto”, possuindo sua própria norma de especificação química. Ao seu dispor, no seu “Pátio de Sucatas”, se encontram as sucatas nomeadas por “Sucata 1” e “Sucata 2”, cujas composições químicas foram aproximadas por mínimos e máximos. Ainda, a Fundição possui adições de “Adição 1” e “Adição 2”, de composições conhecidas, em seu “Inventário”. As produções do forno ocorrem a 1200 °C, em uma carga total de 1000 kg. Há abundância de matérias-primas e insumos.

As composições químicas acima anunciadas seguem na Tabela 1 Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 – Informações Técnicas do Exemplo da Metodologia de Cálculo

		C	Si	Fe	Custo (R\$ / kg)
Produto (P)	Min	2,00	2,50	96,50	-
	Máx	2,50	4,00	94,50	
Sucata 1 ( $s_1$ )	Min	1,00	2,00	97,00	0,25
	Máx	1,25	3,00	95,75	
Sucata 2 ( $s_2$ )	Min	1,50	1,50	97,00	0,20
	Máx	2,00	2,50	95,50	
Adição 1 ( $a_1$ )		100,00	-	-	3,00
Adição 2 ( $a_2$ )		5,00	35,00	60,00	3,50

### 4.3.2. Fluxogramas de Resolução

O fluxograma para resolução do modelo de *Carregamento* se encontra na Figura 9.

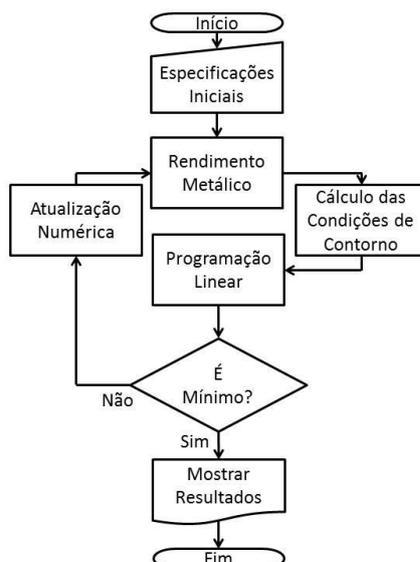


Figura 9 – Fluxograma para resolução do modelo de carregamento.

Primeiramente, as especificações iniciais são ajustadas dentro do modelo. Em seguida, o algoritmo entra no laço de resolução, que se inicia com o cálculo do rendimento metálico para cada elemento. O rendimento metálico então é usado para obter as condições de contorno, que mudam ligeiramente a cada iteração. Uma vez reajustadas as condições de contorno, é empregada a programação linear. Caso haja

verificação de que ainda não se chegou ao valor mínimo da função objetivo, é realizada uma atualização numérica, e o laço é retomado. Caso contrário, o laço é encerrado e os resultados são mostrados.

Para a resolução do modelo de *Otimização*, usa-se o algoritmo da Figura 10. As especificações iniciais são ajustadas em um primeiro momento. Em seguida o algoritmo entra no laço de resolução numérica, em que os rendimentos metálicos dos *i*-ésimos elementos são calculados. Após, é empregado um passo numérico do método de otimização baseado no vetor gradiente da função a ser minimizada. Finalmente, é verificada a convergência no ponto de mínimo. Caso o ponto de mínimo não seja verificado, é realizada uma atualização numérica e o laço é reiniciado. Em caso contrário, o laço é finalizado e os resultados são disponibilizados.

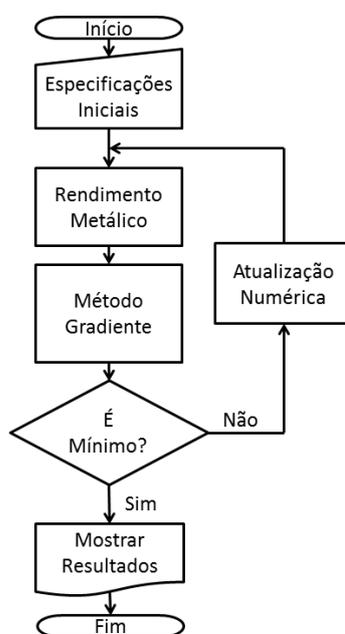


Figura 10 - Fluxograma de resolução para o modelo de otimização.

### 4.3.3. Considerações Químicas

Antes do emprego das equações dos modelos, para este exemplo, há de se levar em conta as considerações químicas a seguir:

- Não há escória inicial.
- A temperatura do banho será considerada constante.

- O Oxigênio inicial dissolvido na fase do banho será considerado o maior valor dentre as reações de equilíbrio deste com os demais elementos da fase do banho e escória.
- O Oxigênio final dissolvido na fase do banho é o menor valor dentre as reações de equilíbrio deste com os elementos da fase banho e escória nas composições finais desejadas.
- As equações de equilíbrio são as que seguem abaixo, onde  $K_i$  é a constante da reação do i-ésimo elemento:



Dessa forma, os cálculos seguem nos demais itens.

#### 4.3.4. Modelo Numérico de Rendimento Metálico

Para o modelo de rendimento metálico na equação (24), tem-se dois possíveis valores, a saber, um mínimo e um máximo nas equações (25) para o Silício, e nas equações (26) para o Carbono, respectivamente. Eles surgem dos dois valores possíveis para a composição química adicionada, quando se consideram os limites de composição desconhecida das sucatas.

$$\varphi_i = 1 - \frac{m_{r,i}}{m_{a,i}} \quad (24)$$

$$\underline{\varphi}_{Si} = 1 - \frac{m_{r,Si}}{m_{a,Si}} \quad \overline{\varphi}_{Si} = 1 - \frac{m_{r,Si}}{m_{a,Si}} \quad (25)$$

$$\underline{\varphi}_C = 1 - \frac{m_{r,C}}{m_{a,C}} \quad \overline{\varphi}_C = 1 - \frac{m_{r,C}}{m_{a,C}} \quad (26)$$

As massas que reagem, tanto do Silício quanto do Carbono, seguem nas equações (27) e (28).

$$m_{r,Si} = m_b([O]^i - [O]) \frac{\bar{M}_{Si}}{\bar{M}_O} \frac{n_{Si}}{n_{O,Si}} \left( \frac{n_{O,Si}(Si)}{n_{O,Si}(Si) + n_{O,Fe}(Fe)} \right) \quad (27)$$

$$\dots = (1000 \text{ kg})([O]^i - [O]) \left( \frac{28,00}{16,00} \right) \left( \frac{1}{2} \right) \left( \frac{2(Si)}{2(Si) + 1(Fe)} \right)$$

$$m_{r,C} = \frac{K_C [C]^{n_C} [O]^{n_{O,C}} \bar{M}_{O,C}}{n_C RT} \quad (28)$$

$$\dots = \frac{K_C [C]^1 [O]^1 (22,4 \text{ L}) \left( 28,0 \frac{\text{kg}}{\text{kgmol}} \right)}{(1)(0,082 \text{ atm L K}^{-1} \text{ kgmol}^{-1})(1473 \text{ K})}$$

Já para as massas adicionadas máxima e mínima, elas seguem para o Silício nas equações (29), e para o Carbono nas equações (30).

$$\begin{aligned} \underline{m_{a,Si}} &= \underline{w_{Si,1}}s_1 + \underline{w_{Si,2}}s_2 & \overline{m_{a,Si}} &= \overline{w_{Si,1}}s_1 + \overline{w_{Si,2}}s_2 & (29) \\ &+ v_{Si,1}a_1 + v_{Si,2}a_2 & &+ v_{Si,1}a_1 + v_{Si,2}a_2 \\ \dots &= \frac{2,00s_1 + 1,50s_2 + 0,00a_1 + 35,00a_2}{100,00} & \dots &= \frac{3,00s_1 + 2,50s_2 + 0,00a_1 + 35,00a_2}{100,00} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{m_{a,C}} &= \underline{w_{C,1}}s_1 + \underline{w_{C,2}}s_2 & \overline{m_{a,C}} &= \overline{w_{C,1}}s_1 + \overline{w_{C,2}}s_2 & (30) \\ &+ v_{C,1}a_1 + v_{C,2}a_2 & &+ v_{C,1}a_1 + v_{C,2}a_2 \\ \dots &= \frac{1,00s_1 + 1,50s_2 + 100,00a_1 + 5,00a_2}{100,00} & \dots &= \frac{1,25s_1 + 2,00s_2 + 100,00a_1 + 5,00a_2}{100,00} \end{aligned}$$

#### 4.3.5. Modelo Numérico de Carregamento do Forno

A função a ser minimizada no modelo numérico de carregamento do forno se encontra na equação (31). Realizando a abertura dos somatórios e aplicando os valores de cada variável, chega-se na equação (32).

$$F = \sum_j s_j c_j + \sum_k a_k d_k \quad (31)$$

$$F = s_1 c_1 + s_2 c_2 + a_1 d_1 + a_2 d_2 \quad (32)$$

$$\dots = (s_1 0,25 + s_2 0,20 + a_1 3,00 + a_2 3,50) \frac{\$}{\text{kg}}$$

A função deste modelo numérico se encontra limitada pelas inequações da equação (33) que, quando aplicadas ao Silício e ao Carbono, resultam nas inequações da equação (34).

$$\begin{cases} \left( \sum_j s_j \underline{w}_{i,j} + \sum_k a_k v_{i,k} \right) \underline{\varphi}_i \geq \underline{[i]} m_b \\ \left( \sum_j s_j \overline{w}_{i,j} + \sum_k a_k v_{i,k} \right) \overline{\varphi}_i \leq \overline{[i]} m_b \end{cases} \quad (33)$$

$$\begin{cases} \left( s_1 \underline{w}_{Si,1} + s_2 \underline{w}_{Si,2} + a_1 v_{Si,1} + a_2 v_{Si,2} \right) \underline{\varphi}_{Si} \geq \underline{[Si]} m_b \\ \left( s_1 \overline{w}_{Si,1} + s_2 \overline{w}_{Si,2} + a_1 v_{Si,1} + a_2 v_{Si,2} \right) \overline{\varphi}_{Si} \leq \overline{[Si]} m_b \end{cases} \quad (34)$$

$$\begin{cases} \left( s_1 \underline{w}_{C,1} + s_2 \underline{w}_{C,2} + a_1 v_{C,1} + a_2 v_{C,2} \right) \underline{\varphi}_C \geq \underline{[C]} m_b \\ \left( s_1 \overline{w}_{C,1} + s_2 \overline{w}_{C,2} + a_1 v_{C,1} + a_2 v_{C,2} \right) \overline{\varphi}_C \leq \overline{[C]} m_b \end{cases}$$

⋮

$$\begin{cases} \left( \frac{s_1 2,00 + s_2 1,50 + a_1 0,00 + a_2 35,00}{100,00} \right) \underline{\varphi}_{Si} \geq \frac{2,50}{100,00} 1000 \text{ kg} \\ \left( \frac{s_1 3,00 + s_2 2,50 + a_1 0,00 + a_2 35,00}{100,00} \right) \overline{\varphi}_{Si} \leq \frac{4,00}{100,00} 1000 \text{ kg} \\ \left( \frac{s_1 1,00 + s_2 1,50 + a_1 100,00 + a_2 5,00}{100,00} \right) \underline{\varphi}_C \geq \frac{2,00}{100,00} 1000 \text{ kg} \\ \left( \frac{s_1 1,25 + s_2 2,00 + a_1 100,00 + a_2 5,00}{100,00} \right) \overline{\varphi}_C \leq \frac{2,50}{100,00} 1000 \text{ kg} \end{cases}$$

Para terminar o balanço, usa-se a inequação global de massa, conforme a equação (35). Quando seus somatórios são abertos, chega-se na inequação da equação (36).

$$\sum_j s_j \phi_j + \sum_k a_k \psi_k \geq m_b \quad (35)$$

$$s_1 \phi_j + s_2 \phi_j + a_1 \psi_k + a_2 \psi_k \geq 1000 \text{ kg} \quad (36)$$

#### 4.3.6. Modelo Numérico de Otimização da Composição Química

Para o modelo numérico de otimização da composição química, tem-se a sua função a ser minimizada em (37). Expandindo seu somatório para os elementos do problema, chega-se na equação em (38).

$$Z = \sum_i \frac{R_i}{\left(\frac{[\bar{i}] - [i]}{2}\right)^2} \left(\frac{([\underline{i}] + [\bar{i}])}{2} - [i]\right)^2 \quad (37)$$

$$Z = \frac{R_{Si}}{\left(\frac{[\bar{Si}] - [Si]}{2}\right)^2} \left(\frac{([\underline{Si}] + [\bar{Si}])}{2} - [Si]\right)^2 \quad (38)$$

$$+ \frac{R_C}{\left(\frac{[\bar{C}] - [C]}{2}\right)^2} \left(\frac{([\underline{C}] + [\bar{C}])}{2} - [C]\right)^2$$

$$\dots = \frac{1}{\left(\frac{(4,00-2,50)}{100,00}\right)^2} \left(\frac{(2,50 + 4,00)}{100,00}\right) / 2 - [Si]\right)^2$$

$$+ \frac{R_C}{\left(\frac{(2,50-2,00)}{100,00}\right)^2} \left(\frac{(2,00 + 2,50)}{100,0}\right) / 2 - [C]\right)^2$$

A concentração de Silício é calculada pela equação (39).

$$[i] = \frac{m_b^i}{m_b^f} [i]^i + \sum_{k=1}^K \frac{m_k}{m_b^f} v_{i,k} - \left(\frac{m_b^i}{m_b^f} [O]^i - [O]^f\right) \frac{\bar{M}_i n_{O,i}}{n_i \bar{M}_O} \frac{n_{O,i}(i)}{\sum_{i'} n_{O,i'}(i')} \quad (39)$$

$$[Si] = \frac{m_b^i}{m_b^f} [Si]^i + \frac{a_1}{m_b^f} v_{Si,1} + \frac{a_2}{m_b^f} v_{Si,2}$$

$$- \left(\frac{m_b^i}{m_b^f} [O]^i - [O]^f\right) \frac{\bar{M}_{Si} n_{Si}}{\bar{M}_O n_{O,Si}} \left(\frac{n_{O,Si}(Si)}{n_{O,Si}(Si) + n_{O,Fe}(Fe)}\right)$$

$$\dots = \frac{1000,0 \text{ kg}}{m_b^f} [Si]^i + \frac{a_1}{m_b^f} 0,0 + \frac{a_2}{m_b^f} \frac{35,0}{100,0}$$

$$- \left(\frac{1000,0 \text{ kg}}{m_b^f} [O]^i - [O]^f\right) \frac{35,0}{16,0} \frac{1}{2} \left(\frac{2(Si)}{2(Si) + 1(Fe)}\right)$$

Para o Carbono, a sua concentração é calculada de acordo com a equação (40).

$$[i] = \frac{m_b^i}{m_b^f} [i]^i + \sum_{k=1}^K \frac{m_k}{m_b^f} v_{i,k} - \frac{K_i [i]^{n_i} [O]^{n_{O,i}} \bar{V} \bar{M}_{O,i}}{n_i RT} \quad (40)$$

$$[C] = \frac{m_b^i}{m_b^f} [C]^i + \frac{a_1}{m_b^f} v_{C,1k} + \frac{a_2}{m_b^f} v_{C,2} - \frac{K_C [C]^{n_C} [O]^{n_{O,C}} \overline{VM}_{O,C}}{n_C RT}$$

$$[C] = \frac{1000,0 \text{ kg}}{m_b^f} [C]^i + \frac{a_1}{m_b^f} \frac{100,0}{100,0} + \frac{a_2}{m_b^f} \frac{5,0}{100,0}$$

$$- \frac{K_C [C]^1 [O]^1 (22,4 \text{ L}) \left(28,0 \frac{\text{kg}}{\text{kgmol}}\right)}{(1)(0,082 \text{ atm L K}^{-1} \text{kgmol}^{-1})(1473 \text{ K})}$$

#### 4.4. Aços e Ferro-Fundido Produzidos

Os aços e ferro-fundido produzidos com o forno industrial são as ligas SAE 1030 Modificada (aqui chamada de SAE 1030M), SAE 1030, SAE 1045 e Ferro Fundido Branco Alto Cromo (FFBAC), cujas especificações químicas de Carbono, Silício, Manganês e Cromo se encontram na Tabela 3. Para o elemento Ferro, considerar o balanço complementar dos elementos.

Tabela 3 – Especificações Químicas de Carbono, Silício, Manganês e Cromo nas Ligas Produzidas pela Empresa

Liga	Especificação							
	%C		%Si		%Mn		%Cr	
	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx
SAE 1030M	0,25	0,30	0,40	0,80	0,40	0,70	0,01	0,05
SAE 1045	0,40	0,50	0,20	0,50	0,50	0,90	0,01	0,05
SAE 1030	0,28	0,36	0,20	0,50	0,60	1,00	0,01	0,05
FFBAC	2,00	3,30	0,10	2,20	0,10	1,10	17,00	24,00

#### 4.5. Matérias-Primas e Insumos

Para a produção dos aços contidos no item 4.4, são utilizadas sucatas provenientes de estamparias, sendo elas classificadas nos tipos Comum, Manganês, Ferro-Cromo, Inox 300 e Inox 400, cujas composições de Carbono, Silício, Manganês e Cromo estão presentes na Tabela 4. Para o elemento Ferro, considerar o balanço complementar dos elementos.

Tabela 4 – Especificações Químicas de Carbono, Silício, Manganês e Cromo nas Sucatas Utilizadas

Sucata	Especificação							
	%C		%Si		%Mn		%Cr	
	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx
Comum	0,10	0,50	0,12	0,40	0,30	0,80	0,12	0,40
Manganês	0,90	1,350	0,40	0,80	10,00	13,00	0,90	2,50
Cromo	1,80	3,10	0,30	0,70	0,40	0,80	7,00	21,00
Inox 300	0,10	0,40	0,40	1,00	0,60	1,00	14,00	22,00
Inox 400	0,25	0,40	0,40	1,00	0,60	1,00	10,00	15,00

As adições utilizadas para o carregamento e otimização da composição química das fornadas, isto é, Grafita, Ferrosilício (FeSi), Ferromanganês-Alto-Carbono (FeMnAC), Ferromanganês-Médio-Carbono (FeMnMC), Ferrocromo-Alto-Carbono (FeCrAC), Ferrocromo-Baixo-Carbono (FeCrBC) e Ferrocromo-Alto-Carbono-Baixo-Silício (FeCrACBSi), estão contidos na Tabela 5. Para o elemento Ferro, considerar o balanço complementar dos elementos.

Tabela 5 – Especificações Químicas de Carbono, Silício, Manganês e Cromo nas Adições Utilizadas

Adições	Especificação			
	%C	%Si	%Mn	%Cr
Grafita	99,49	0,00	0,00	0,00
FeSi	0,09	77,90	0,00	0,00
FeMnAC	6,44	1,36	74,32	0,00
FeMnMC	1,53	0,73	78,30	0,00
FeCrAC	8,50	2,73	0,95	66,05
FeCrBC	0,06	0,95	0,00	60,00
FeCrACBSi	8,50	0,80	0,00	66,05

#### 4.6. Custos Relativos das Matérias-Primas

Na Figura 11, se encontra o gráfico contendo os custos relativos de cada matéria-prima com relação à sucata comum.

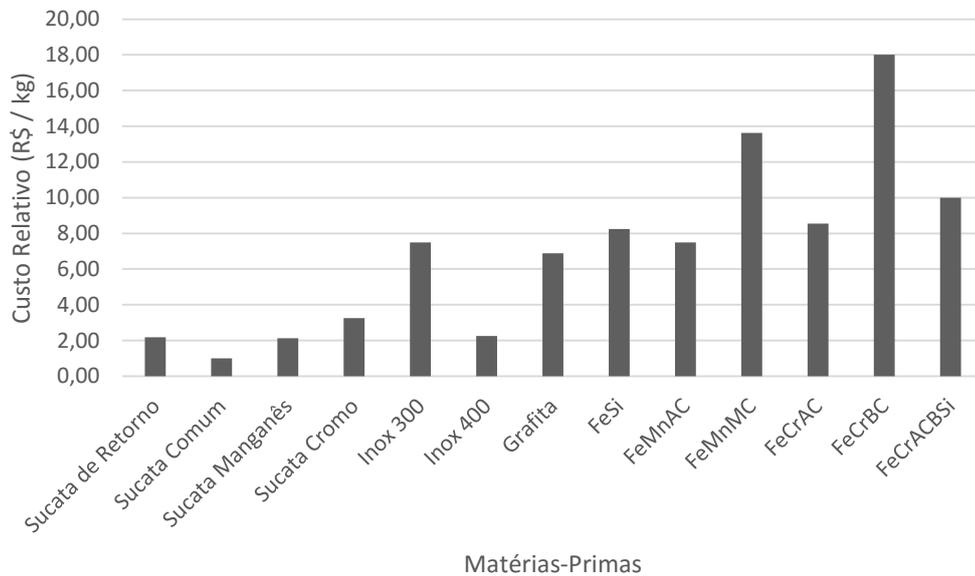


Figura 11 – Custos Relativos de cada matéria-prima.

Dessa forma, tem-se que a Sucata Comum possui custo relativo de R\$ 1 / kg. Com isso, todas as demais sucatas passam a ter seu preço referenciado por ela e, com isso, protege-se a empresa de providenciar quaisquer informação de mercado que ela venha a deter.

#### 4.7. Coleta das Amostras de Escórias

A fim de se utilizarem os modelos aqui desenvolvidos, foram coletadas duas amostras de escórias de 1 kg da liga SAE 1030M de três corridas para fins de análise de composição química. Foi realizada a cominuição prévia das escórias coletadas para análise de fluorescência de raios-x. Para tanto, utilizou-se um moinho de mandíbulas, obtendo-se uma escória moída grosseiramente. Em seguida, a escória foi passada em um moinho de rolos, onde foi possível se obter um fino de granulometria acima da requisitada para análise de fluorescência. Foi-se então realizado o quarticionamento dos

finos. Em seguida, procedeu-se seu peneiramento com mesh 525, para se verificar a necessidade de passar os finos em um moinho de bolas. A massa coletada a partir do peneiramento foi em torno de 10 g para cada amostra, quantidade o suficiente para a análise de fluorescência de raios-x, não tendo havido necessidade de se utilizar o moinho de bolas.

A transformação granulométrica das escórias pode ser observada na Figura 12, onde se vê em 'A' a escória em sua forma bruta, em 'B' os finos do moinho de mandíbulas, em 'C' os finos do moinho de rolos, e em 'D' as amostras após o peneiramento.



Figura 12 – Transformação Granulométrica das Amostras de Escória.

Os resultados da análise de fluorescência de raios-x das amostras de escória coletadas se encontram na Tabela 6 com seus valores numéricos. Para uso nos modelos desenvolvidos a seguir, utilizou-se o valor médio dos resultados da Tabela 6 para a composição da escória.

Tabela 6 – Composição Química (% mássico) das Amostras de Escória da Liga SAE 0030M, junto com a média (M) e o desvio padrão (DV).

Óxidos (%)	Amostras (%)						M <sub>±</sub> DV
	1	2	3	4	5	6	
SiO <sub>2</sub>	72,82	63,23	62,78	63,72	75,40	50,88	64,80 <sub>±</sub> 8,69
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,28	14,08	12,79	12,75	11,00	23,70	14,26 <sub>±</sub> 4,76
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,99	3,40	4,04	3,49	3,16	13,89	5,33 <sub>±</sub> 4,21
MnO	3,40	8,00	10,82	8,64	2,42	4,44	6,29 <sub>±</sub> 3,34
CaO	1,85	5,30	4,11	5,21	1,37	2,29	3,35 <sub>±</sub> 1,74
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	0,06	0,06	0,05	0,03	0,08	0,05 <sub>±</sub> 0,02
Outros	6,61	5,94	5,40	6,15	6,62	4,72	5,91 <sub>±</sub> 0,74

#### 4.8. Metodologia de Validação

A fim de validar os modelos, procedeu-se da maneira constatada nos itens a seguir. Os gráficos dos capítulos 4, Materiais e Métodos, e 5, Resultados e Discussão, se encontram no formato de “*boxplot*”, isto é, gráfico de caixa. Nele, a mediana é marcada com o gráfico de barras; o valor mínimo, com a marca inferior à caixa; o limite inferior do gráfico de caixa marca o primeiro quartil; o limite superior do gráfico de caixa marca o terceiro quartil; e a marca superior marca o valor máximo encontrado para o conjunto de dados.

##### 4.8.1. Coleta dos Dados para Validação

Foram coletados dados em 97 corridas industriais executadas durante o período de seis meses, sendo elas 82 corridas da liga SAE 1030M, 13 corridas da liga SAE 1045 e 1 corrida da liga SAE 1030, e mais 1 corrida da liga FeCr18% executada em abril de 2013.

Na Figura 13, Figura 14 e na Figura 15 a seguir, se encontram as cargas de Carregamento para Sucatas, para Adições e as cargas de Otimização da liga SAE 1030M, respectivamente.

Vê-se que na Figura 13 usou-se apenas Sucata Comum e Sucata de Retorno, porém uma maior quantidade de Sucata Comum. Para as adições, na Figura 14 e para a etapa de Carregamento, usou-se apenas FeSi. A partir dos quartis de ambas as figuras, é possível verificar que as quantidades de Sucata Comum e de Retorno obedeceram uma

distribuição normal, enquanto que a adição de FeSi ao longo das suas 82 corridas foi assimétrica, não obedecendo um padrão de distribuição normal de seu uso.

Já na Figura 15, que ilustra o uso das adições na etapa de Otimização, vê-se que a Grafita possui um padrão de uso de distribuição simétrico, enquanto as adições FeSi, FeMnAC e FeMnMC possuem um padrão de uso assimétrico.

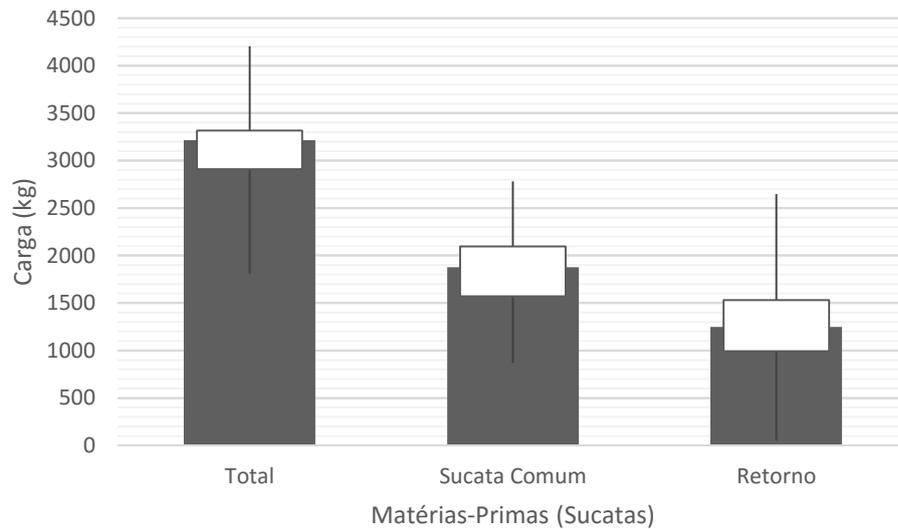


Figura 13 - Cargas do carregamento (sucatas) das 82 corridas da liga 0030.

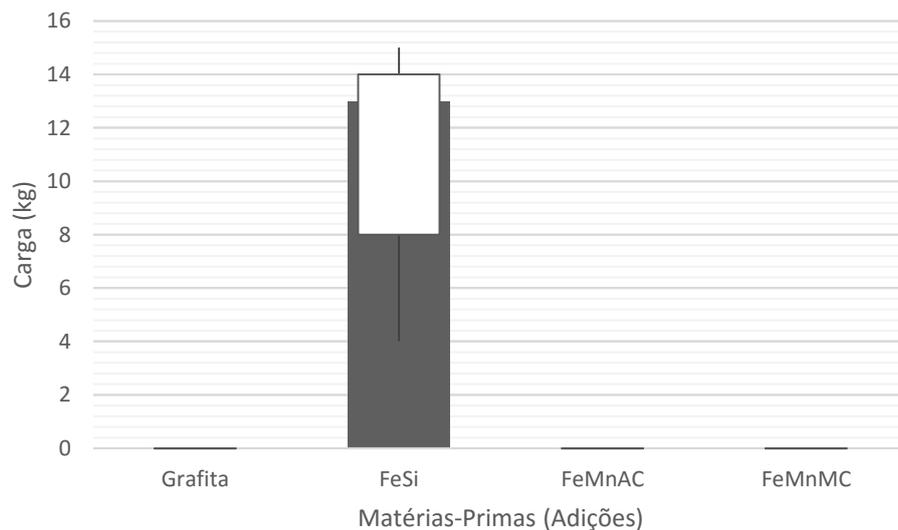


Figura 14 - Cargas do carregamento (adições) das 82 corridas da liga 0030.

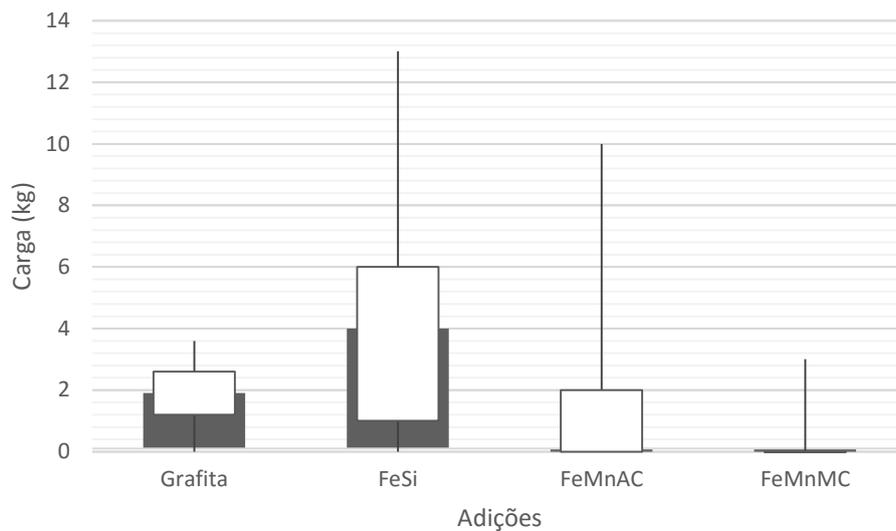


Figura 15 - Cargas da otimização para as 82 corridas da liga 0030.

Na Figura 16 se encontram os custos relativos total e individuais para cada matéria-prima e para a etapa de otimização para a liga SAE 1030M.

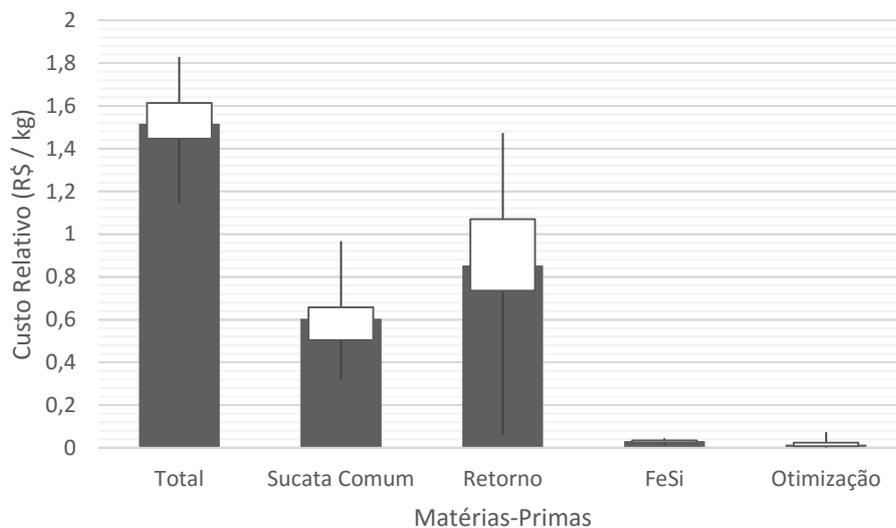


Figura 16 - Custo relativo por kg das cargas das 82 corridas da liga 0030.

Na Figura 17, na Figura 18 e na Figura 19 se encontram as composições químicas do Carbono, Silício e Manganês, respectivamente, sendo elas as previsões mínima e máxima antes do Carregamento, a composição após o Carregamento e, por fim, após a Otimização para a liga 0030.

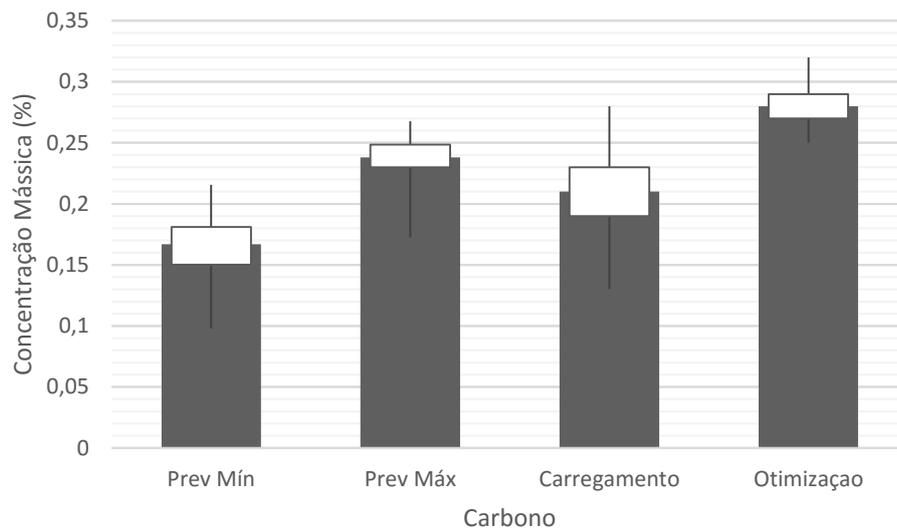


Figura 17 - Composições químicas do carbono prevista e esperada, após o carregamento e após a otimização para as 82 corridas da liga 0030.

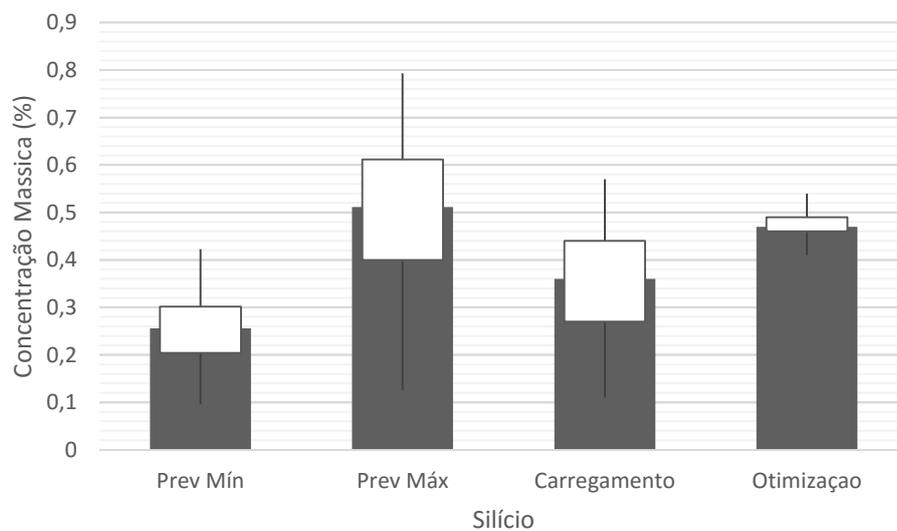


Figura 18 - Composições químicas do silício prevista e esperada, após o carregamento e após a otimização para as 82 corridas da liga 0030.

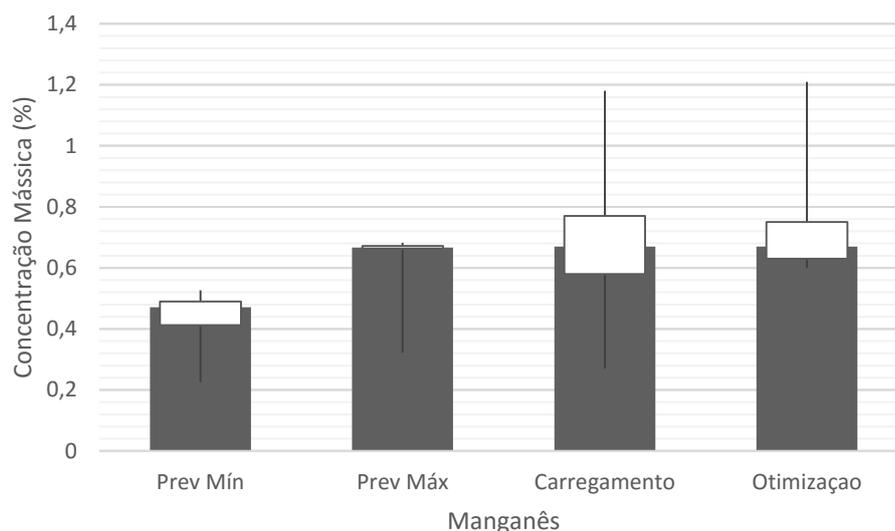


Figura 19 - Composições químicas do manganês prevista e esperada, após o carregamento e após a otimização para as 82 corridas da liga 0030.

Nota-se que os padrões de composição química se comportam como uma distribuição simétrica, com a exceção da composição de previsão máxima e da otimização do Manganês.

Na Figura 20, na Figura 21 e na Figura 22 a seguir, se encontram as cargas de Carregamento para as Sucatas, para as Adições e as cargas de Otimização da liga SAE 1045.

Pela Figura 20, vê-se que a carga total não é composta de forma que tenha um comportamento de distribuição simétrica, apesar de o uso da Sucata Comum seguir um comportamento simétrico. Pela Figura 21, nota-se que o uso do FeSi não possui um comportamento simétrico. Através da Figura 22, vê-se que as adições também não obedecem um comportamento de distribuição simétrico.

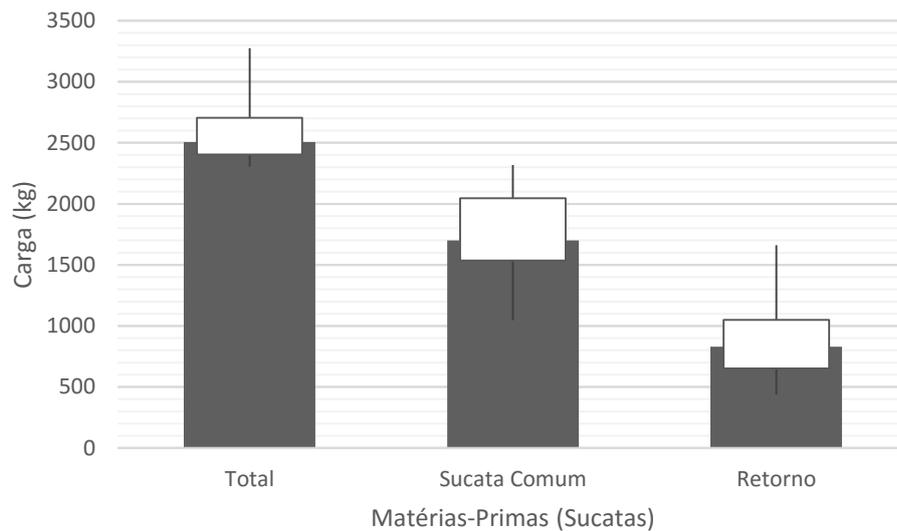


Figura 20 - Cargas do carregamento (sucatas) das 13 corridas da liga SAE 1045.

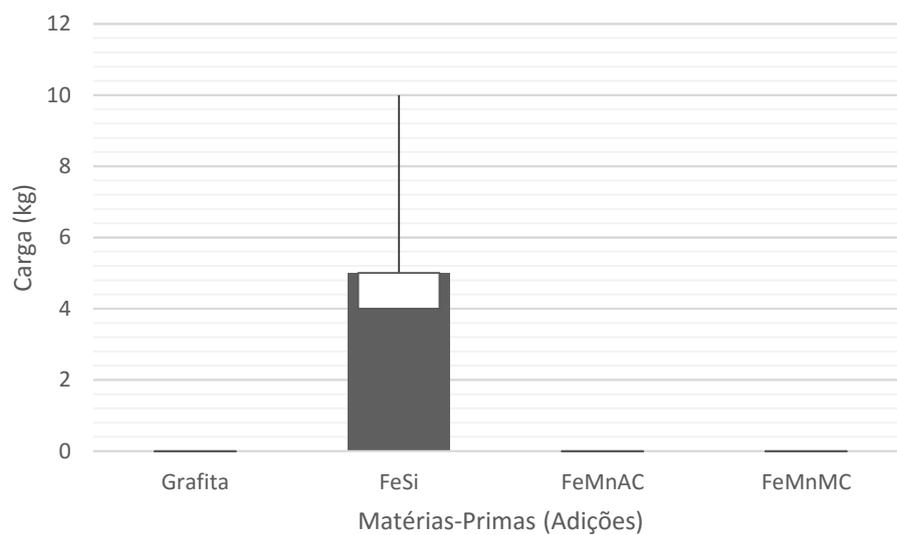


Figura 21 - Cargas do carregamento (adições) das 13 corridas da liga SAE 1045.

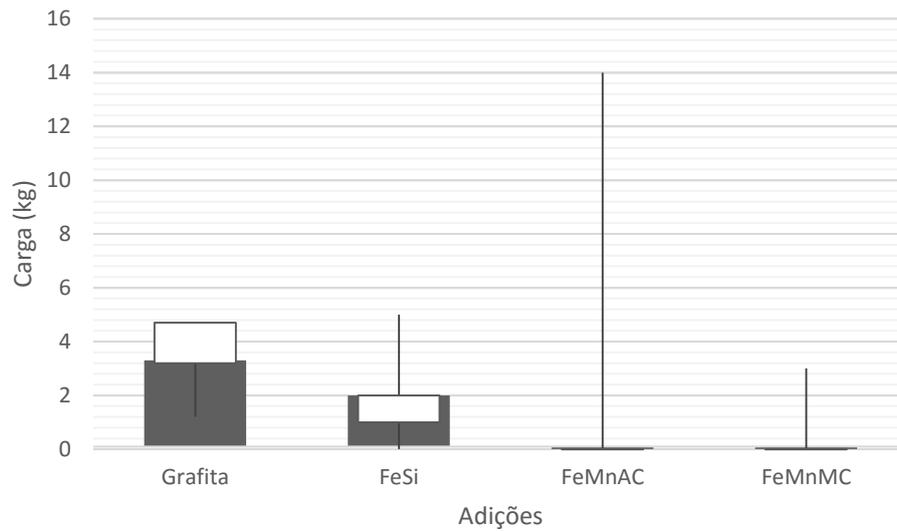


Figura 22 - Cargas da Otimização para as 13 corridas da liga SAE 1045.

Na Figura 23 se encontram os custos relativos total e individuais para cada matéria-prima e para a etapa de otimização para a liga SAE 1045.

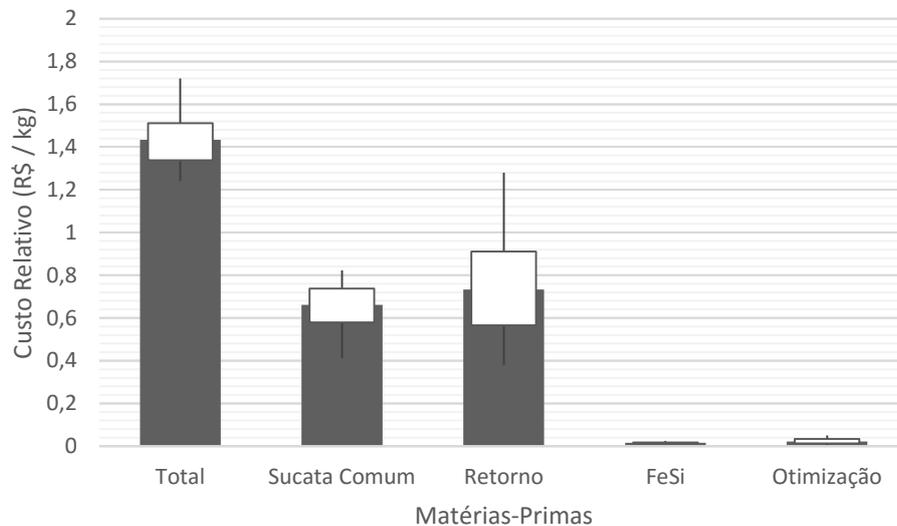


Figura 23 - Custo Relativo por kg das Cargas das 13 Corridas da Liga SAE 1045.

Na Figura 24, na Figura 25 e na Figura 26 se encontram as composições químicas do Carbono, Silício e Manganês, respectivamente, sendo elas as previsões mínima e máxima antes do Carregamento, a composição após o Carregamento e, por fim, após a Otimização para a liga SAE 1045.

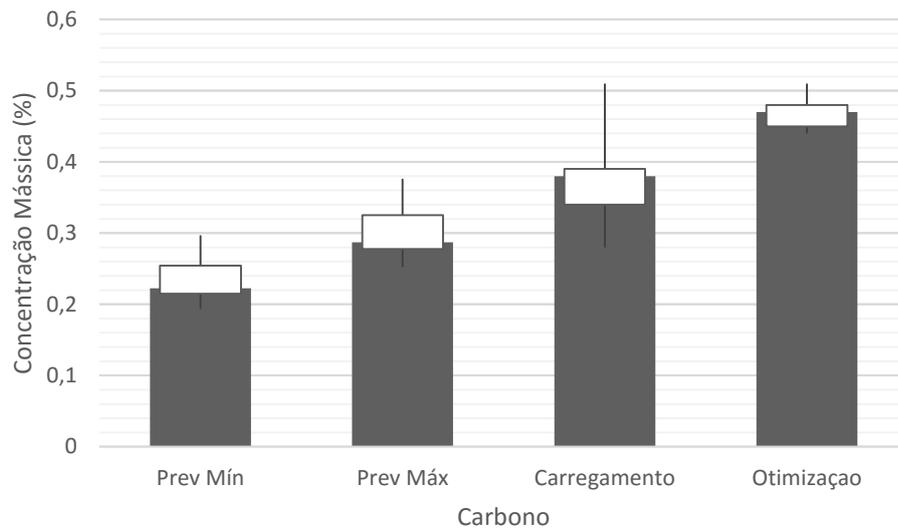


Figura 24 - Composições químicas do carbono prevista e esperada, após o carregamento e após a otimização para as 13 corridas da liga SAE 1045.

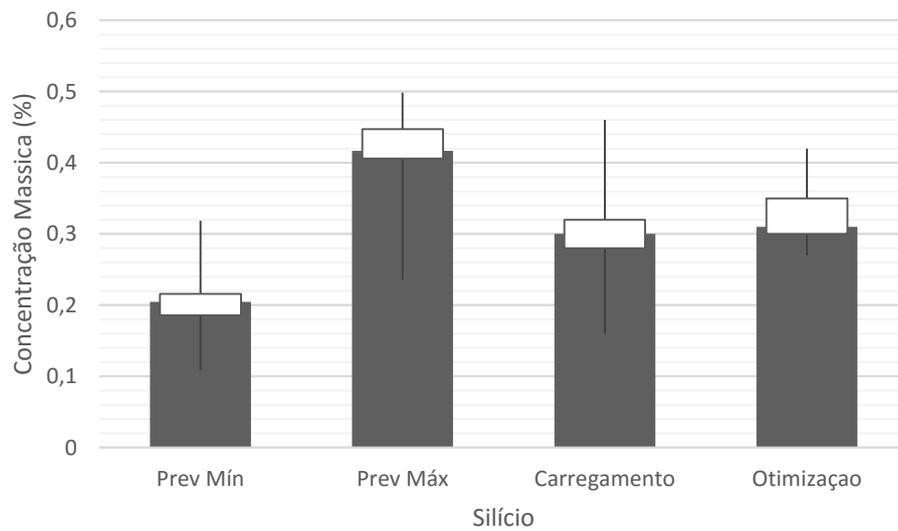


Figura 25 - Composições químicas do silício prevista e esperada, após o carregamento e após a otimização para as 13 corridas da liga SAE 1045.

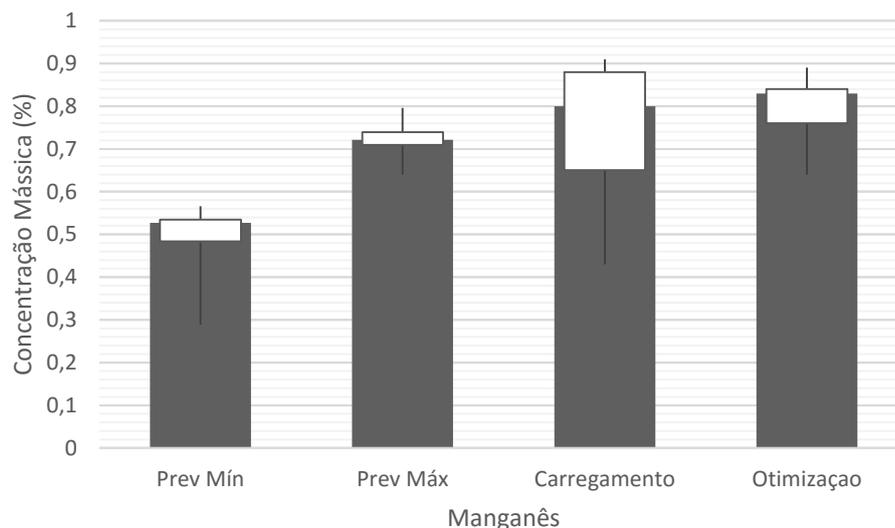


Figura 26 - Composições químicas do manganês prevista e esperada, após o carregamento e após a otimização para as 13 corridas da liga SAE 1045.

Para cada uma das composições, seu padrão de distribuição é aproximadamente simétrico, com exceção da composição após o Carregamento para o Manganês.

#### 4.8.2. Modelo de Rendimento Metálico

Para se avaliar o modelo de rendimento metálico, realizou-se o cálculo das cargas mínima e máxima de cada elemento adicionado, e possuindo-se a composição química de cada corrida antes da otimização, calculou-se as eficiências mínima e máxima obtidas a partir da prática da empresa, apenas para o carregamento. Compararam-se estes valores com os valores previstos pelo modelo, avaliando se estes permaneceram dentro ou próximos da faixa de valores obtidos. Para a concentração de Oxigênio presente no banho na reação com o Carbono, usou-se como valor máximo sua concentração em equilíbrio com este elemento. Para todos os demais, usou-se o valor máximo dentre as concentrações de Oxigênio em equilíbrio com cada elemento.

#### 4.8.3. Modelo de Carregamento

De posse da liga a ser produzida, juntamente com sua carga e escória desejadas, empregou-se o modelo desenvolvido para esta etapa de forma a se obter um carregamento que suprisse a especificação da liga ao mesmo tempo em que o fizesse

com economia financeira de matérias-primas. Para tanto, foram selecionadas todas as sucatas disponíveis no inventário, juntamente com todas as adições disponíveis e permitiu-se que o modelo escolhesse aquelas matérias-primas para compor a carga das ligas SAE 1030M e SAE 1045, limitando a escolha da sucata de retorno da liga produzida a 35% da carga da fornada. Os resultados então foram comparados com o procedimento empregado pela empresa. Empregou-se análise de variância para se verificar a diferença ou equivalência estatística entre os dois métodos.

#### **4.8.4. Modelo de Otimização**

Para esta etapa, foram fornecidas informações de carga da corrida, escória desejada e composição química inicial. Selecionaram-se todas as adições disponíveis no inventário da empresa, permitindo-se que o modelo sugerisse as quantias a serem empregadas. Como composição desejada, inseriu-se o valor da composição química final alcançada pelo emprego da prática atual da empresa. Foram comparados, então, os resultados das cargas utilizadas pela empresa e pelo modelo para as ligas SAE 1030M e SAE 1045, avaliando-se as cargas de cada elemento químico adicionadas pela empresa que foram registradas; que foram calculadas por balanço de massa; e as cargas de cada elemento sugeridas pelo modelo. Para tanto, utilizou-se análise de variância para se verificar a hipótese de equivalência estatística entre ambos os métodos.

#### **4.8.5. Avaliação das Ligas SAE 1030 e FeCr18%**

Com fins de estender a validação dos modelos, empregaram-se as metodologias dos itens 4.9.2 e 4.9.3 para as ligas SAE 1030 e FeCr18% em três cenários: com os custos atuais das sucatas, porém com o preço da sucata comum variando em 0%, 50% e 100%. Esse estudo será feito para verificação de que o modelo numérico de carregamento é dinâmico quanto aos preços das matérias-primas, selecionando os insumos de maneira diferente quando o perfil de custos de uma empresa muda.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir se encontram os resultados e discussão para cada uma das metodologias propostas no capítulo anterior.

### 5.1. Modelo de Eficiência Metálica

Os resultados do modelo de eficiência metálica para o carregamento se encontram na Figura 27 para a liga 0030 e na Figura 28 para a liga SAE 1045, juntamente com as eficiências médias mínimas e máximas calculadas para esta etapa a partir da prática da indústria.

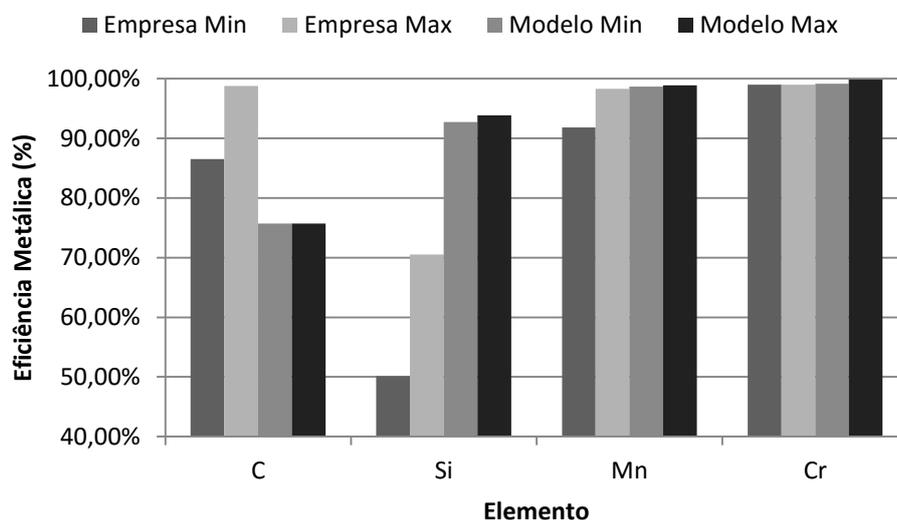


Figura 27 - Média das Eficiências Metálicas Mínimas e Máximas de cada Elemento para a Liga SAE 1030M.

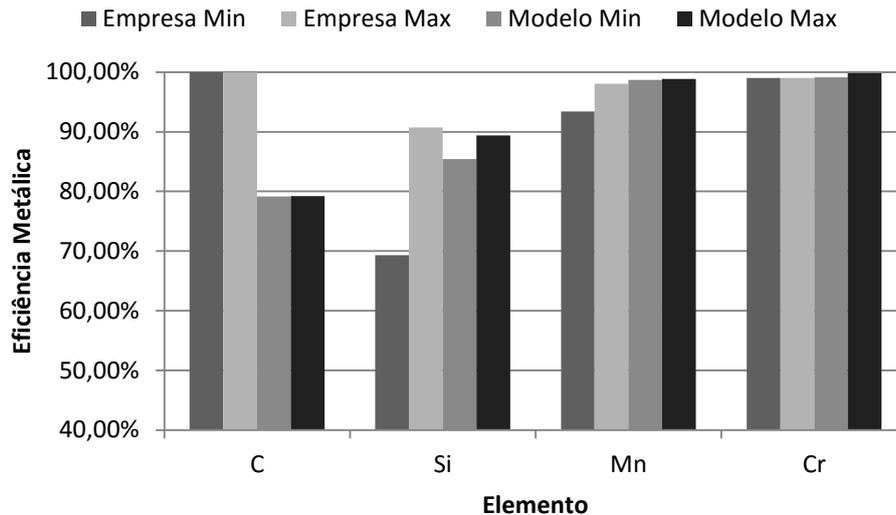


Figura 28 - Média das Eficiências Metálicas Mínimas e Máximas de cada Elemento para a Liga SAE 1045.

É possível notar que as eficiências mínima e máxima da indústria para o Carbono são maiores do que os mesmos valores do modelo para ambas as ligas. Uma explicação para esta disparidade pode estar associada na diferença entre termodinâmica e cinética, isto é, enquanto a primeira permite calcular os limites possíveis para um fenômeno, a segunda fornece seu acompanhamento durante o decorrer do tempo. Ressalta-se que o modelo numérico de rendimento metálico deste trabalho é apenas um balanço de massa.

Além disso, outra explicação pode estar na prática da indústria quanto ao manejo do Carbono com Grafita durante seu processo: Grafita é adicionada conforme a experiência do operador que maneja o forno, sendo adicionada sem que seu registro na planilha de controle seja necessariamente feito. Dessa forma, a eficiência do Carbono sobe.

Vê-se que para os demais elementos (Si, Mn e Cr) os valores foram menores para a empresa do que para o modelo. Dessa forma, a explicação da eficiência da indústria ser menor para esses elementos, em especial para o Si, pode estar associada com repetições de desoxidação e reoxidação do banho, com renovações da escória. Para este trabalho, o número de renovações da escória não foi acompanhado.

## 5.2. Modelo de Carregamento

Na Figura 29 a seguir, se encontram os resultados do modelo para as cargas de Carregamento de sucata da liga 0030. Para as cargas de carregamento de ferroligas, as informações se encontram na Figura 30.

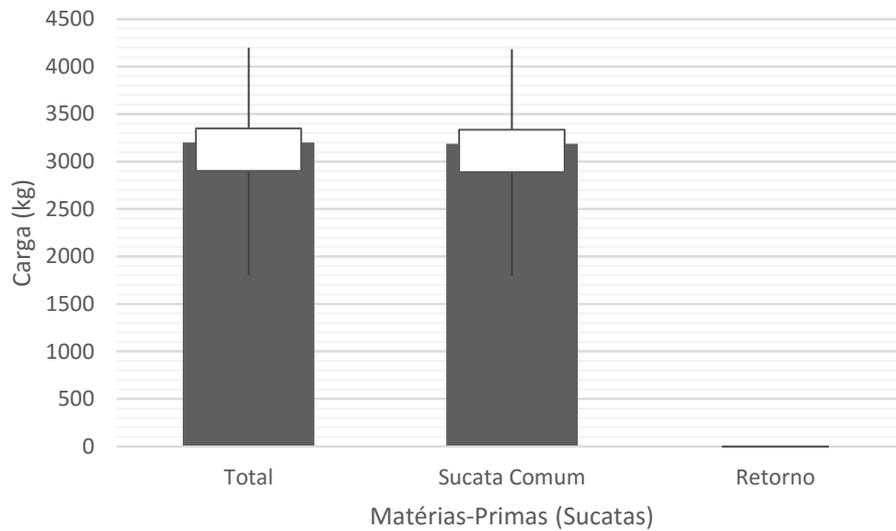


Figura 29 – Resultados do modelo de carregamento para as cargas das sucatas das 82 corridas da liga 0030.

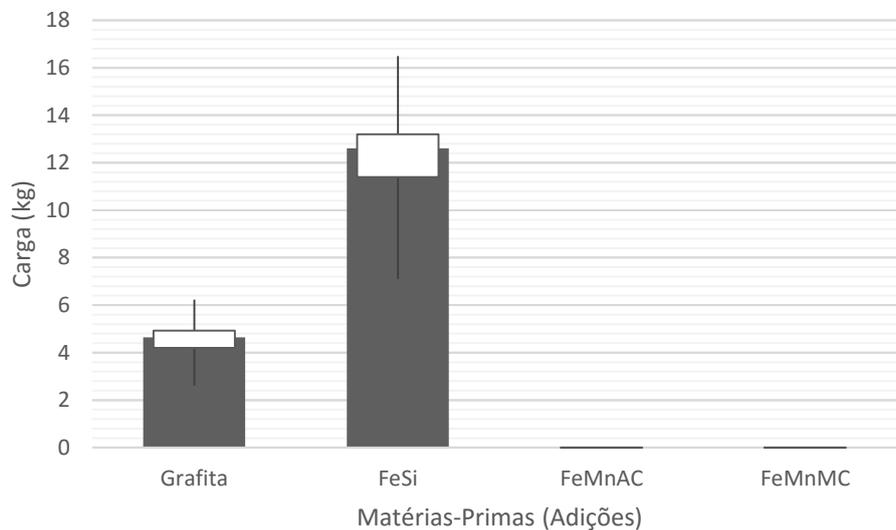


Figura 30 – Resultados do modelo de carregamento para as cargas das adições das 82 corridas da liga 0030

Na Figura 31, se encontram os resultados do custo relativo do Carregamento da liga 0030.

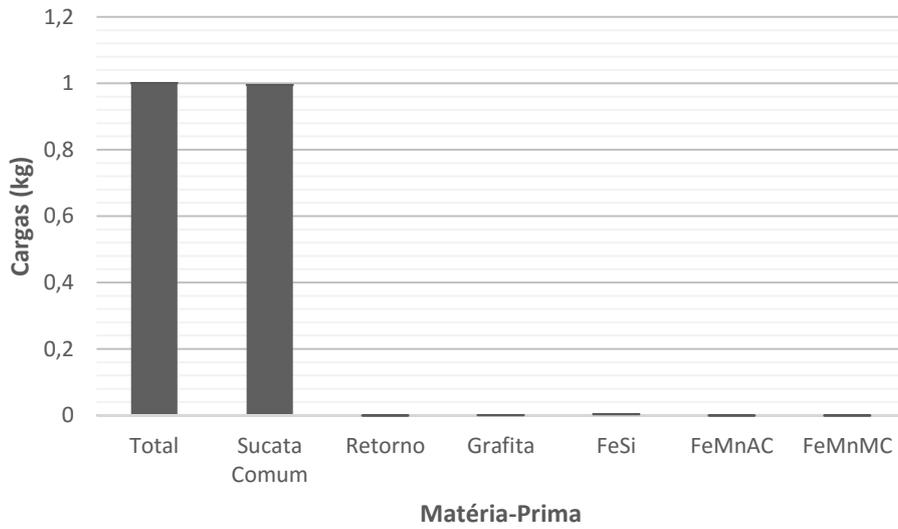


Figura 31 – Resultados do modelo de carregamento para o custo relativo das cargas para as 82 corridas da liga 0030.

Na Figura 32 a seguir, se encontram os resultados do modelo para as cargas de Carregamento de sucata da liga SAE 1045. Para as cargas de Carregamento de adições, os resultados se encontram na Figura 33.

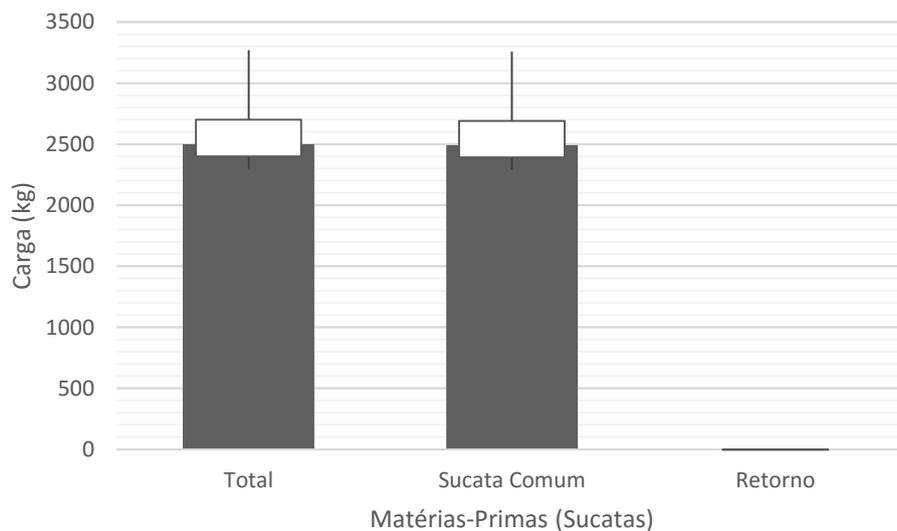


Figura 32 – Resultados do modelo de carregamento para as cargas das sucatas das 13 corridas da liga SAE 1045.

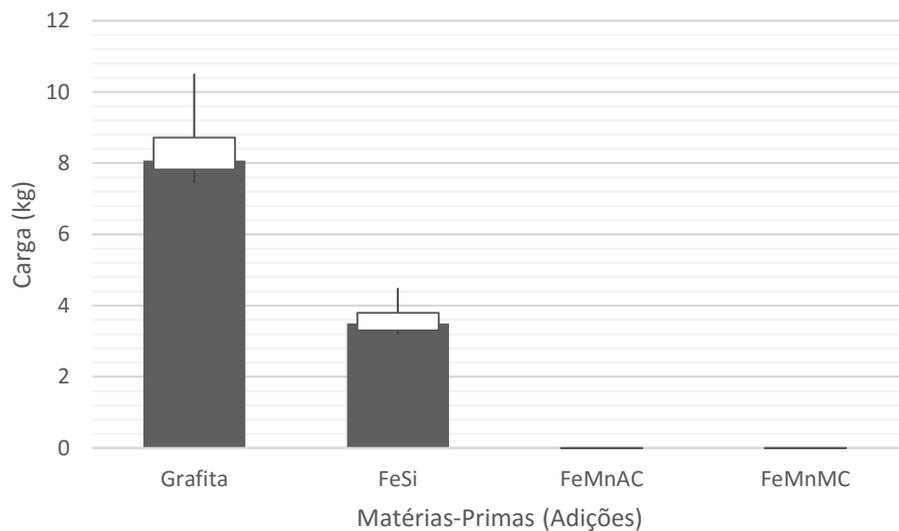


Figura 33 – Resultados do modelo de carregamento para as cargas das adições das 13 corridas da liga SAE 1045.

Na Figura 34, se encontram os resultados do custo relativo do Carregamento da liga SAE 1045.

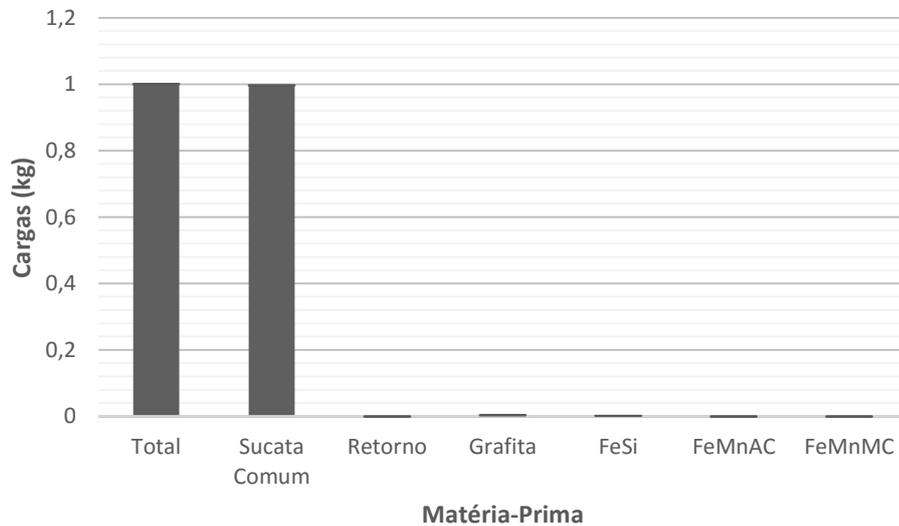


Figura 34 – Resultados do modelo de carregamento para o custo relativo das cargas para as 13 corridas da liga SAE 1045.

A Tabela 7 – Resultados do Carregamento e dos Custos Relativos para a Indústria e o Modelo a seguir demonstra esses mesmos resultados comparados com os resultados da indústria, no formato de média mais ou menos o desvio padrão.

Tabela 7 – Resultados do Carregamento e dos Custos Relativos para a Indústria e o Modelo

Liga	0030		SAE 1045	
Informações	Indústria	Modelo	Indústria	Modelo
Carregamento				
Sucata Comum	1838,1 ± 402,2	3142,4 ± 416,1	1720,3 ± 335,9	2601,8 ± 299,4
Retorno	1307,4 ± 437,2	-	890,2 ± 367,6	-
Grafita	-	4,6 ± 0,6	-	8,4 ± 1,0
FeSi	11,0 ± 3,4	12,4 ± 1,6	5,2 ± 1,6	3,6 ± 0,4
FeMnAC	-	-	-	-
FeMnMC	-	-	-	-
Custo Relativo				
Total	1,53 ± 0,14	1,00 ± 0,00	1,43 ± 0,14	1,00 ± 0,00
Sucata Comum	0,58 ± 0,12	1,00 ± 0,00	0,66 ± 0,12	1,00 ± 0,00
Retorno	0,89 ± 0,26	-	0,73 ± 0,26	-
Grafita	-	< 0,00 ± 0,00	-	< 0,00 ± 0,00
FeSi	0,03 ± 0,01	< 0,00 ± 0,00	0,02 ± 0,00	< 0,00 ± 0,00
FeMnAC	-	-	-	-
FeMnMC	-	-	-	-
Otimização	0,02 ± 0,01	< 0,00 ± 0,00	0,02 ± 0,01	< 0,00 ± 0,00

Nota-se como resultado principal que o modelo selecionou apenas a Sucata Comum como principal constituinte da carga da corrida, juntamente com as adições de Grafita e FeSi para as ligas 0030 e SAE 1045.

O custo relativo de carregamento, quando comparado com o custo relativo obtido pela prática atual da indústria, apresentou significativa redução. Em média, a redução alcançada para a liga 0030 foi de  $30,81 \pm 6,76\%$  e de  $26,67 \pm 7,10\%$  para a liga SAE 1045.

As composições químicas mínima e máxima da liga 0030 que são previstas antes do carregamento, e as composições mínima e máxima que foram atingidas após o carregamento e após a otimização se encontram a seguir na Figura 35 para o Carbono, Figura 36 para o Silício e na Figura 37 para o Manganês.

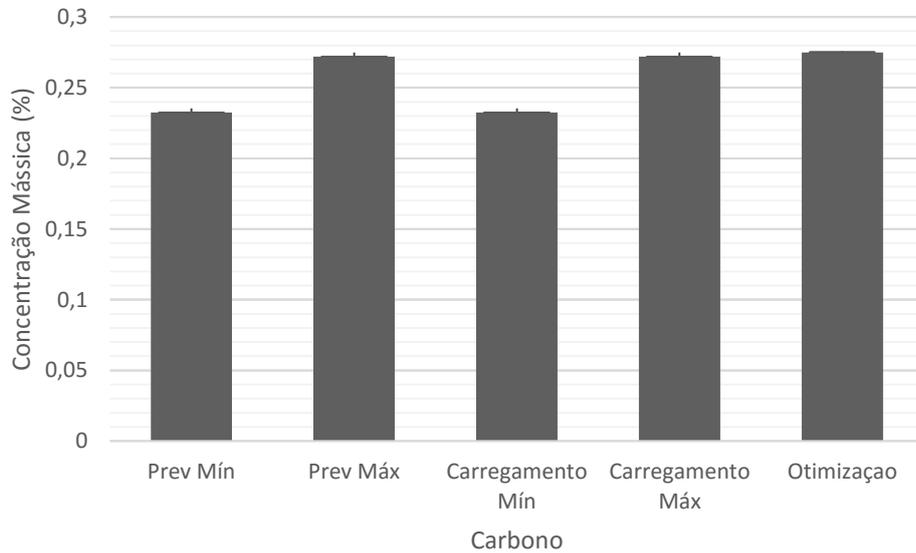


Figura 35 - Composições químicas resultantes do modelo para o Carbono, na liga 0030

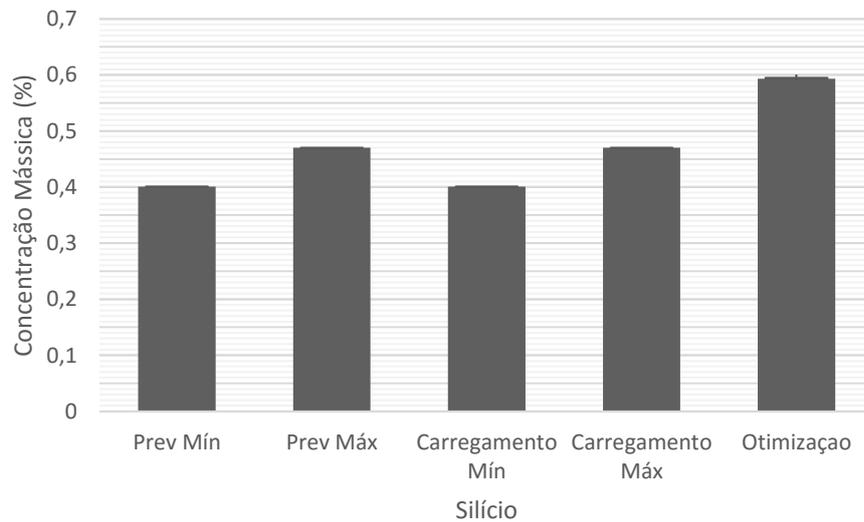


Figura 36 - Composições químicas resultantes do modelo para o Silício, na liga 0030

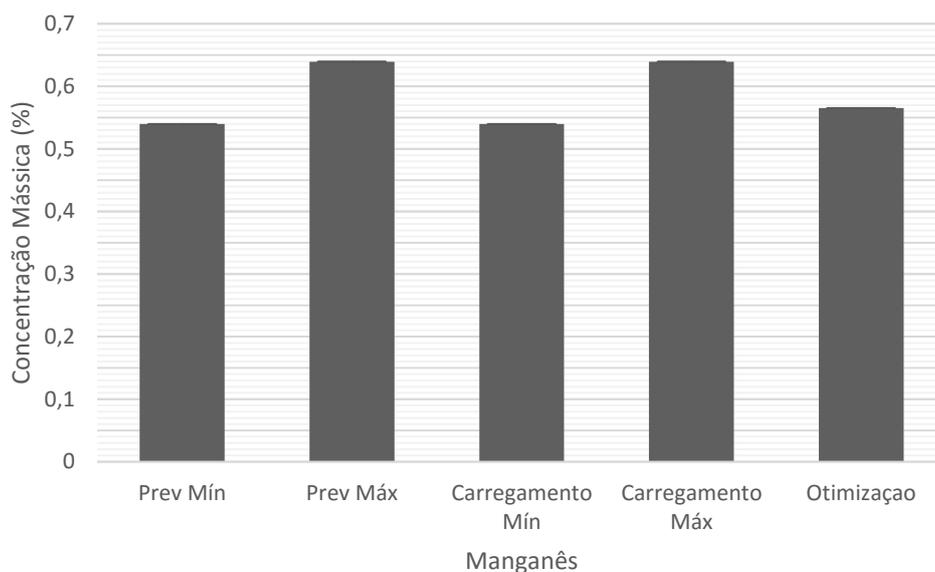


Figura 37 - Composições químicas resultantes do modelo para o Manganês, na liga 0030

Similarmente para a liga SAE 1045, as composições químicas mínima e máxima da que são previstas antes do carregamento, e as composições mínima e máxima que foram atingidas após o carregamento e após a otimização se encontram a seguir na Figura 38 para o Carbono, Figura 39 para o Silício e na Figura 40 para o Manganês.

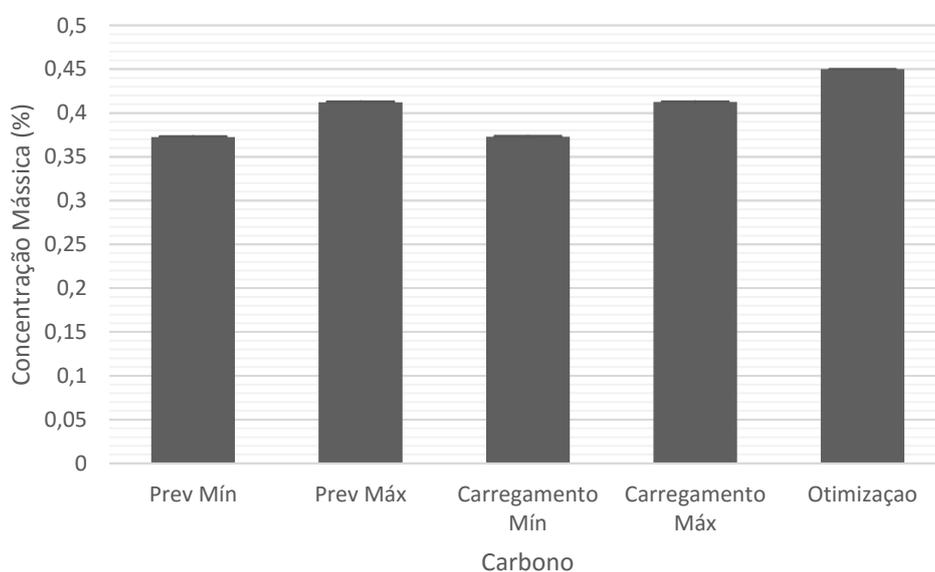


Figura 38 - Composições químicas resultantes do modelo para o Carbono, na liga SAE 1045

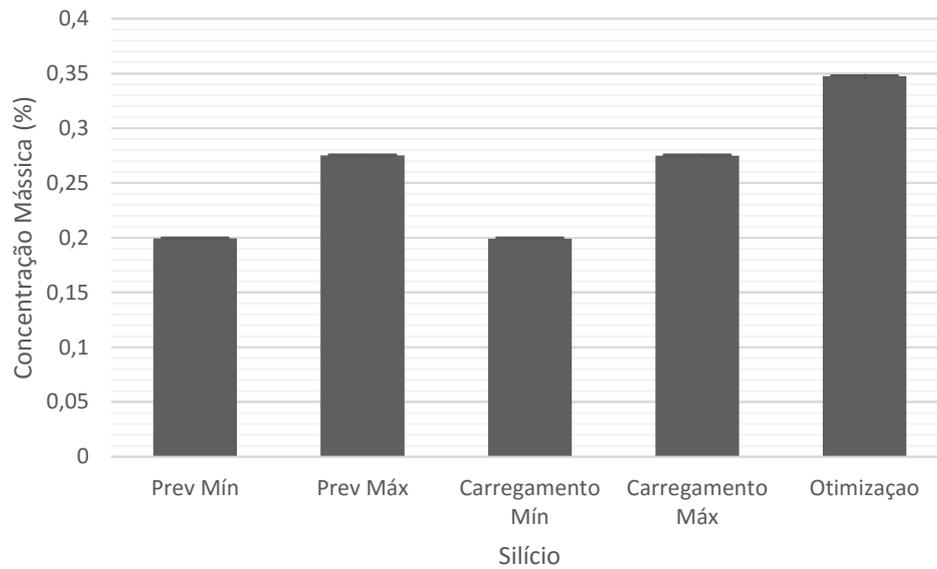


Figura 39 - Composições químicas resultantes do modelo para o Silício, na liga SAE 1045

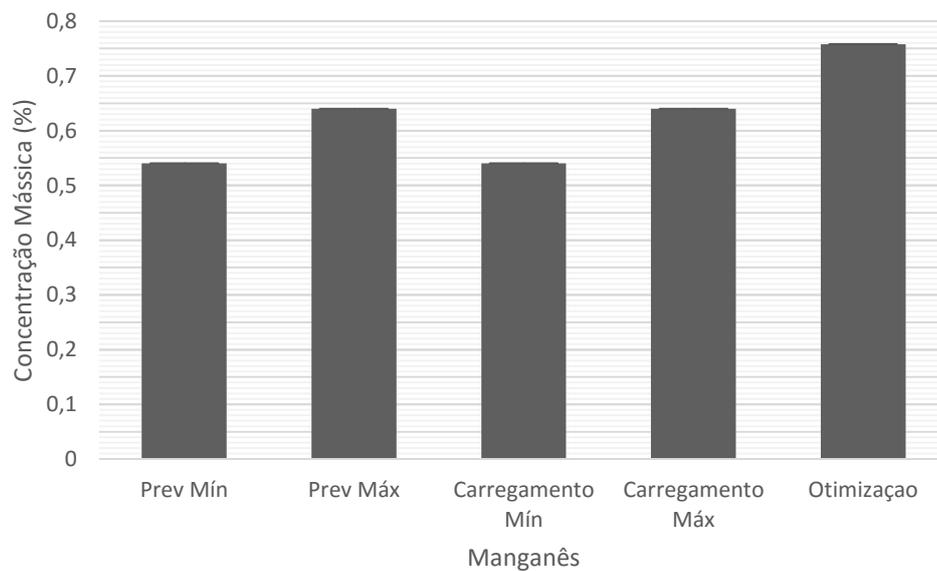


Figura 40 - Composições químicas resultantes do modelo para o Manganês, na liga SAE 1045

Pode-se ver que cada uma das faixas de composição prevista para os elementos constituintes permaneceu ou dentro ou abaixo, porém muito próximo, dos limites das especificações de cada uma das ligas.

Empregou-se análise de variância sobre os custos relativos de cada carregamento, comparando-se o método da empresa e o modelo desenvolvido. Foram obtidos os valores de 917,411 e 93,633 para função F para as ligas 0030 e SAE 1045, enquanto que os valores tabelados para a função são respectivamente 3,900 e 4,260.

É possível notar que, para ambas as análises, o valor calculado da função F é superior ao seu valor tabelado, concluindo-se que há diferença estatística entre o método de carregamento da empresa e o modelo desenvolvido, proporcionando este último um carregamento economicamente mais vantajoso.

Para se explicar isso, introduzem-se aqui os indicadores de custo benefício para uso de cada matéria-prima,  $\zeta_j$  e  $\zeta_j^{Fe}$ , definidos pela razão entre seu custo por quilograma e as somas das frações mássicas dos seus elementos de liga e do ferro em sua composição, respectivamente, conforme é visto nas equações (41) e (42).

$$\zeta_j = \frac{2c_j}{\sum_{i \neq Fe} (\underline{w_{i,j}} + \overline{w_{i,j}})} \quad (41)$$

$$\zeta_j^{Fe} = \frac{2c_j}{\underline{w_{Fe,j}} + \overline{w_{Fe,j}}} \quad (42)$$

Dessa forma, quanto mais alto for o valor de  $\zeta_j$ , menos vantajoso é seu uso na etapa de carregamento para se adicionar elementos de liga. Similarmente, para o indicador  $\zeta_j^{Fe}$ , quanto mais alto for seu valor, menos vantajoso é seu emprego para se fornecer Ferro à liga a ser produzida. Na Figura 41 se encontram os valores destes índices aplicados às matérias-primas disponíveis.

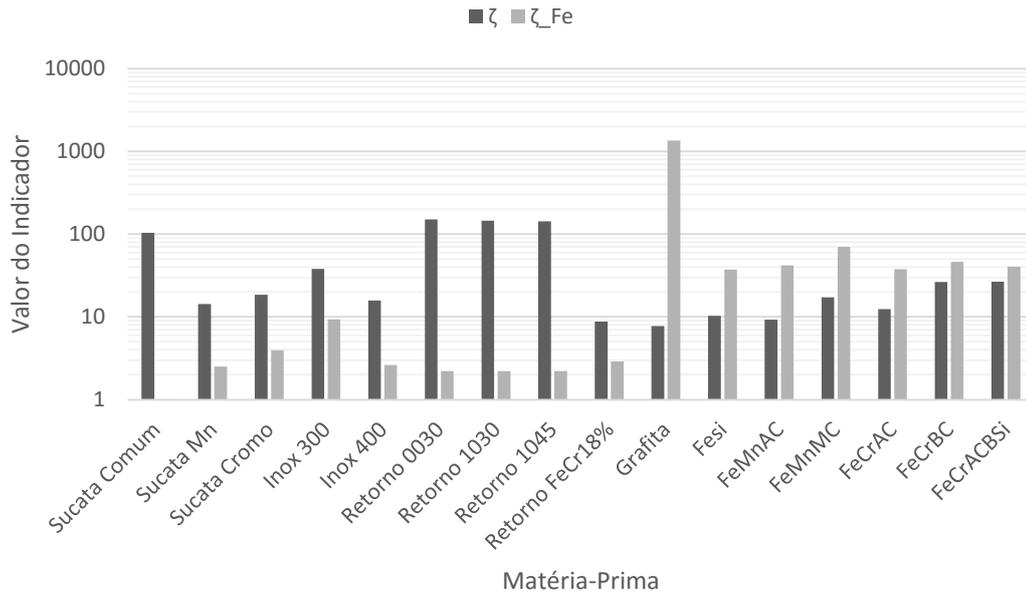


Figura 41 - Indicadores  $\zeta_j$  e  $\zeta_j^{Fe}$  aplicados às matérias-primas.

Nota-se que, de acordo com os índices, as melhores escolhas para fornecimento de elementos de liga são as próprias adições, juntamente com as sucatas de Manganês, de Cromo e Inox 400, ao invés das sucatas de retorno e comum. Isto porque, mesmo com seu maior custo, há também uma maior concentração desses elementos em sua composição, o que as torna mais vantajosas.

Com relação ao índice  $\zeta_j^{Fe}$ , é possível ver a grande vantagem em se usar a sucata comum para suprimento de Ferro, seguida das sucatas de retorno e outras sucatas e vindo após estas as adições. Destas, o índice da Grafita se sobressai com seu valor muito acima do das demais: apesar de seu custo relativo ser muito baixo, não há Ferro em sua composição, deixando de maneira lógica de ser uma alternativa para suprir este elemento.

Introduz-se também outro indicador para o suprimento de elementos de liga,  $\tau_j$ , que relaciona em uma razão a soma das frações mássicas da j-ésima sucata e a soma das frações mássicas da liga produzida, excluindo-se o ferro para ambos numerador e denominador. Para as sucatas, ela é definida conforme a equação (43), e para as adições, conforme a equação (44).

$$\tau_j^{liga} = \frac{\sum_{i \neq Fe} (w_{i,j} + \overline{w_{i,j}})}{\sum_{i \neq Fe} (\underline{[i]^{liga}} + \overline{[i]^{liga}})} \quad (43)$$

$$\tau_j^{liga} = \frac{2 \sum_{i \neq Fe} w_{i,j}}{\sum_{i \neq Fe} (\underline{[i]^{liga}} + \overline{[i]^{liga}})} \quad (44)$$

De acordo com ele, quanto mais próximo da unidade for o indicador melhor é o suprimento dos elementos de liga que a j-ésima sucata fornece à liga produzida. Quanto mais abaixo da unidade menos capaz é a j-ésima sucata de fornecer elementos à liga produzida, e quanto mais acima da unidade, ela é mais capaz de exceder o fornecimento destes elementos.

Na Figura 42 se encontram seus valores para cada uma das matérias-primas disponíveis, empregados para cada liga produzida, isto é, para as ligas 0030, SAE 1045, SAE 1030 e para o FeCr18%, onde a liga especificada se encontra supra escrito no indicador.

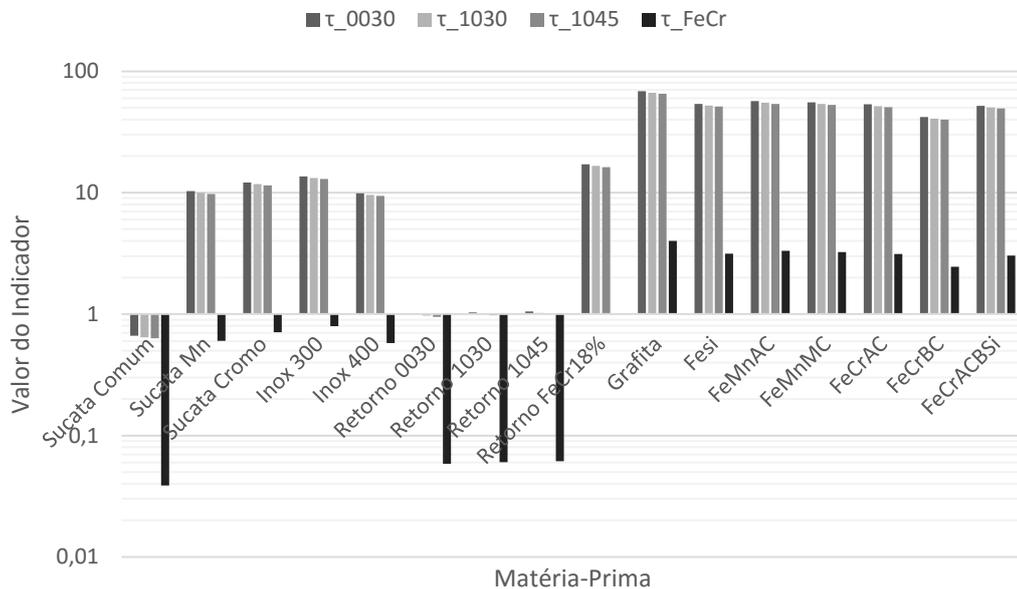


Figura 42 - Valores dos Indicadores  $\tau_j^{0030}$ ,  $\tau_j^{1030}$ ,  $\tau_j^{1045}$  e  $\tau_j^{FeCr}$  aplicados para as matérias-primas.

Caso o indicador seja igual à unidade para uma matéria-prima, interpreta-se que essa matéria-prima supra de maneira perfeita as necessidades de elementos de liga para a liga especificada em seu indicador; caso ele seja menor que a unidade, a matéria-prima é subeficiente para o seu suprimento de elementos de liga; caso seja maior que a unidade, a matéria-prima é supra eficiente.

É possível ver que as sucatas de retorno são as matérias-primas mais adequadas para o suprimento de elementos de liga para a própria liga, pois sua composição final já está dentro de sua especificação.

A Sucata Comum apresenta o indicador menor que a unidade, sendo deficiente nos elementos de liga. Isto a torna uma boa matéria-prima a ser usada como matéria de base para a corrida, sendo os elementos de liga fornecidos através de adições ou outras sucatas.

Já as demais sucatas, quando aplicados os indicadores  $\tau_j^{0030}$ ,  $\tau_j^{1030}$  e  $\tau_j^{1045}$ , devido a sua especificação, apresentam indicador maior que a unidade, sendo boas fontes de elementos de liga ou, caso sejam usadas como matéria de base, é necessário um agente diluente rico em Ferro para se chegar à especificação final. Quando aplicado o indicador  $\tau_j^{FeCr}$  às sucatas, vê-se que todas elas podem ser utilizadas como material de base a esta liga, pois seu valor é menor que a unidade.

Quanto às adições, nota-se que são boas fontes dos elementos de liga, sendo vantajoso seu uso em conjunto com matérias-primas cujo indicador seja menor que a unidade, isto é, os materiais de base à composição da corrida.

Ao se multiplicar os indicadores  $\zeta$  e  $\zeta^{Fe}$  com  $\tau^{liga}$ , obtêm-se duas novas relações: a primeira entre o custo da matéria-prima e sua capacidade de suprir os elementos da liga a ser produzida, e a segunda entre o custo da matéria-prima e sua capacidade de suprir o elemento Ferro. A Figura 43 e a Figura 44 demonstram estes dois novos indicadores aplicados às ligas deste trabalho.

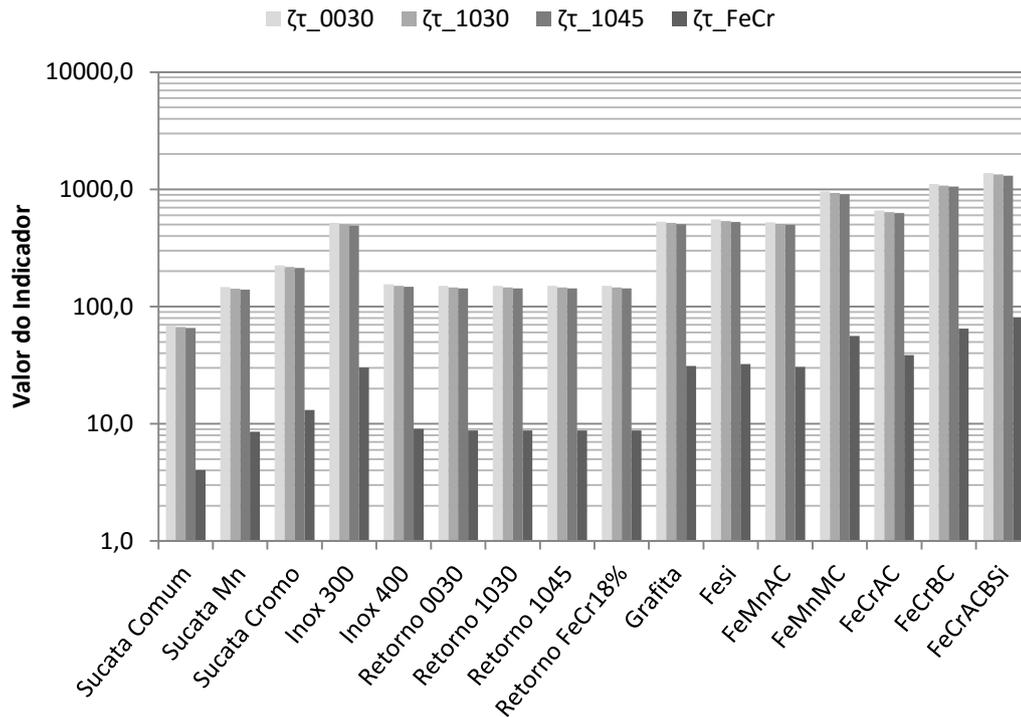


Figura 43 - Valores do Indicador  $\zeta\tau^{liga}$  aplicados para as matérias-primas.

Nota-se, a partir da Figura 43, que o indicador que demonstra o custo de adição de elementos de liga para as ligas 0030, SAE 1030 e SAE 1045 varia entre 70,0 e 200,0 para as sucatas (com exceção do Inox 300) e para as adições, entre 500,0 e 1050,0, incluindo o Inox 300. O indicador para a liga FeCr18% apresenta a mesma proporção, sendo porém menor. Quanto maior for este indicador, mais custo se torna o suprimento dos elementos de liga para a liga supra citada no indicador.

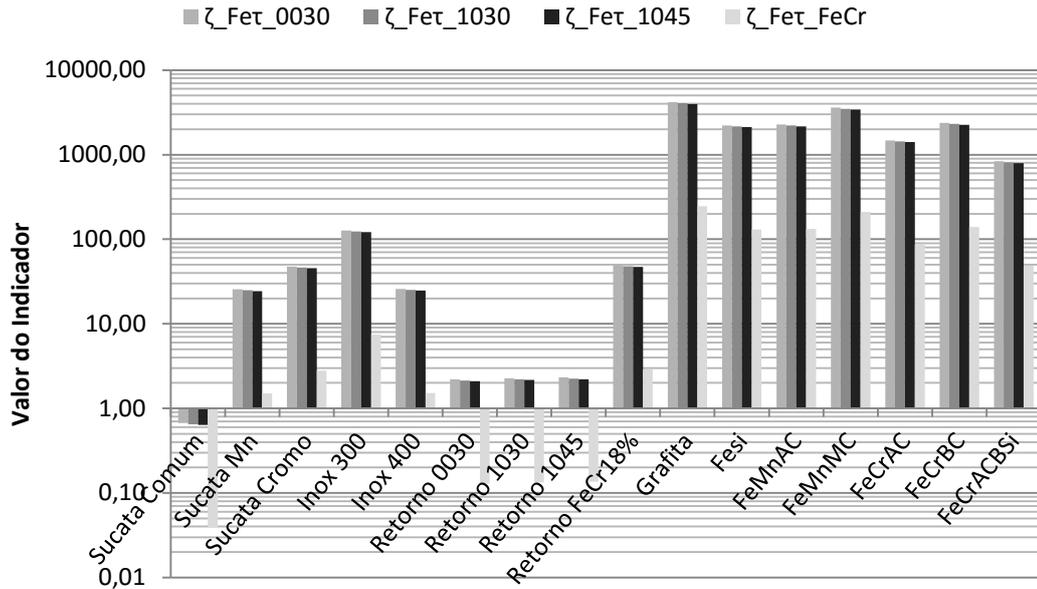


Figura 44 - Valores do indicador  $\zeta_{\tau}^{Fe\text{liga}}$  aplicados para as matérias-primas.

Já para o indicador que demonstra o custo de adição de ferro para as ligas indicadas, quando aplicados para as adições, são extremamente elevados (na ordem de 100,0 a 1000,0), quando em comparação com as sucatas, que se encontram na ordem de 1,0 a 100,0. Para a Sucata Comum, seu valor é menor do que a unidade, tornando-se extremamente vantajoso o seu uso para suprimento de ferro às ligas indicadas. Para a produção do FeCr18%, o custo de suprimento de ferro a essa liga, partindo-se das sucatas comum e em especial as de retorno, é ainda mais vantajoso, se encontrando na ordem de décimos de unidade.

É possível se calcular as médias dos indicadores aqui apresentados para cada corrida, ponderados pelas cargas de cada matéria-prima, de acordo com as equações (45), (46) e (47).

$$\bar{\zeta} = \frac{\sum_j s_j \zeta_j + \sum_k a_k \zeta_k}{\sum_j s_j + \sum_k a_k} \quad (45)$$

$$\overline{\zeta^{Fe}} = \frac{\sum_j s_j \zeta_j^{Fe} + \sum_k a_k \zeta_k^{Fe}}{\sum_j s_j + \sum_k a_k} \quad (46)$$

$$\overline{\tau^{liga}} = \frac{\sum_j s_j \tau_j^{liga} + \sum_k a_k \tau_k^{liga}}{\sum_j s_j + \sum_k a_k} \quad (47)$$

Os valores dos indicadores se encontram ilustrados na Figura 45 para a liga 0030 e na Figura 46 para a liga SAE 1045

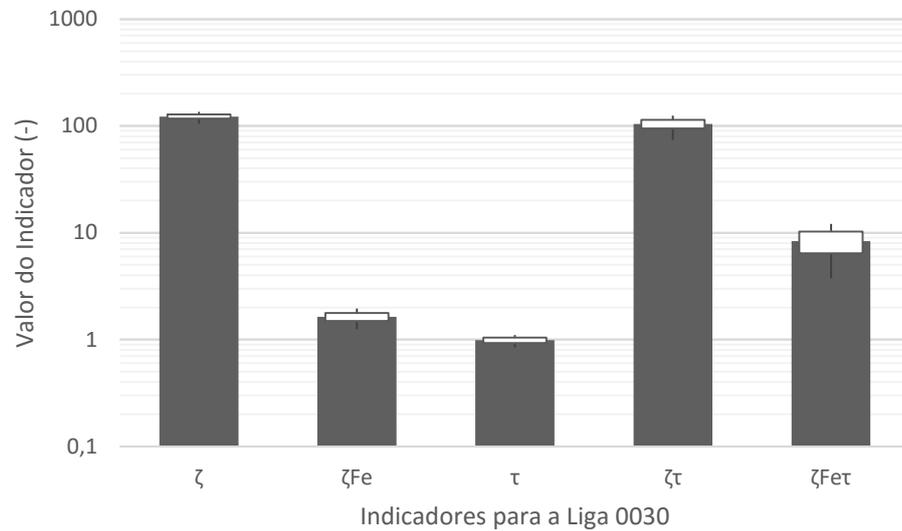


Figura 45 - Indicadores para a liga 0030 produzidos a partir dos dados da indústria.

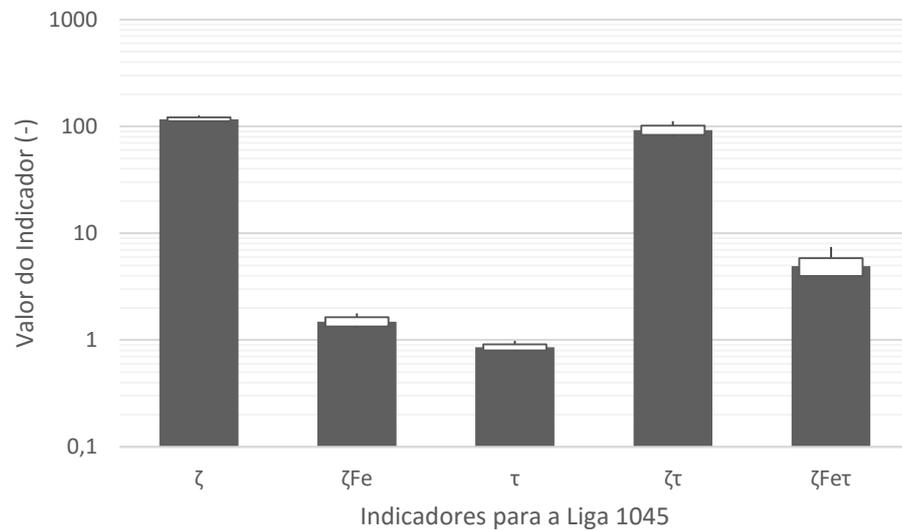


Figura 46 - Indicadores para a liga 1045 produzidos a partir dos dados da empresa.

Na Figura 47 e na Figura 48, se encontram os mesmos indicadores para as corridas das ligas 0030 e SAE 1045, porém para os resultados do modelo.

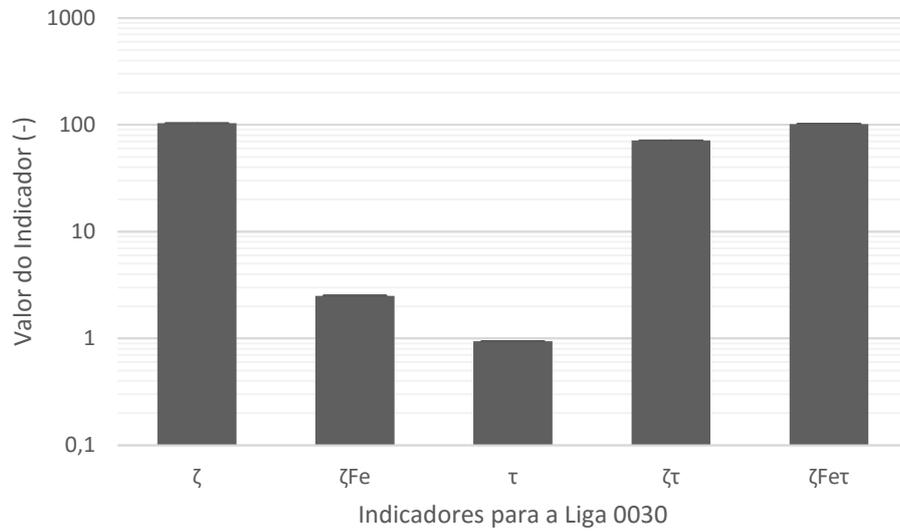


Figura 47 - Indicadores para a liga 0030 produzidos a partir dos dados simulados.

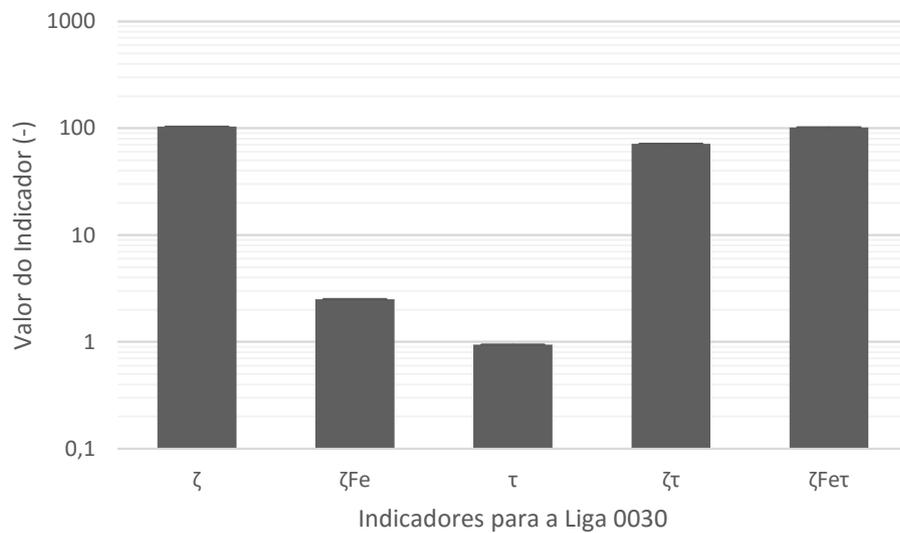


Figura 48 - Indicadores para a liga 1045 produzidos a partir dos dados simulados.

É possível notar que para ambas as ligas os indicadores  $\zeta$  e  $\zeta^{Fe}$  apresentaram valor médio inferior para os resultados do modelo, enquanto que para os indicadores  $\tau^{0030}$  e  $\tau^{1045}$  os resultados para o modelo e a empresa permaneceram próximos. Ao se realizar

análise de variância, chegou-se aos valores para a função F de 930,734, 3081,299 e 19,330 para os indicadores  $\zeta$ ,  $\zeta^{Fe}$  e  $\tau^{0030}$  da liga 0030 (o valor tabelado da função F é de 3,900), e de 102,536, 5052,777 e 1,362 para os indicadores  $\zeta$ ,  $\zeta^{Fe}$  e  $\tau^{1045}$  da liga SAE 1045 (o valor tabelado da função F é de 4,260).

Dessa forma, vê-se que todos os valores da função F calculados são maiores do que os valores da função F teóricos, havendo diferença estatística entre as médias, com exceção do indicador  $\tau^{1045}$ . Apesar de este último ser estatisticamente igual para a empresa e o modelo, a variabilidade deste foi menor do que daquele.

De acordo com estes resultados, também é possível ver que as médias ponderadas dos indicadores  $\zeta\tau^{0030}$  e  $\zeta\tau^{1045}$  são menores para os resultados deste modelo, com valores da função F de 914,088 e 92,584, respectivamente (valor tabelado da função F de 3,900 e 4,260). Os resultados para os indicadores  $\zeta^{Fe}\tau^{0030}$  e  $\zeta^{Fe}\tau^{1045}$  são maiores, com valores da função F de 380,622 e 851,717, respectivamente (valor tabelado da função F de 3,900 e 4,260).

Estatisticamente, é possível notar que seus valores, quando comparados com os valores da prática da empresa, são distintos, isto é, os resultados do modelo apontam menores custos com elementos de liga enquanto investe-se mais com o elemento Ferro. Apesar disso, o custo geral do modelo para cada fornada permanece abaixo do custo da prática empresarial.

### 5.3. Modelo de Otimização

As cargas de otimização obtidas através do modelo se encontram dispostas na Figura 53 para a liga 0030 e na Figura 54 para a liga SAE 1045.

Quando comparados os resultados da Figura 49 com os da Figura 15 (para a liga 0030), nota-se uma similaridade para a Grafita, porém resultados diferentes para FeSi, FeMnAC e FeMnMC. Para a liga SAE 1045, ao se comparar seus resultados da Figura 50 com os da Figura 22, os resultados são todos maiores para o modelo.

As composições químicas alcançadas, tanto para as corridas da empresa quanto para o modelo de otimização aplicado a essas corridas, se encontram dispostas na Figura 51 para a liga 0030 e na Figura 52 para a liga SAE 1045.

Nota-se nestes gráficos que tanto para o Carbono quanto para o Manganês as composições são muito parecidas. Porém, ao se analisar o Silício, vê-se que o modelo

alcançou resultados maiores do que os resultados da empresa para as duas ligas. Para se investigar isso, é feita a análise descrita a seguir.

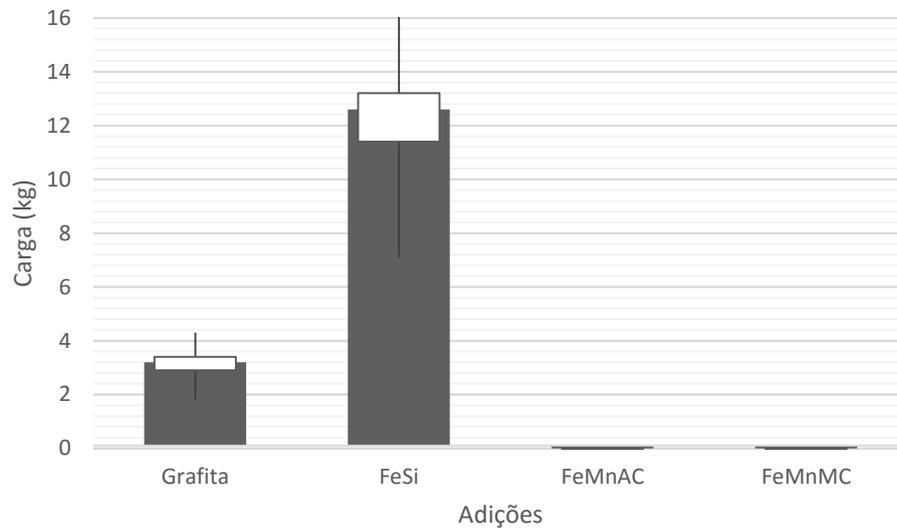


Figura 49 - Cargas de Otimização das Adições Obtidas a Partir do Modelo para a Liga 0030

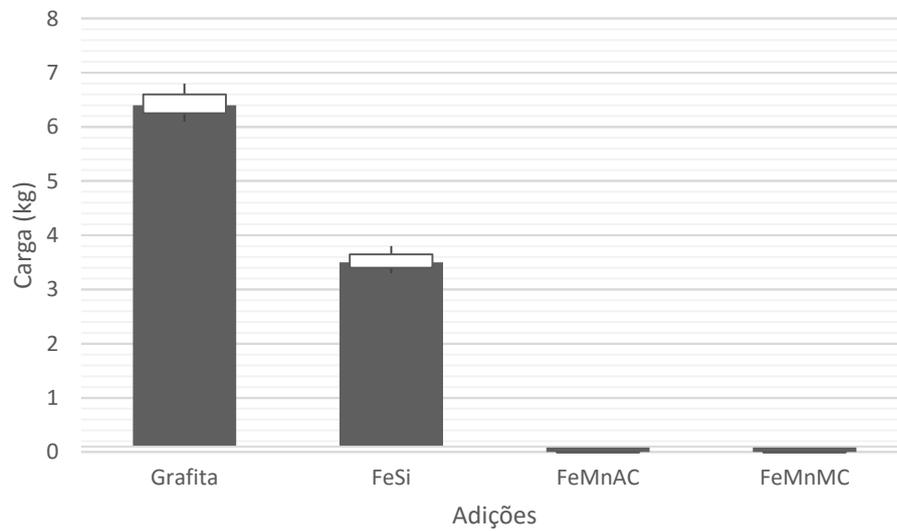


Figura 50 - Cargas de Otimização das Adições Obtidas a Partir do Modelo para a Liga SAE 1045

De acordo com o item 4.8.4, foi realizada a comparação entre as massas adicionadas de cada elemento que foram registradas, calculadas por balanço de massa e obtidas através do modelo de otimização.

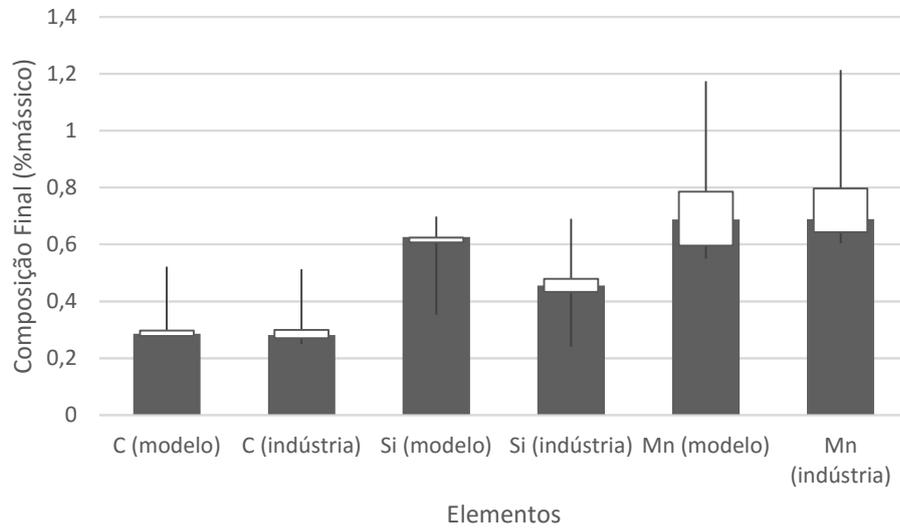


Figura 51 - Concentrações Mássicas dos Elementos da Liga 0030 Após a Etapa de Otimização.

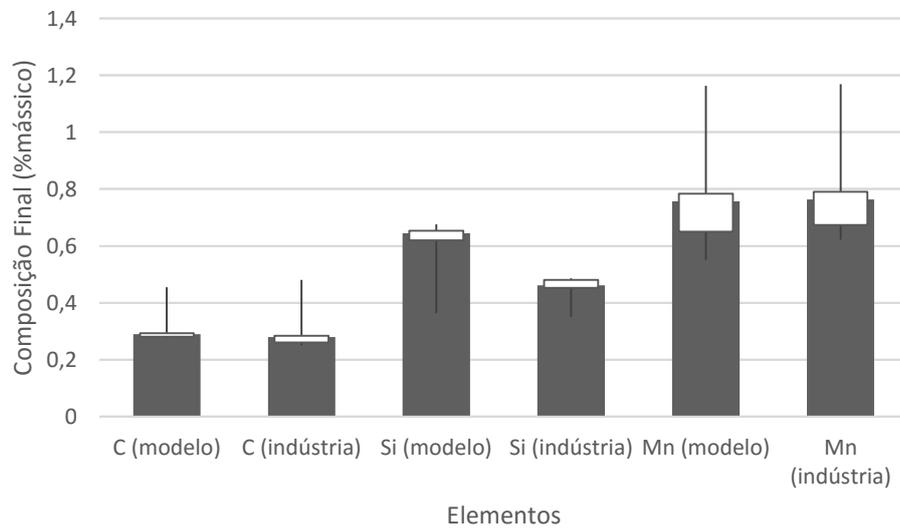


Figura 52 - Concentrações Mássicas dos Elementos da Liga 1045 Após a Etapa de Otimização.

Ao se realizar análise de variância sobre seus dados, chegou-se aos valores da função F tabelados de 3,455 para o Carbono, 1,696 para o Silício e 0,018 para o

Manganês (o valor tabelado da função F é de 3,033). Isto é, apenas a massa de Carbono não é estatisticamente a mesma. A análise múltipla de médias produziu a Figura 53 a seguir.

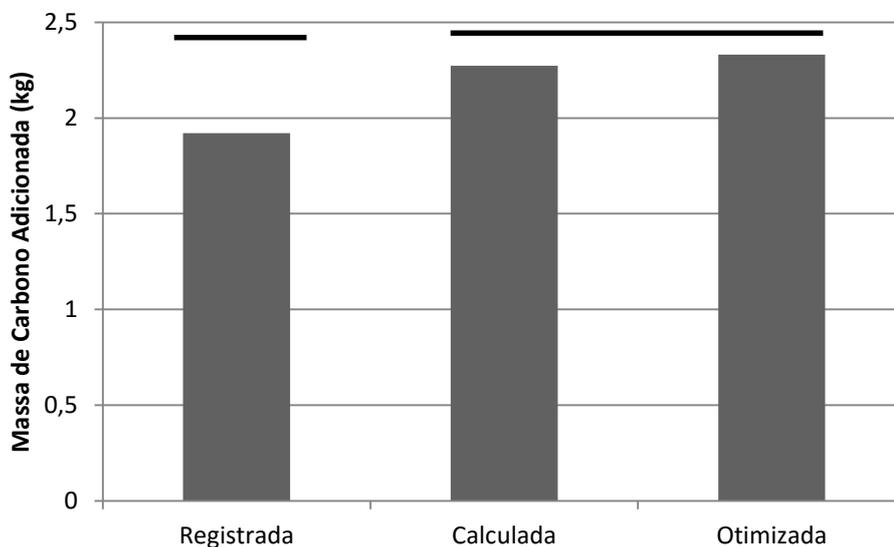


Figura 53 - Análise Múltipla de Médias entre as Massas de Carbono Adicionadas às 82 Corridas da Liga 0030.

Nota-se que a massa registrada de Carbono que foi adicionada durante a otimização é menor que as massas calculada e otimizada, sendo estas duas estatisticamente iguais. Verificou-se durante o acompanhamento da prática da indústria que a Grafita era eventualmente adicionada sem haver o devido registro, atribuindo-se a isto esta diferença, indicando falta de controle operacional.

Para a liga SAE 1045, é possível verificar a similaridade no comportamento das massas adicionadas, porém para o Carbono e Silício, a massa registrada é maior do que as massas calculadas por balanço de massa e otimizadas, sendo estas duas últimas similares.

Assim, dados obtidos da indústria podem carecer de exatidão, pois ocorrem falhas no controle operacional. Essas falhas acabam prejudicando a análise dos dados e as possíveis conclusões a serem obtidas.

Ao se realizar análise de variância sobre os resultados da otimização para a liga SAE 1045, chegou-se aos valores da função F de 3,967 para o Carbono, 0,808 para o Silício e 0,070 para o Manganês (o valor da função F tabelado é de 3,259). Com isso, constata-se

que novamente apenas as massas adicionadas de Carbono não são estatisticamente equivalentes. A análise múltipla de médias para o Carbono se encontra na Figura 54 a seguir.

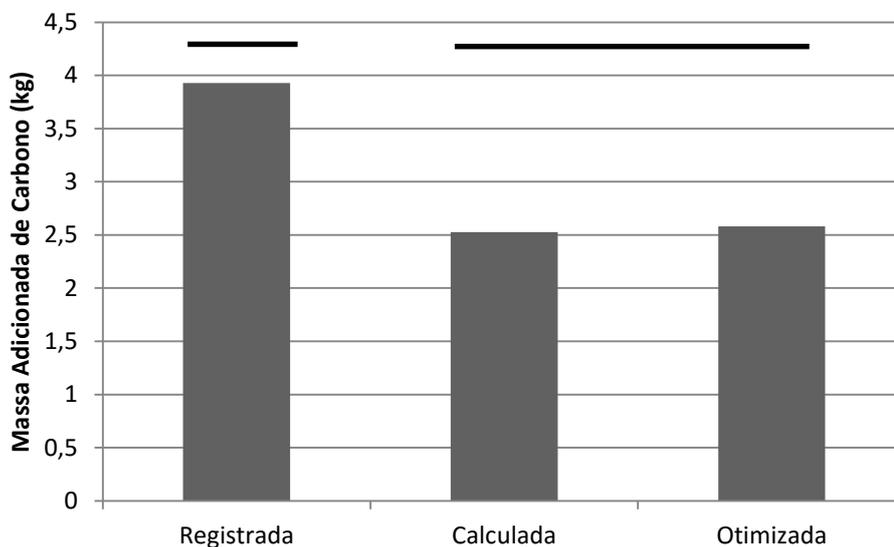


Figura 54 - Análise Múltipla de Médias entre as Massas de Carbono Adicionadas às 13 Corridas da Liga SAE 1045.

Dessa forma, descarta-se a possibilidade de o modelo de eficiência metálica ou o de otimização ser o causador da disparidade entre as massas adicionadas de Carbono, pois para a liga 0030 verificou-se que a massa adicionada de Carbono que foi registrada foi menor que as demais, enquanto para a liga SAE 1045, a mesma massa foi maior que as massas, tanto a calculada por balanço de massa quanto a otimizada. Caso o modelo fosse responsável pela disparidade estatística observada, se deveria verificar comportamento similar para ambas as ligas.

Ao se verificar os custos da otimização, verificou-se que para cada fornada eles são de ordem 100 vezes menor que os custos relativos por quilograma da etapa de carregamento, tendo um impacto econômico pequeno sobre os custos globais da corrida, conforme pode ser visto na Tabela 7.

Ao se realizar análise de variância sobre os custos relativos de otimização, chegou-se aos valores da função F de 3,821 para a liga 0030 e de 0,370 para a liga SAE 1045 (os valores da função F tabelados são respectivamente 3,900 e 4,260). Dessa forma, constata-se a equivalência estatística entre ambos os métodos para as duas ligas.

#### 5.4. Avaliação das Ligas SAE 1030 e FeCr18%

Os resultados das simulações de carregamento da liga SAE 1030 com o custo da sucata comum variando 0%, 50% e 100% se encontram na Figura 55.

As sugestões de carregamento para o custo relativo da sucata comum somados de 0% serão tratados por conjunto 1, e as sugestões para custo relativo somados de 50% e 100%, por serem iguais, de conjunto 2.

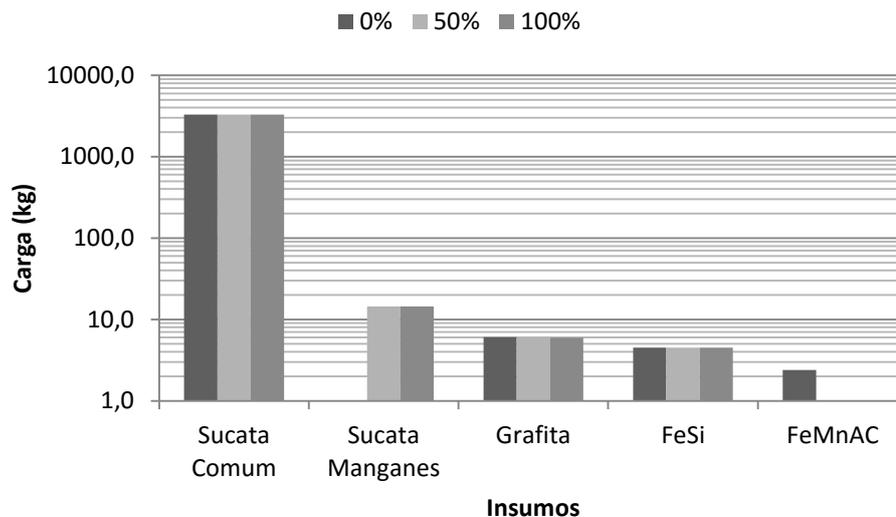


Figura 55 - Resultados do Carregamento da Liga SAE 1030 com Acréscimos de 0%, 50% e 100% no Custo Relativo da Sucata Comum.

É possível notar que, para ambos os conjuntos 2 e 3 (em que há o acréscimo de 50% e 100% do preço relativo sobre a sucata comum), quando o custo da sucata comum aumenta em 50%, as sugestões de carregamento mudam. Para a liga SAE 1030, retira-se do conjunto de sugestões a adição FeMnAC e insere-se a sucata de Manganês. Praticamente não há variação nas previsões de composição química mínima e máxima, conforme pode ser visto na Figura 56 para o Carbono, na Figura 57 para o Silício, na Figura 58 para o Manganês e na Figura 59 para o Cromo. O custo relativo por quilograma passa de 1,022 para 1,017, diminuindo 0,5%.

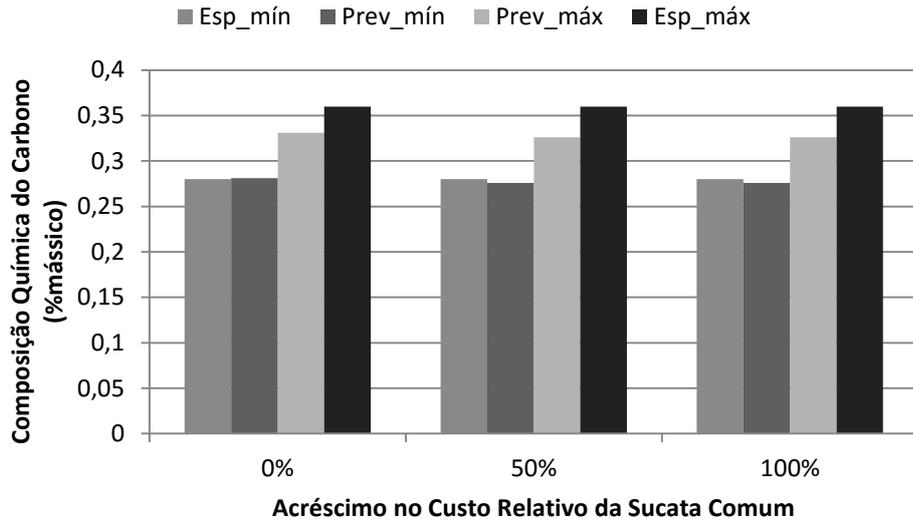


Figura 56 - Composição Química do Carbono para os Carregamentos com Custo Relativo da Sucata Comum Inflacionado para a Liga SAE 1030.

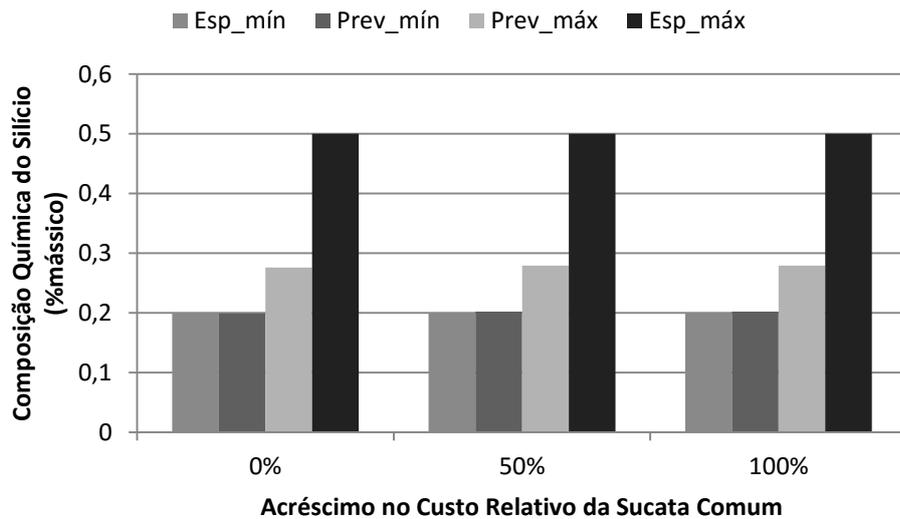


Figura 57 - Composição Química do Silício para os Carregamentos com Custo Relativo da Sucata Comum Inflacionado para a Liga SAE 1030.

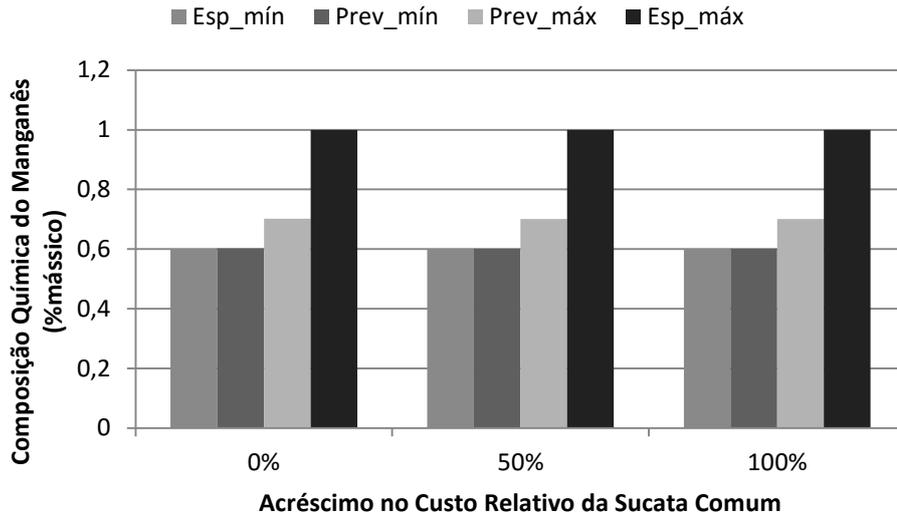


Figura 58 - Composição Química do Manganês para os Carregamentos com Custo Relativo da Sucata Comum Inflacionado para a Liga SAE 1030.

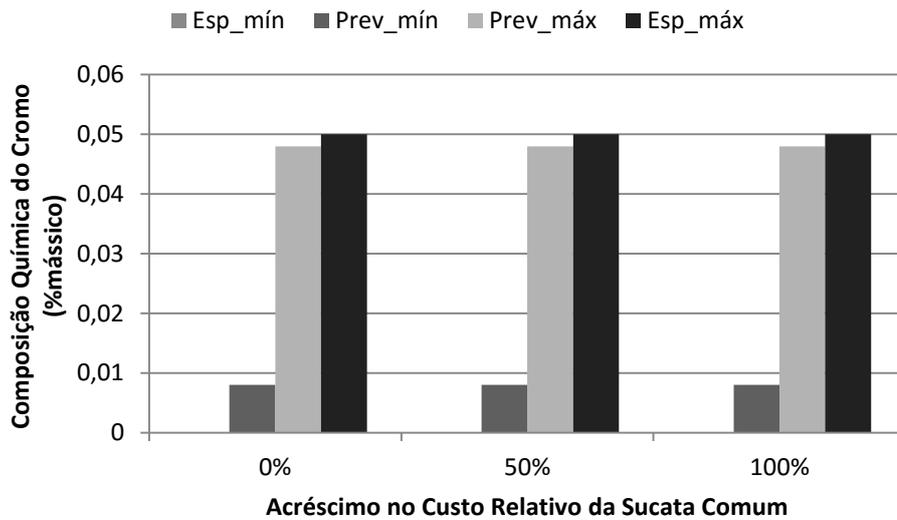


Figura 59 - Composição Química do Cromo para os Carregamentos com Custo Relativo da Sucata Comum Inflacionado para a Liga SAE 1030.

Os resultados das simulações de carregamento da liga FeCr18% com o custo da sucata comum variando 0%, 50% e 100% se encontra na Figura 60.

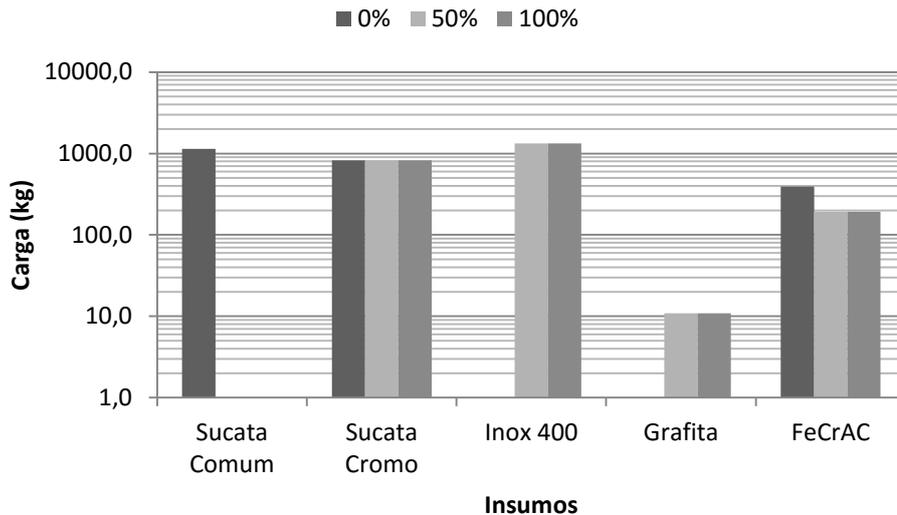


Figura 60 - Resultados do Carregamento da Liga FeCr18% com Acréscimos de 0%, 50% e 100% no Custo Relativo da Sucata Comum.

Já para a liga FeCr18%, a sucata comum é removida do conjunto de sugestões, insere-se a ele a sucata de Inox 400 e a adição de Grafita, diminuindo-se em aproximadamente a metade da adição de FeCrAC. Com isso, as previsões de composição química mínima e máxima diminuem para o Carbono, para a composição mínima do Silício, aumentam a composição máxima do Silício, para o Manganês e para a composição máxima de Cromo, e a composição química mínima para Cromo permanece praticamente igual, conforme visto na Figura 61 para o Carbono, na Figura 62 para o Silício, na Figura 63 para o Manganês e na Figura 64 para o Cromo. O custo relativo por quilograma passa de 2,673 para 2,761, apresentando aumento de 2,9%.

Ao se analisar a variação dos indicadores  $\zeta_j$  e  $\zeta_j^{Fe}$  da sucata comum, vê-se que seus valores também aumentam em 50% e 100% (158,002 e 210,670 para  $\zeta_j$ , e 1,515 e 2,020 para  $\zeta_j^{Fe}$ ). Com 50% de aumento, de acordo com o indicador  $\zeta_j$ , a sucata comum passa a competir com as demais sucatas de retorno no fornecimento de elementos de liga, e com 100% de aumento, torna-se desvantajoso o seu uso com relação às sucatas de retorno. De acordo com o indicador  $\zeta_j^{Fe}$ , a sucata comum permanece mais vantajosa para o fornecimento de Ferro quando comparada com as demais sucatas de retorno.

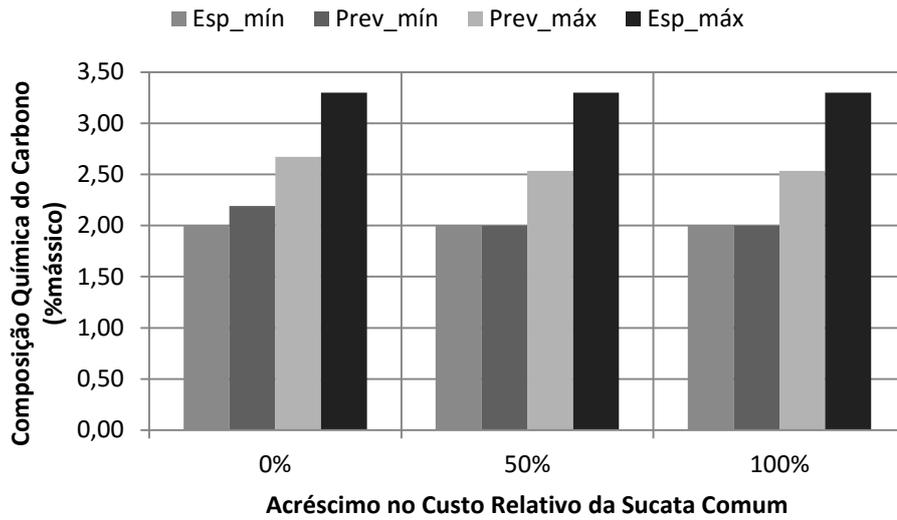


Figura 61 - Composição Química do Carbono para os Carregamentos com Custo Relativo da Sucata Comum Inflacionado para a Liga FeCr18%.

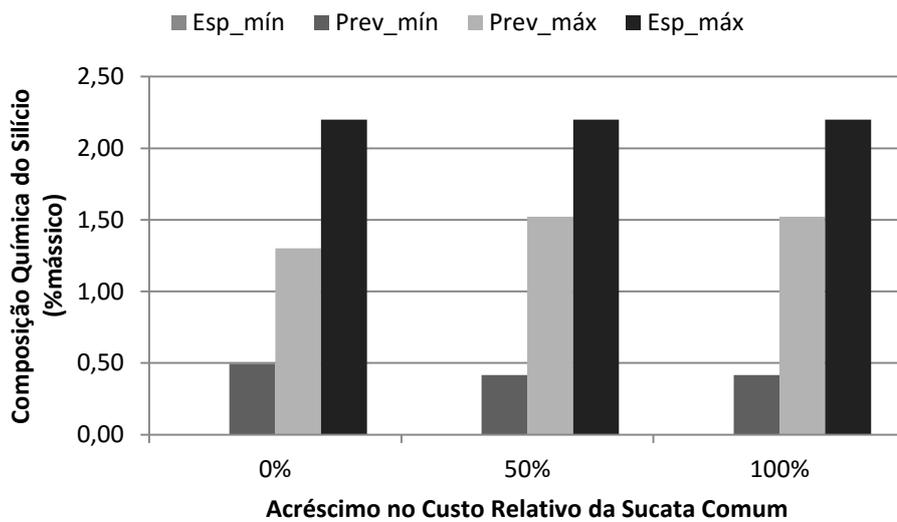


Figura 62 - Composição Química do Silício para os Carregamentos com Custo Relativo da Sucata Comum Inflacionado para a Liga FeCr18%.

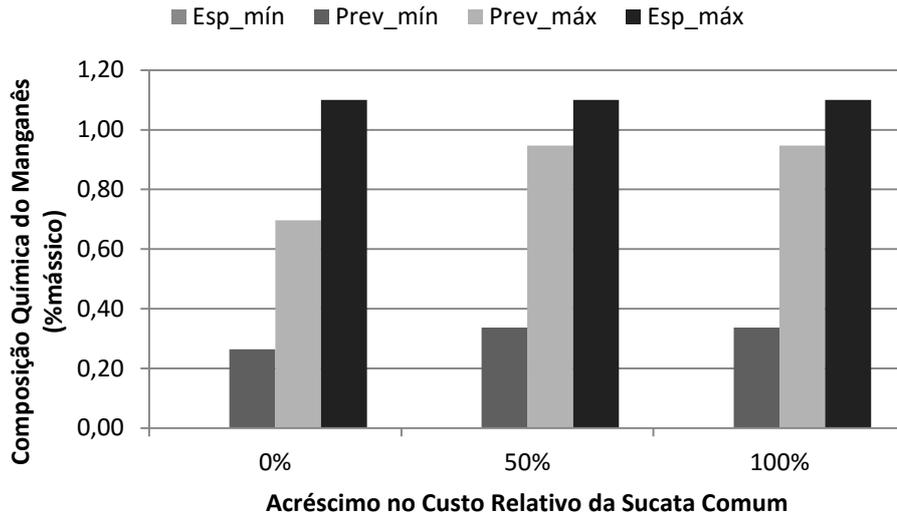


Figura 63 - Composição Química do Manganês para os Carregamentos com Custo Relativo da Sucata Comum Inflacionado para a Liga FeCr18%.

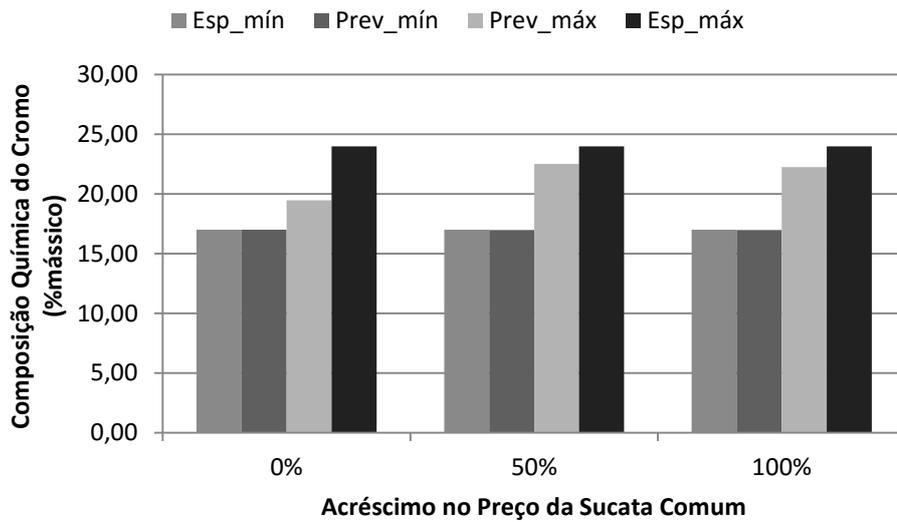


Figura 64 - Composição Química do Cromo para os Carregamentos com Custo Relativo da Sucata Comum Inflacionado para a Liga FeCr18%.

Explica-se a mudança no conjunto de sugestões das ligas SAE 1030 e FeCr18% através da mudança das médias ponderadas dos indicadores  $\zeta_j, \zeta_j^{Fe}, \tau^{liga}, \zeta_j \tau^{liga}$  e  $\zeta_j^{Fe} \tau^{liga}$ , conforme visto na Tabela 8.

Tabela 8 - Indicadores com Custo da Sucata Comum Variando 0%, 50% e 100%.

Liga	Conjunto de Respostas	Custo Sucata Comum	$\zeta_j$	$\zeta_j^{Fe}$	$\tau^{liga}$	$\zeta_j \tau^{liga}$	$\zeta_j^{Fe} \tau^{liga}$
1030	1	x 1,0*	105,010	2,803	0,878	72,618	119,421
		x 1,5	157,501	3,306	0,878	108,026	119,761
		x 2,0	209,991	3,809	0,878	143,433	120,100
	2	x 1,0	104,686	2,739	0,876	72,620	115,018
		x 1,5*	156,984	3,240	0,876	107,897	115,357
		x 2,0*	209,283	3,742	0,876	143,174	115,695
FeCr18%	1	x 1,0*	60,933	8,171	0,760	13,120	20,016
		x 1,5	86,373	8,415	0,760	14,136	20,025
		x 2,0	111,813	8,659	0,760	15,153	20,035
	2	x 1,0	18,423	12,205	0,827	13,740	35,453
		x 1,5*	18,423	12,205	0,827	13,740	35,453
		x 2,0*	18,423	12,205	0,827	13,740	35,453

\*Conjunto de Matérias-Primas Escolhidas para o Custo de Sucata Comum Associado

Nota-se que para a liga SAE 1030, em que a sucata comum permaneceu no conjunto de matérias-primas, houve aumento nos indicadores  $\zeta_j, \zeta_j^{Fe}, \zeta_j \tau^{liga}$  e  $\zeta_j^{Fe} \tau^{liga}$  dentro de um mesmo conjunto de respostas quando aumentado o custo da sucata comum, e houve diminuição dos mesmos indicadores para um mesmo custo de sucata comum, mas mudando-se de conjunto de matérias-primas. O indicador  $\tau^{liga}$  permaneceu constante.

Para a liga FeCr18%, houve aumento dos indicadores  $\zeta_j, \zeta_j^{Fe}, \zeta_j \tau^{liga}$  e  $\zeta_j^{Fe} \tau^{liga}$  para o primeiro conjunto de respostas com o aumento do custo da sucata comum, permanecendo constante para o indicador  $\tau^{liga}$ . Com relação ao segundo conjunto de respostas, não houve mudanças em seus valores pois a sucata comum não foi incluída nela.

Como explicação da mudança de carteira de matérias-primas para os custos da sucata comum acrescidos de 0%, 50% e 100% do seu valor, usa-se o indicador  $\zeta_j \tau^{liga}$  como critério de escolha de cada carteira para cada cenário: nos casos em que o preço

permaneceu o original, o valor deste indicador é menor para o primeiro conjunto; quando se muda o custo da sucata comum, o segundo conjunto passa a ter o valor deste indicador menor do que para o primeiro conjunto.

É possível notar que este critério não pode ser aplicado para os demais indicadores. Torna-se esperado este indicador como critério de escolha, uma vez que a função a ser minimizada é a função custo (referente ao indicador  $\zeta_j$ ) cujas inequações de condição de contorno se referem ao balanço dos elementos envolvidos excluindo-se o Ferro (referente ao indicador  $\tau^{liga}$ ).

Para fins comparativos, ressalta-se que em todos os cenários simulados, os conjuntos de respostas forneceram um custo relativo de carregamento menor para o modelo desta dissertação do que para o método da empresa, sendo 1,022, 1,017 e 1,017 para a liga SAE 1030 para os cenários de custo da sucata comum 0, 50% e 100% maiores, contra 1,411 do método da empresa, e 2,673, 2,761 e 2,761 para a liga FeCr18% para os mesmos cenários contra 3,115 para o método da empresa. Isso significa economias de aproximadamente 28% para a liga SAE 1030 e 13% para a liga FeCr18%.

## 6. CONCLUSÕES

As seguintes conclusões podem ser citadas para este trabalho.

- O modelo de eficiência metálica aplicado às ligas SAE 1030M e SAE 1045 mostrou resultados próximos às estimativas de eficiência da prática empresarial para o Manganês e o Cromo. Para o Carbono, verificou-se que sua reação de oxidação ficou aquém do equilíbrio termodinâmico. Quanto ao Silício, suas eficiências se apresentaram maiores do que os patamares estimados à prática da empresa.
- Os carregamentos do forno obtidos apresentaram composições previstas mínimas e máximas dentro ou um pouco abaixo das especificações das ligas estudadas. Houve economias nos custos relativos de  $30,81 \pm 6,76\%$  para a liga SAE 1030M e de  $26,67 \pm 7,10\%$  para a liga SAE 1045.
- As cargas de otimização da composição química foram aptas a levar a composição química da prática empresarial após o carregamento até a composição após a correção, com equivalência técnica e econômica.
- Os indicadores criados mostraram-se adequados para explicar os critérios de escolha do modelo de carregamento do forno, inclusive o critério para encontrar um conjunto de cargas de menor custo e igualmente eficiente em termos de previsão de composição química.

## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões de trabalhos futuros, podem ser citadas:

- O aprofundamento do modelo de rendimento metálico de forma a não ser necessário inserir a composição desejada, mas de forma a retornar a quantidade de CaO a ser inserido, de forma a se obter as eficiências metálicas aos elementos e as propriedades desejáveis à escória.
- O estudo da variação do rendimento metálico em função da liga e da escória escolhidas.
- A inserção de um modelo de cálculo retroativo da composição química difusa das sucatas a partir das amostras de composição retiradas para otimização, de forma a se estreitar o conhecimento de suas especificações e melhorar as sugestões para carregamento.
- Modificar o modelo de otimização de forma a incluir em seus resultados o critério de economia para esta etapa.
- Acrescentar módulos de análise financeira para auxílio de aquisição de matérias-primas.
- Usar os modelos aqui desenvolvidos para complementar modelos de gerenciamento de produção.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, S. A. D.; ARENALES, M. N. Dimensionamento de Lotes e Programação do Forno Numa Fundição Automatizada de Porte Médio. **Pesquisa Operacional**, v. 23, n. 3, p. 403-420, 2003.

ARAUJO, S. A. D.; ARENALES, M. N.; CLARK, A. R. Dimensionamento de Lotes e Programação do Forno numa Fundição de Pequeno Porte. **Gestão e Produção**, v. 23, n. 3, p. 165-176, 2003.

AYLEN, J.; ALBERTSON, K. Markets in Ferrous Scrap for Steelmaking. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 33, n. 3, p. 203-212, 2006.

BALLESTÍN, F.; MALLOR, F.; MATEO, P. M. Production Scheduling in a Market-Driven Foundry: a Mathematical Programming Approach Versus a Project Scheduling Metaheuristic Algorithm. **Optimization Engineering**, v. 13, p. 663-687, 2012.

CAMPOS, V. F. **Tecnologia de Fabricação do Aço Líquido**. 3ª Edição. ed. Belo Horizonte: UFMG, v. 1, 1985.

CARVALHO, J. L. R. D. et al. **Dados Termodinâmicos para Metalurgistas**. 1ª Edição. ed. Belo Horizonte: UFMG, 1977.

CASOTTI, B. P.; FILHO, E. D. B.; CASTRO, P. C. D. Indústria de Fundição: Situação Atual e Perspectivas. **BNDES Setorial**, v. 33, p. 121-162, 2011.

CATEN, C. S. T. **Método de Otimização de Produtos e Processos Medidos por Múltiplas Características de Qualidade**. [S.l.]: UFRGS, 1995.

FERNANDES, F. C. F.; LEITE, R. B. Automação Industrial e Sistemas Informatizados de Gestão da Produção em Fundições de Mercado. **Gestão e Produção**, v. 9, n. 3, p. 313-344, 2002.

IQBAL, K. **Fundamental Engineering Optimization**. Bookboon, 2013

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 7ª Edição. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.

RIBEIRO, J. L. D. A Engenharia da Qualidade e a Função de Perda de Taguchi. **EGATEA**, v. 20, n. 1, p. 65-77, 1992.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. S. T. **Projeto de Experimentos**. [S.l.]: UFRGS, 2000.

RONG, A.; LAHDELMA, R. Fuzzy Chance Constrained Linear Programming Model for Optimizing the Scrap Charge in Steel Production. **European Journal of Operational Research**, v. 186, p. 953-964, 2008.

SAKALLI, Ü. S.; BAYKOÇ, Ö. F. An Optimization Approach for Brass Casting Blending Problem Under Aleatory and Epistemic Uncertainties. **International Journal of Production Economics**, v. 133, p. 708-718, 2011.

SHEHATA, F. A. Computer-Aided Foundry Cupola and Mold Analysis. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 63, p. 655-660, 1997.

SHIFLET, A. B.; SHIFLET, GEORGE W. **Introduction to Computational Science: Modeling and Simulation for the Sciences**. Princeton University Press, 2014.

SILVA, R. D. J.; MORABITO, R. Otimização da Programação de Cargas de Forno em uma Fábrica de Fundição em Aço-Inox. **Gestão e Produção**, v. 11, n. 1, p. 135-151, 2004.

SUTTON, R. S.; BARTO, A. G. **Reinforcement Learning: An Introduction**. The MIT Press, 2005.

TAGUCHI, G.; ELSAYED, E. A.; HSIANG, T. **Engenharia da Qualidade em Sistemas de Produção**. São Paulo: McGraw-Hill, Ltda, 1990.

WEI-PING, X.; QUAN, W.; CHUN, X. **Alloy Addition Prediction in Smelting Based on BP Neural Network**. Intelligent Systems and Applications, 2009. ISA 2009. International Workshop on. Wuhan: Institute of Electric and Electronic Engineers. 2009. p. 1-4.

WENCHAO, W.; ZHONGCE, W.; HUANBIN, W. JYPB2.0 - A New Composition Adjustment Processing System of Metal Melting. **China Foundry**, v. 5, n. 1, p. 39-43, 2008.

YANG, X. S. **Engineering Optimization:** An Introduction with Metaheuristic Applications. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010.

ZIÓLKOWSKI, E.; WRONA, R. Using Fuzzy Optimization Method in Calculation of Charge Burden to Correct the Chemical Composition of Metal Melt. **Archives of Foundry Engineering**, v. 7, n. 3, p. 183-186, 2007.

## 9. APÊNDICE

Neste apêndice segue a explicação do método ANOVA. Seja um experimento com ‘ $a$ ’ tratamentos, ou níveis de experimentação, e ‘ $n$ ’ observações ‘ $y$ ’ de um único fator. Os dados podem ser visualizados conforme a tabela abaixo.

Tratamen to	Observações				Totais	Médias
1	$y_{11}$	$y_{12}$	...	$y_{1n}$	$y_{1\cdot}$	$\bar{y}_{1\cdot}$
2	$y_{21}$	$y_{22}$	...	$y_{2n}$	$y_{2\cdot}$	$\bar{y}_{2\cdot}$
...	...	...	...	...	...	...
<b><math>a</math></b>	$y_{a1}$	$y_{a2}$	...	$y_{an}$	$y_{a\cdot}$	$\bar{y}_{a\cdot}$
					$y_{\cdot\cdot}$	$\bar{y}_{\cdot\cdot}$

Deseja-se testar a hipótese  $H_0$  descrita na equação (25), em que as médias ‘ $\bar{y}_{i\cdot}$ ’ dos ‘ $a$ ’ tratamentos são iguais. Havendo diferença estatística entre as médias, a hipótese  $H_1$  é verdadeira.

$$H_0: \bar{y}_{1\cdot} = \bar{y}_{2\cdot} = \dots = \bar{y}_{a\cdot}$$

$$H_1: \bar{y}_{i\cdot} \neq \bar{y}_{j\cdot} \quad \forall(i, j)$$

(24)

As fórmulas para cálculo da função de probabilidade  $F$  se encontram a seguir.

	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	<b><math>F</math></b>
Entre Tratamentos	$SS_{Trat} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a y_{i\cdot}^2 - \frac{y_{\cdot\cdot}^2}{an}$	<b><math>a - 1</math></b>	$MS_{Trat} = \frac{SS_{Trat}}{a - 1}$	$\frac{MS_{Trat}}{MS_E}$
Dentro de Tratamentos	$SS_E = SS_T - SS_{Trat}$	$an - a$	$MS_E = \frac{SS_E}{an - a}$	
Total	$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{y_{\cdot\cdot}^2}{an}$	$an - 1$		