

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia - Departamento de Metalurgia

**APLICAÇÃO DE UM MÉTODO NUMÉRICO COMPUTACIONAL
DESENVOLVIDO PARA OTIMIZAÇÃO DO CUSTO DA CARGA METÁLICA EM
FUNDIÇÕES**

Guilherme Pilotto Montagna

Porto Alegre

2018



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Metalurgia

**APLICAÇÃO DE UM MÉTODO NUMÉRICO COMPUTACIONAL
DESENVOLVIDO PARA OTIMIZAÇÃO DO CUSTO DA CARGA METÁLICA EM
FUNDIÇÕES**

Guilherme Pilotto Montagna

ESTE TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
Engenheiro Metalúrgico
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE METALURIGIA

Prof. Rafael Menezes Nunes COMGRAD-MEC
Coordenador do Curso de Engenharia Metalúrgica

Orientador: Prof. Vinicius Karlinski de Barcellos

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Vinicius K. Barcellos

Prof. Dr. Afonso Reguly

Prof. Dr. Antônio C. F. Vilela

Porto Alegre, 21 de dezembro 2018.

Guilherme Pilotto Montagna

Aplicação de um método numérico computacional desenvolvido para otimização do custo da carga metálica em fundições/ Guilherme Pilotto Montagna. – Porto Alegre, 2018-61 p.: il. (algumas color.); 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Vinicius Karlinski de Barcellos

Trabalho de Diplomação – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia - Departamento de Metalurgia
Engenharia Metalúrgica, 2018.

1. Método Numérico Computacional. 2. Cálculo de carga. 3. Redução de custo.

I. Vinicius K. Barcellos. II. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. III. Escola de Engenharia. IV. Aplicação de um método numérico computacional desenvolvido para otimização do custo da carga metálica em fundições

Guilherme Pilotto Montagna

**APLICAÇÃO DE UM MÉTODO NUMÉRICO COMPUTACIONAL
DESENVOLVIDO PARA OTIMIZAÇÃO DO CUSTO DA CARGA METÁLICA EM
FUNDIÇÕES**

Trabalho de Diplomação em Engenharia
apresentado ao Departamento de Metalurgia da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como pré-requisito necessário para obtenção do
título de Engenheiro Metalurgista

Trabalho aprovado. Porto Alegre, 21 de dezembro 2018:

Prof. Dr. Vinicius K. Barcellos
Professor Orientador

Prof. Dr. Antônio C. F. Vilela
Professor Responsável

Prof. Dr. Afonso Reguly
Professor Responsável

Porto Alegre

2018

“ Dedico este trabalho à minha família, em especial aos meus pais, por todo incentivo ao estudo, proporcionando-me o melhor para meu desenvolvimento pessoal e profissional. ”

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Claudir Montagna e Neli Pilotto Montagna, por todo apoio concedido, incentivando-me ao estudo e me proporcionando o melhor que podiam me oferecer para meu bem-estar e para meu desenvolvimento pessoal e profissional, juntamente com todo o amor transmitido das mais diversas formas.

Ao meu irmão, Jovani Montagna, pelo incentivo ao estudo e pela amizade que tivemos desde sempre.

Agradeço a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pelo ensino de qualidade e diferenciado proporcionado pelos professores do Departamento de Metalurgia fundamentais para a formação de Engenheiro Metalurgista.

Ao Engenheiro Mecânico da empresa Sulmaq–Unidade Microfusão, Juliano Luiz Três, pela aprovação e incentivo no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao Técnico em Metalurgia e Química da empresa Sulmaq–Unidade Microfusão, João Luiz Freitas, por todo apoio e dedicação para que este trabalho tivesse êxito.

Agradeço aos amigos e colegas do curso de Engenharia Metalúrgica da UFRGS, em especial ao Anderson Nicolodi, e aos amigos e colegas da empresa Sulmaq – Unidade Microfusão, que contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento do presente trabalho.

RESUMO

No cenário atual, um dos principais desafios das empresas de fundição de metais é possuir um produto competitivo no mercado nacional e internacional. A busca incessante por redução de custos inerentes ao processo é um fator determinante para estas empresas alcançarem êxito neste quesito. Desse modo, o presente trabalho investigou e avaliou a viabilidade técnica e econômica na utilização de um método numérico computacional desenvolvido para otimizar o custo das cargas metálicas nas fundições. O estudo realizado contemplou dois materiais distintos: um aço DIN 1.3355 e um aço SAE 8620 modificado, ambos avaliados em um conjunto de testes compreendidos em triplicidade utilizando o método numérico desenvolvido para os cálculos de cargas e, testes realizados em triplicidade para os mesmos materiais utilizando o cálculo de carga feito como de praxe pela empresa. A redução de custo encontrada no presente estudo utilizando o método numérico computacional alcançou resultados relevantes e satisfatórios, desde valores de 2,1% até reduções de custo de 20%, assim como sua viabilidade técnica satisfeita de modo geral.

Palavras-chave: Método Numérico Computacional. Cálculo de Carga. Redução de Custo.

ABSTRACT

In the current scenario, one of the main challenges of metal casting companies is to have a competitive product in the national and international market. The incessant search for cost reductions inherent to the process is a determining factor for this company to achieve this success. Thus, the present work investigated and evaluated the technical and economic viability of the use of a computational numerical method developed to optimize the cost of metallic charges in the foundries. The study consisted of two different materials: a DIN 1.3355 steel and a modified SAE 8620 steel, both evaluated in a set of tests comprised in triplicates using the numerical method developed for the calculations of charges and triplicates for the same materials using the calculation of charge made by the company as usual. The cost reduction found in the present study using the computational numerical method reached relevant and satisfactory results, from values of 2.1% to 20% cost reductions, as well as its overall technical viability.

Keywords: Computational Numerical Method. Calculation of Charge. Cost Reduction.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Versatilidade do processo de fundição de metais. (a) Um molde para produção de uma peça de 61.500 kg usada em reatores nucleares. (b) Uma variedade de pequenas peças de <i>hardware</i> pesando apenas algumas gramas.	15
Figura 2 - Produção de milhões de blocos de motor automotivo em ferro fundido.	16
Figura 3 - Típico forno a cadinho estacionário para pequenas fundições.	17
Figura 4 - Esquematização de um forno revérbero com aquecimento pela combustão de material fóssil.....	18
Figura 5 - Seção transversal de um forno de indução sem núcleo. Todo o banho metálico é circundado pela bobina de cobre resfriada a água e componentes estruturais.	19
Figura 6 - Representação esquemática de um forno elétrico a arco.	20
Figura 7 - Representação esquemática de um forno cubilô.....	21
Figura 8 - Representação hipotética da curva de nível entre a combinação de dois fatores: taxa de fluxo de combustível e taxa de oxidante.....	30
Figura 9 - Gerenciamento de dados no <i>Microsoft Excel</i>	36
Figura 10 - Fluxograma da metodologia seguida neste estudo para os testes que contemplam a utilização do método numérico computacional.	38
Figura 11 - Fluxograma da metodologia seguida neste estudo para os testes que não contemplam a utilização do método numérico computacional, ou seja, metodologia seguida pela empresa como de praxe.	39
Figura 12 - Certificado de qualidade da corrida 1266005.	44
Figura 13 - Certificado de qualidade das corridas 1266007 e 1266009.	45
Figura 14 - Certificado de qualidade das corridas 1266508 e 1266510.	47
Figura 15 - Certificado de qualidade da corrida 1266876.....	48
Figura 16 - Certificado de qualidade das corridas 1267608, 1267612 e 1267614.	50
Figura 17 - Certificado de qualidade das corridas 1267627, 1267629 e 1267632.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Custo unitário de algumas matérias-primas disponíveis em junho de 2018.....	25
Tabela 2. Composição química do aço AISI 348 (% em massa).	35
Tabela 3. Composição química do DIN 1.3355 (% em massa).....	40
Tabela 4. Composição química do SAE 8620 modificado (% em massa).	41
Tabela 5. Carga metálica utilizada na corrida 1266005.	43
Tabela 6. Carga metálica utilizada na corrida 1266007.	44
Tabela 7. Carga metálica utilizada na corrida 1266009.	45
Tabela 8. Carga metálica utilizada na corrida 1266508.	46
Tabela 9. Carga metálica utilizada na corrida 1266510.	46
Tabela 10. Carga metálica utilizada na corrida 1266876.	47
Tabela 11. Carga metálica utilizada na corrida 1267608.	48
Tabela 12. Carga metálica utilizada na corrida 1267612.	49
Tabela 13. Carga metálica utilizada na corrida 1267614.	49
Tabela 14. Carga metálica utilizada na corrida 1267627.	51
Tabela 15. Carga metálica utilizada na corrida 1267629.	51
Tabela 16. Carga metálica utilizada na corrida 1267632.	51
Tabela 17. Análise de custos do conjunto de testes realizados pela empresa para o aço DIN 1.3355.....	53
Tabela 18. Análise de custos do conjunto de testes executados com a utilização do método numérico computacional para o aço DIN 1.3355.	53
Tabela 19. Análise de custos do conjunto de testes realizados pela empresa para o aço SAE 8620 modificado.	54
Tabela 20. Análise de custos do conjunto de testes executados com a utilização do método numérico computacional para o SAE 8620.....	55
Tabela 21. Análise de erro para a corrida 1266508.....	56
Tabela 22. Análise de erro para a corrida 1267627.....	56

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Fundição de Metais	14
2.2	Fornos para elaboração de ligas metálicas em fundição	16
2.2.1	Forno a Cadinho	16
2.2.2	Forno Revérbero	17
2.2.3	Forno Elétrico de Indução	18
2.2.4	Forno Elétrico a Arco	19
2.2.5	Forno Cubilô	20
2.2.6	Forno a Vácuo	21
2.3	Matérias-primas para obtenção de ligas metálicas	22
2.4	Custo da matéria-prima para elaboração de cargas metálicas	25
2.5	Cálculo de carga e fusão	27
2.6	Método Simplex	27
2.6.1	Base teórica	28
2.6.2	Interpretação geométrica	29
2.6.3	Aplicações do Método Simplex	31
2.7	Erro em modelos matemáticos	32
3	MATERIAS E MÉTODOS	33
3.1	Desenvolvimento do Método Numérico Computacional	33
3.1.1	Método Simplex	33
3.1.2	Condições de contorno	34
3.1.3	Considerações e limitações das condições de contorno	34
3.1.4	Prática computacional: plataforma <i>Microsoft Excel</i>	36

3.2	Etapa experimental	37
3.2.1	Cálculo de carga: DIN 1.3355 utilizando o Método Numérico Computacional ...	39
3.2.2	Cálculo de carga: DIN 1.3355 realizado pela empresa.....	41
3.2.3	Cálculo de carga: SAE 8620 modificado utilizando o Método Numérico Computacional.....	41
3.2.4	Cálculo de carga: SAE 8620 modificado realizado pela empresa.....	42
3.3	Método Numérico Computacional: análise de erro	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1	Cálculo de cargas: DIN 1.3355 realizado pela empresa	43
4.2	Cálculo de cargas: DIN 1.3355 realizado com o Método Numérico Computacional	46
4.3	Cálculo de cargas: SAE 8620 modificado realizado pela empresa	48
4.4	Cálculo de cargas para o aço SAE 8620 modificado realizado com o Método Numérico Computacional	51
4.5	Método Numérico Computacional: viabilidade econômica	53
4.5.1	Conjunto de testes DIN 1.3355.....	53
4.5.2	Conjunto de testes SAE 8620 modificado	54
4.6	Erro associado à utilização do Método Numérico Computacional	56
5	CONCLUSÕES	58
6	TRABALHOS FUTUROS	59
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

1 INTRODUÇÃO

A fundição consiste, basicamente, em inserir metal líquido dentro de um molde (etapa chamada de vazamento) com um subsequente resfriamento para solidificação do metal. A retirada da peça solidificada depende do tipo de molde utilizado. Os produtos obtidos ainda passam por etapas posteriores, como retirada dos canais de alimentação, rebarbação, por vezes são necessários tratamentos térmicos e termoquímicos, e outras vezes também necessita acabamentos mecânicos, como usinagem [KOHMANN, 2015].

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 de suas empresas para obter um produto competitivo no mercado nacional e internacional [KOHMANN, 2015]. Desse modo, algumas ferramentas são empregadas nas fundições visando a redução de custo, como modelos de otimização das cargas metálicas.

Atualmente, diversas fundições já utilizam de modelos matemáticos para o cálculo de cargas objetivando a minimização dos custos e uma correta utilização e disposição dos estoques, assim, pode-se otimizar todo o processo produtivo. Como exemplo, as fundições dispõem de uma grande quantidade de matéria-prima para compor a carga metálica, como retorno de canais e massalotes, cavacos de usinagem, sobras de estampagem, ferroligas, sucatas, peças sucateadas entre outros [MAGALHÃES, D. R., 2017]. De fato, além da variedade expressiva de matérias-primas, outro fator relevante é que o valor de mercado das mesmas oscila muito, o que torna a utilização de *softwares* para a gestão e cálculo de carga muito conveniente [BALDAM, 2014].

O objetivo deste trabalho é investigar e avaliar a viabilidade técnica e econômica da utilização de um método numérico computacional desenvolvido para otimizar o custo das cargas metálicas nas fundições.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

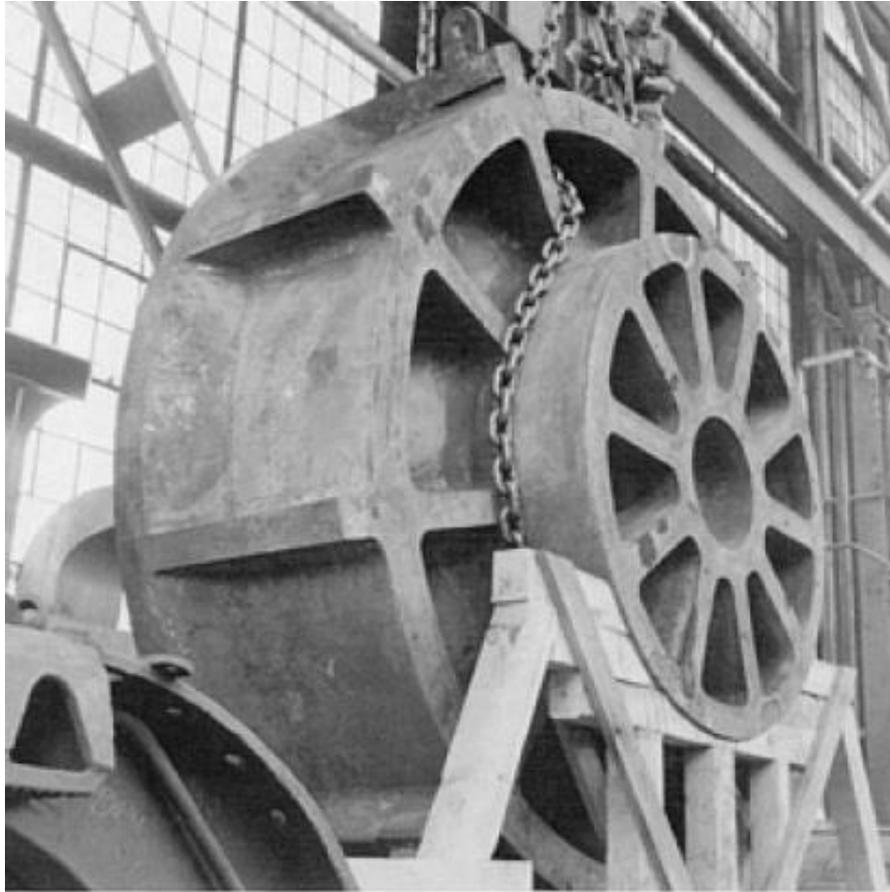
2.1 Fundição de metais

Os produtos obtidos da indústria de fundição de metais, são fabricados em uma única etapa partindo do metal líquido, sem operações intermediárias de trabalho mecânico, como laminação ou forjamento. A simplicidade básica deste, o mais direto de todos os processos metalúrgicos, forneceu a base para o crescimento de uma vasta indústria com uma ampla diversidade de produtos [BEELEY, 2001].

A fundição de metais é o único entre os processos de fabricação capaz de produzir produtos metálicos de toda variedade. A razão por tal característica é pelo processo possuir um conjunto de metodologias de moldagem e fundição que são capazes de fabricar componentes complexos utilizando qualquer metal disponível, com produtos variando em peso de algumas gramas e partes individuais pesando várias centenas de toneladas (Fig. 1). Processos de fundição estão disponíveis e em uso, economicamente viáveis para a produção de uma única peça de protótipo, enquanto outros atingem suas economias na criação de milhões da mesma peça (Fig. 2). Praticamente o processo se aplica a qualquer metal que possa ser fundido até seu estado líquido [ASM HANDBOOK, 1992].

No contexto histórico, no período de 5000 a 3000 a.C. surgiram os primeiros artefatos fundidos em cobre com moldes feitos de pedras lascadas. Na sequência surge a era do bronze. O processo de fundição de ferro inicia na China em 600 a.C.; já o aço se dá bem mais tarde, na Inglaterra, em 1740, atribuído ao inventor inglês, filho de imigrantes alemães, Benjamin Huntsman [BALDAM, 2014].

Figura 1. Versatilidade do processo de fundição de metais. (a) Um molde para produção de uma peça de 61.500 kg usada em reatores nucleares. (b) Uma variedade de pequenas peças de *hardware* pesando apenas algumas gramas.



a



b

FONTE: ASM HANDBOOK, 1992.

Figura 2. Produção de milhões de blocos de motor automotivo em ferro fundido.



Fonte: ASM HANDBOOK, 1992.

2.2 Fornos para elaboração de ligas metálicas em fundição

Essencialmente, todo metal ou liga obtido na fundição é elaborado pela própria empresa, com exceção quando a empresa se situa próximo a uma aciaria. É o caso da Taksid em Betim-MG que utiliza ferro-gusa líquido produzido próximo à fábrica [BALDAM, 2014].

Para elaboração de tais ligas metálicas são utilizados os fornos de fusão, que podem ser definidos como uma unidade de fusão que deve aquecer uma massa de metal, de determinada composição química até uma temperatura de vazamento, com velocidade de fusão e eficiência econômica [NOTAS DE AULA DA DISCIPLINA DE FUNDIÇÃO I, 2016 – UFRGS].

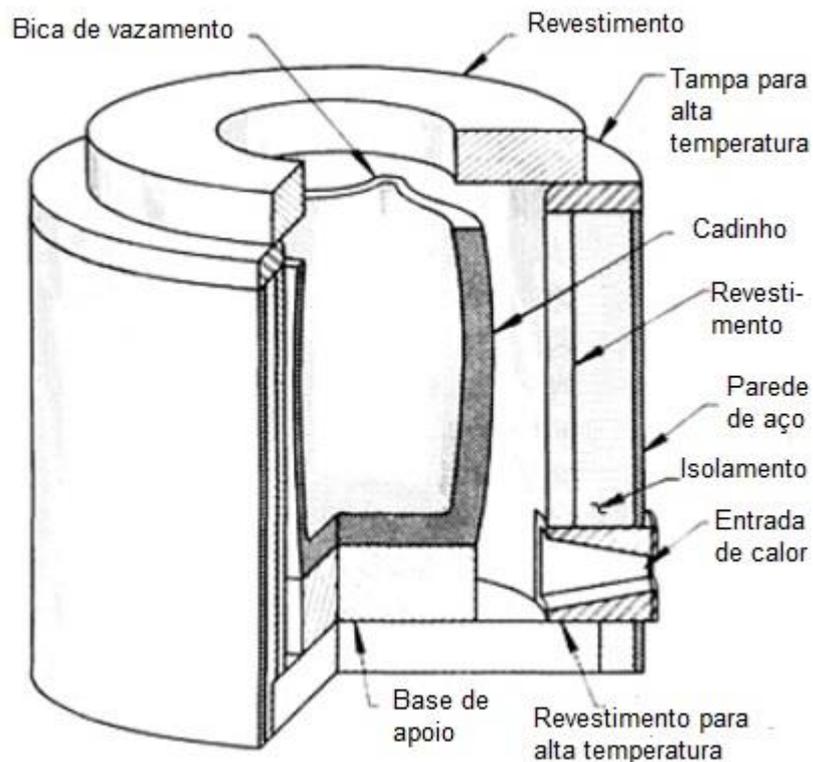
Os fornos geralmente são classificados em dois grupos: pela fonte de energia utilizada (elétricos ou a combustível) e pelo modo operacional (cadinho, revérbero, de cuba etc.).

2.2.1 Forno a Cadinho

O forno a cadinho é usualmente cilíndrico com uma estrutura externa em geral de aço e revestimento interno de refratários. O forno possui em seu interior um cadinho de material

resistente a altas temperaturas, o qual irá conter o metal líquido. O aquecimento deste cadinho será de forma indireta e os combustíveis utilizados podem ser líquidos, gasosos ou até mesmo sólidos, bem como resistência elétrica também é empregada. As capacidades destes fornos vão de dezenas de gramas até poucas toneladas, porém sua utilização é predominantemente de capacidades menores de uma tonelada. Pelo seu baixo custo de construção, esse tipo de forno é muito comum em fundições [BALDAM, 2014]. A figura 3 ilustra um forno a cadinho.

Figura 3. Típico forno a cadinho estacionário para pequenas fundições.



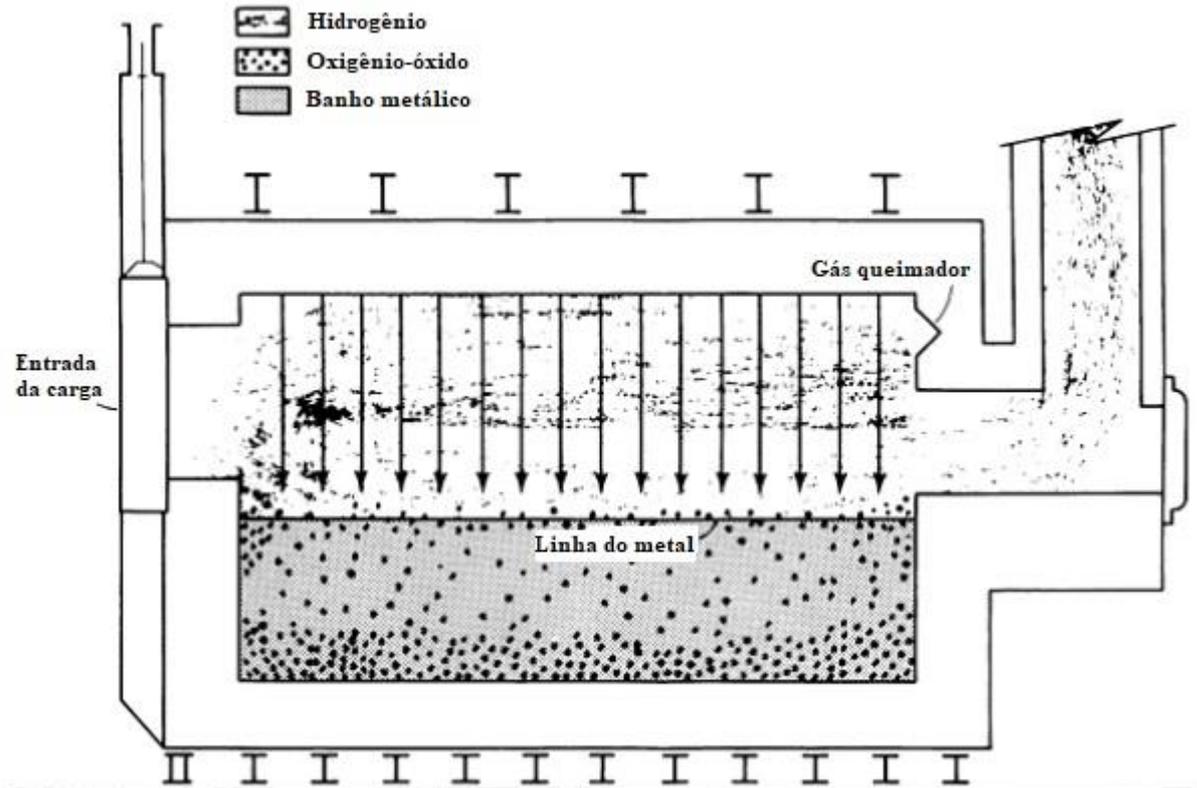
Fonte: Adaptado ASM HANDBOOK, 1992.

2.2.2 Forno Revérbero

Estes fornos são utilizados para fundir cargas com mais de 400 kg. Os dois tipos de fornos revérberos mais importantes são os aquecidos pelo calor gerado na queima de combustíveis (óleo ou gás) e os via calor gerado por arco elétrico. Os fornos que utilizam combustíveis possuem o inconveniente de todos os gases gerados pela queima permanecerem em contato com o banho metálico, podendo haver contaminação do mesmo. Já os fornos que utilizam arco elétrico possuem baixo rendimento térmico. Estes fornos caracterizam-se pelo fato do calor

gerado aquecer a parte superior da carga, sendo a escória a mais irradiada [BALDAM, 2014]. A figura 4 ilustra, esquematicamente, um forno revérbero.

Figura 4. Esquemática de um forno revérbero com aquecimento pela queima de combustível fóssil. As setas indicam a direção do calor gerado.



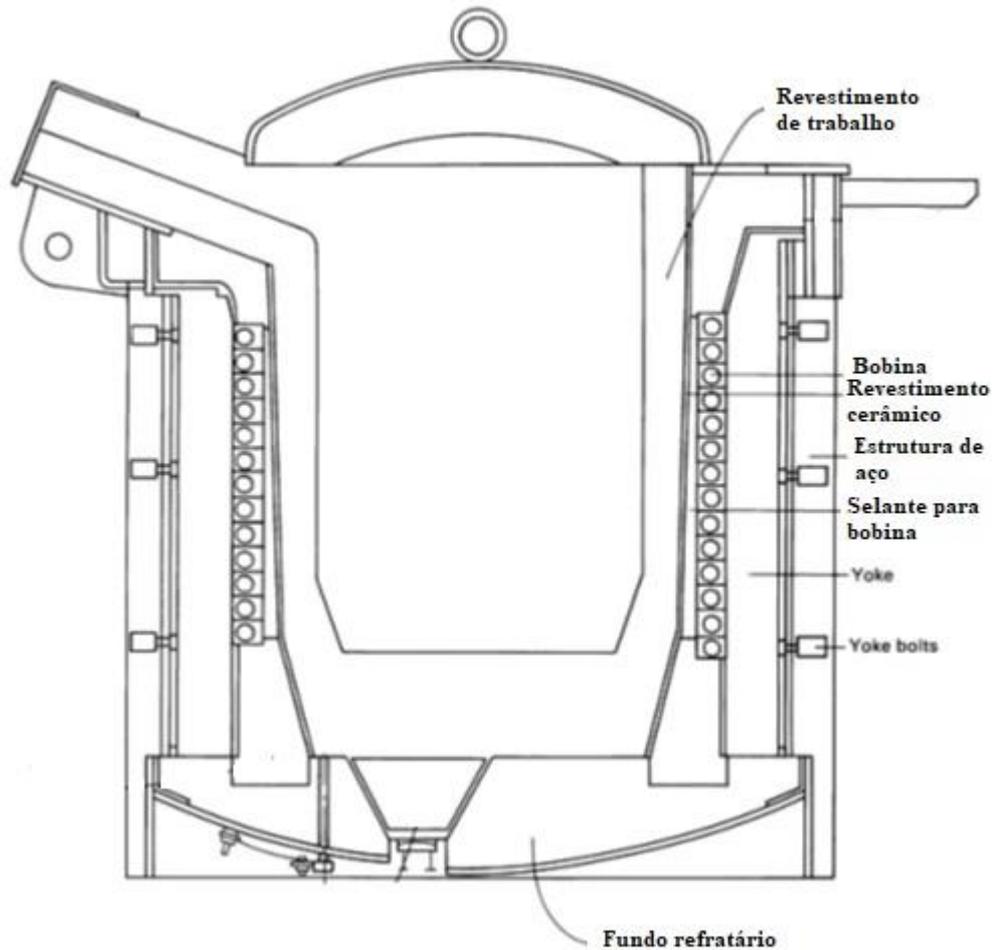
Fonte: Adaptado ASM HANDBOOK, 1992.

2.2.3 Forno Elétrico de Indução

Os fornos elétricos de indução estão progressivamente ganhando mais aceitação e utilização nas fundições, este fato é consequência do excelente controle metalúrgico possível, juntamente com sua operação apresentar isenção na geração de poluentes [ASM HANDBOOK, 1992].

O efeito Joule é o responsável pelo aquecimento da carga metálica neste forno. Uma corrente elétrica que passa por uma bobina, gera corrente elétrica induzida na carga metálica, que, por sua resistência elétrica, é aquecida, fundida e sobreaquecida. Os fornos elétricos de indução mais utilizados são os do tipo cadinho, também conhecidos como sem núcleo. Estes fornos são amplamente utilizados em fundições e possuem capacidade de dezenas de quilos até 25 toneladas [BALDAM, 2014]. A figura 5 ilustra um forno de indução do tipo sem núcleo.

Figura 5. Seção transversal de um forno de indução sem núcleo. Todo o banho metálico é circundado pela bobina de cobre resfriada por água e componentes estruturais.

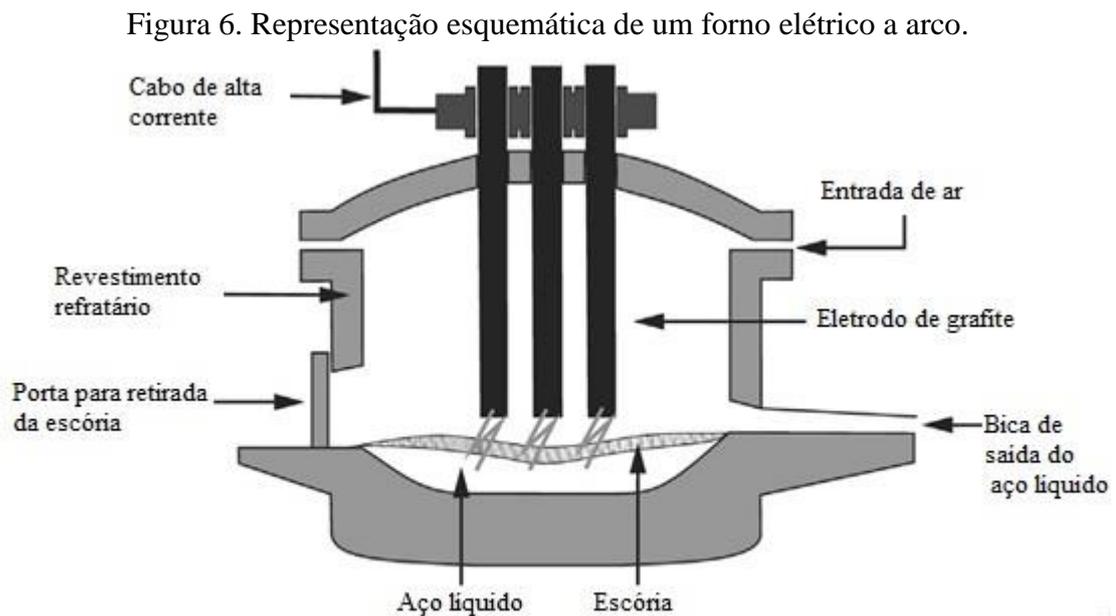


Fonte: Adaptado ASM HANDBOOK, 1992.

2.2.4 Forno Elétrico a Arco

Os fornos elétricos a arco são imensamente utilizados em siderúrgicas e, especialmente em usinas semi-integradas que trabalham intensamente com sucatas. Estes fornos possuem alto desempenho, rentabilidade, versatilidade de ligas, fácil controle de temperatura e maior flexibilidade operacional. A fonte de calor destes fornos é o arco elétrico gerado pela diferença de potencial entre eletrodos, que pelas altas temperaturas atingidas, fundem e sobreaquecem o metal direta ou indiretamente. Entre os diferentes fornos elétricos a arco, há duas variações importantes: os fornos de arco direto e os fornos de arco indireto ou arco livre. Fornos elétricos a arco direto fornecem o calor através do arco gerado entre o eletrodo e a carga metálica, desta forma a carga deve ser, necessariamente, condutora elétrica e o eletrodo vai penetrando na carga a medida que ela funde. Nos fornos a arco indireto, o arco é estabelecido entre dois ou três

eletrodos, desta forma, os eletrodos não penetram a carga e o aquecimento da mesma é feito indiretamente por radiação, neste modelo a eficiência é menor, porém possibilita a fusão de cargas com elementos químicos voláteis ou muito oxidáveis. As capacidades destes fornos vão de centenas de quilos até mais de 200 toneladas e seu investimento é custoso, devido à grande complexidade que possuem [BALDAM, 2014]. A figura 6 ilustra, esquematicamente, um forno elétrico a arco.

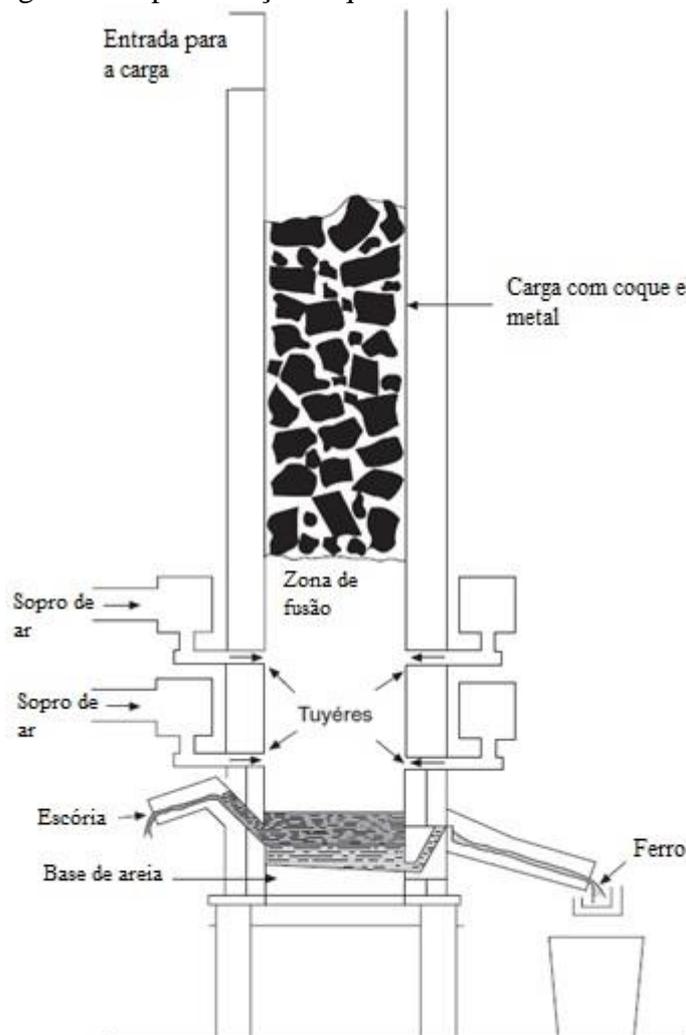


FONTE: Adaptado GAJIC D., 2016.

2.2.5 Forno Cubilô

O forno cubilô distingue-se dos demais fornos por ser utilizados somente em fundições de ferro fundido, principalmente em peças de ferro fundido cinzento. O cubilô é um forno tipo coluna, que utiliza coque como combustível. Ar contendo oxigênio é soprado pelas ventaneiras e atua como comburente para a combustão do coque que libera o calor necessário para o aquecimento, fusão e sobre aquecimento do metal [BALDAM, 2014]. A figura 7 ilustra um forno cubilô, esquematicamente.

Figura 7. Representação esquemática de um forno cubilô.



FONTE: Adaptado FOSECO, 2000.

2.2.6 Forno a Vácuo

O processo de fusão a vácuo originalmente surgiu para o processamento de ligas especiais e tornou-se mais comum à medida que o processo foi sendo desenvolvido. Assim, o metal é fundido em condições de vácuo usando um forno usualmente de indução sem núcleo magnético. O forno é envolto por uma jaqueta de aço refrigerada e de alta resistência para suportar a ação da pressão negativa de vácuo. O metal líquido é vazado dentro da câmara de vácuo. Estes fornos são utilizados normalmente para materiais que possuem afinidade com o oxigênio, nitrogênio ou hidrogênio. Deste modo, são aplicados a materiais que demandam alta pureza e isenção de contaminações, como por exemplo, peças de aplicações aeronáuticas [BALDAM, 2014].

2.3 Matérias-primas para obtenção de ligas metálicas

Uma carga metálica é constituída essencialmente por 30 a 50% de material retorno e 50 a 70% de sucata comprada. Materiais não oxidáveis, como níquel e molibdênio, também podem ser adicionados com a carga de sucata [ASM HANDBOOK, 1992]. Nos tópicos a seguir serão apresentadas as principais matérias-primas que as empresas utilizam em suas fundições.

Lingotes primários

É uma matéria-prima de maior qualidade e menor pureza, entretanto de maior custo. São produzidos e disponibilizados por usinas que fazem redução do metal desejado. Possuem alta densidade aparente e excelente rendimento [BALDAM, 2014].

Lingotes secundários

Adquiridos normalmente de empresas de processamento de sucata. Possuem um custo menor e podem possuir elementos contaminantes e menor controle químico de que os lingotes primários. Possuem alta densidade aparente e excelente rendimento [BALDAM, 2014].

Sucata

Possui o menor custo entre qualquer outro material metálico, porém é recorrente a presença de contaminantes. Suas características químicas e físicas são totalmente dependentes do tipo de sucata [BALDAM, 2014].

Material de retorno

É essencialmente oriundo de canais, massalotes, peças defeituosas, restos de fusão, cavacos e outras fontes internas de metal que não foram transformadas em peças entregue para o cliente. O material normalmente é de boa qualidade [BALDAM, 2014].

Ferroliga

Este conceito engloba um conjunto de materiais utilizados para a correção da composição química de ligas ferrosas (Fe-Si, Fe-Si-Mn, Fe-Ni, Fe-Cr, Fe-Mo, Fe-Mn, Fe-Co...), para atuar como desoxidantes (Fe-Si), nodularizantes (Fe-Si-Mg) e inoculantes (Fe-Si granulado) [BALDAM, 2014].

Liga mãe

Possui as mesmas funções básicas da ferroliga, porém normalmente são usadas na elaboração de não-ferrosos: Al-Si, Al-Mg, Al-Cu, Cu-P (desoxidante para ligas de cobre ou para corrigir composição), Cu-Sn, Ca-Si (desoxidante para aço em fundição) [BALDAM, 2014].

Materiais de liga metálicos ou não metálicos puros

São materiais cuja composição química é essencialmente constituída por um único elemento. Segundo BALDAM, alguns desses materiais são o silício metálico, níquel em folhas, coque, carbureto de silício (corrigir carbono ou tornar escória espumante), lítio encapsulado em tubos de cobre (desoxidantes para ligas de cobre).

Carburantes

A função do carburante na carga é enriquecê-la em carbono. A utilização de carburante tem-se intensificado, pois tem sido comum encontrar sucata de aço com custo menor que ferros gusa, levando a diminuição de custo na produção de ferros fundidos, além de teor de S (enxofre) e P (fósforo) reduzidos. Os carburantes mais utilizados são carbureto de silício, coque e carvão vegetal [BALDAM, 2014].

Fundentes

São utilizados para diminuir o ponto de fusão e formar uma escória que protege o banho metálico contra a atmosfera. O CaO (óxido de cálcio) é muito utilizado na elaboração de ferrosos, na forma de cal ou calcário decomposto pelas altas temperaturas envolvidas. O SiO₂

(dióxido de silício) na forma de areia de quartzo é empregado para aumentar a fluidez do banho e corrigir a basicidade [BALDAM, 2014].

Fluxantes

Possuem a mesma finalidade que o fundente, porém o termo é comumente utilizado para composições que possuem sais e na elaboração de não-ferrosos. Para ligas de alumínio, os fluxantes mais utilizados são NaCl e KCl. Para ligas de magnésio, um fluxante típico contém 49% de $MgCl_2$, 27% de KCl, 20% $BaCl_2$ e 4% de CaF_2 . Nas ligas de cobre, um fluxo oxidante pode possuir CuO e MnO_2 , um fluxo neutro conterá fluorita (CaF_2) e NaF, ou pode ainda ser coberto com carvão para gerar uma atmosfera redutora e evitar a perda de zinco do banho [ASM HANDBOOK, 1992].

Escorificante

Termo genérico utilizado a produtos, comumente comerciais e prontos para uso, utilizados para formar escória em fornos usualmente de indução e a cadinho. São produtos com composições que podem possuir SiO_2 , sais, carvão, CuO e outros, dependendo do efeito que se deseja na liga (atmosfera redutora ou oxidante, fluidificar a escória, formar escória etc.) [BALDAM, 2014].

Coagulante de escória

Frequentemente são produtos comerciais a base de sílica e outros constituintes que, quando adicionados na superfície do banho, geram uma escória momentânea de alta viscosidade, facilitando desta forma sua retirada da superfície do banho ou panela [BALDAM, 2014].

Desgaseificantes

A função essencial desses produtos é diminuir a quantidade de gases dissolvidos no banho metálico com o objetivo de mitigar a incidência no defeito de porosidade em peças fundidas [ASM HANDBOOK, 1992]. O hexacloretano é um desgaseificante na forma de pastilhas, especialmente utilizado para remoção de hidrogênio em ligas de alumínio, porém seu uso gera

muitos vapores e demanda um sistema de exaustão muito eficiente. O argônio é um gás inerte e muito utilizado para desgaseificação de aços pelo mecanismo de arraste [BALDAM, 2014].

Desoxidantes

A prática de desoxidação do metal líquido é muito importante. Visto que, o metal ao solidificar reduz a solubilidade do oxigênio, desse modo um excesso deste elemento é rejeitado pelo aço e tende a formar defeitos na forma de bolhas e inclusões não metálicas em peças fundidas. O princípio para promover a desoxidação de um metal é fundamentado pela termodinâmica, o qual será basicamente adicionar materiais no banho que possuem elevada afinidade química com o oxigênio [R. J. FRUEHAN, 1985]. Para aços, são utilizados alumínio granulado ou em fios, Ca-Si, Ca-Si-Mn em pedras e Fe-Si em pedras. Para ligas de cobre, cobre fosforoso com 13% de P e lítio são frequentemente utilizados como desoxidantes [BALDAM, 2014].

Refrigerante

Esta matéria-prima é empregada para diminuir a temperatura do banho metálico. O mais comumente utilizado é o FeO (óxido de ferro) proveniente de carepas da própria fábrica, no caso de ligas ferrosas, ou é utilizado barras de liga de composição próxima à da liga produzida [BALDAM, 2014].

2.4 Custo da matéria-prima para elaboração de cargas metálicas

O custo das matérias-primas, principalmente as de sucatas ferrosas, são estabelecidos de acordo com oferta e demanda no cenário mundial [KOHMANN, 2015]. Desse modo, os custos com matéria-prima podem variar significativamente em curtos períodos de tempo.

A tabela 1 ilustra o preço de algumas matérias-primas de forma indicativa no mês de junho de 2018, com base nos valores de mercado.

Tabela 1. Custo unitário de algumas matérias-primas disponíveis em junho de 2018.

Matéria-Prima	Espécie	Custo R\$/kg
AISI 304	Sucata	4,00
AISI 304L	Sucata	13,60
AISI 430	Sucata	1,30
AISI 1010	Sucata	1,00
Fe-Cr 60%	Ferroliga	15,70
Ni 4x4 99,9%	Metálico	67,00
Carburante 99%	Elemento	2,00
Mn 99,9%	Metálico	10,40
Fe-Si 75%	Ferroliga	10,00
Cu 99,9%	Metálico	27,00
Fe-Mo 65%	Ferroliga	74,00
Fe-Nb 66%	Ferroliga	167,00
W 99,5%	Metálico	172,00
Fe-V 50%	Ferroliga	220,00
Al 99%	Metálico	12,00
Canais, peças sucateadas, etc.	Material de retorno	Variável

Fonte: Autor, 2018.

De fato, com base na tabela 1 acima, pode-se inferir que algumas matérias-primas disponíveis para a elaboração das cargas metálicas possuem um custo unitário significativamente alto, como por exemplo o Fe-V 50%, o Fe-Nb e o W. Outro fator relevante é o custo do material de retorno da empresa, que compreende o preço de peças sucateadas, canais, massalote, entre outros. O custo unitário desta matéria-prima, para este trabalho, será o próprio custo de fabricação apresentado de forma indicativa, ou seja, o custo descrito na tabela

1 ilustra de forma representativa os valores de mercado para cada material, desse modo, um aço de alta liga haverá um custo unitário maior que um aço ao carbono de baixa liga.

2.5 Cálculo de carga e fusão

Com base no preço de mercado de vários tipos de sucata disponíveis e nas precauções com a qualidade das peças fundidas produzidas, a primeira tomada de decisão nas fundições é determinar a porcentagem de vários tipos de sucata e ferroligas que podem ser usados com segurança. Uma carga metálica é então calculada utilizando porcentagens preferidas de tipos disponíveis de ferro fundido, sucata de aço, ferro gusa e retornos. A contribuição de cada elemento químico no respectivo constituinte da carga é totalizada e as previsões calculadas para perdas e ganhos antecipados. As ferroligas são calculadas para completar o conteúdo necessário de silício e manganês, por exemplo [ASM HANDBOOK, 1992].

A sucata de aço é a matéria-prima mais importante na fabricação de produtos em aço. Somente a sucata contribui entre 60% e 80% dos custos totais de produção [SEIDU S. O.; ONIGBAJUMO A., 2015]. Com a adição de ferroligas, diferentes ligas de aços podem ser produzidas a partir da fusão total da sucata. No entanto, o grau em que a mistura de sucata pode ser otimizada, qual operação de fusão será a mais adequada, assim como, a automatização do processo para alcançar a composição química correta são fatores de interesse [MATSUURA, H., 2008]. Esses fatores dependem, principalmente, do conhecimento das propriedades da sucata, das matérias-primas que compõem a carga metálica, do cálculo de carga adequado e da boa triagem e seleção da sucata [SEIDU S. O., ONIGBAJUMO A, 2015].

A qualidade do aço produzido é regida por equações metalúrgicas bem estabelecidas [Mills K., 2011], que são uma função da engenharia de processo do forno utilizado. Isso, portanto, exige o uso de computadores para obter o resultado ideal em tempo real e economizar o tempo de inatividade da produção durante a fusão. No forno de indução, a qualidade do aço produzido depende, em grande parte, da mistura das matérias-primas que compõem a carga, da qualidade da sucata, dos aditivos e das ferroligas utilizadas [SEIDU S. O., ONIGBAJUMO A, 2015].

2.6 Método Simplex

Por muitos anos, o método simplex idealizado por George B. Dantzig tem sido a ferramenta matemática mais eficiente para resolver problemas de programação linear. É provavelmente esse algoritmo matemático para o qual um considerável tempo de computação

em computadores é gasto [BORGWARDT, K. H, 1949]. Além do mais, o principal algoritmo de solução para o problema LP (*linear programs*) tem sido o método simplex introduzido por Dantzig. Desde a sua criação, o algoritmo passou por uma evolução substancial, mas seus princípios básicos permaneceram os mesmos [DANTZIG, 1988].

O método simplex é um procedimento computacionalmente exigente que requer o uso de computadores. É amplamente aceito e a crescente necessidade da solução de problemas de LP na vida real inspirou, significativamente, o desenvolvimento de computadores na década de 1950 e início dos anos 60 [DANTZIG, 1988].

Do ponto de vista teórico, o método simplex não é necessariamente um algoritmo promissor, já que seu pior desempenho é exponencial. Isso significa que o número de iterações necessárias para resolver um problema é limitado por uma função exponencial de m e n . Exemplos foram criados para os quais a contagem de iterações do algoritmo atinge seu máximo teórico [KLEE, V.; MINTY, G., 1972]. Na prática, no entanto, o método simplex demonstra resultados médios para uma função linear de m e é altamente eficiente na solução de problemas reais [MAROS, I, 2003].

2.6.1 Base teórica

Para o entendimento teórico do método simplex, considere-se a forma computacional descrita pelas equações (2.1 – 2.3). Onde P1 (equação 2.1) é a função objetivo a qual deseja-se minimizar e as equações 2.2 e 2.3 são as condições de contorno estabelecidas para a variável x [MAROS, I, 2003].

$$(P1) \quad \text{minimizar} \quad z = c^T \cdot x \quad (2.1)$$

$$\text{restrições} \quad Ax = b \quad (2.2)$$

$$x \geq 0 \quad (2.3)$$

onde $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ e os vetores são de dimensões compatíveis. Como A contém uma matriz identidade $m \times m$, para as variáveis lógicas há uma classificação total em linha e $m < n$ [MAROS, I, 2003].

Qualquer vetor x que satisfaça (2.2) é chamado de solução. Se uma solução satisfaz as restrições de não-negatividade (2.3), é chamada de solução viável. O conjunto de soluções possíveis é denotado por X , como é exibido na equação (2.4) [MAROS, I, 2003].

$$X = \{x : Ax = b, x \geq 0\} \quad (2.4)$$

A ideia principal do método simplex é se um problema tem uma solução ótima, então há uma solução básica que também é ótima. Portanto, é suficiente lidar com soluções básicas. O método simplex começa com uma solução básica viável. Se não for a ideal, uma sequência de bases viáveis vizinhas é determinada com um valor objetivo monoatômico até que uma solução ótima seja alcançada ou a limitação da solução é detectada [MAROS, I, 2003].

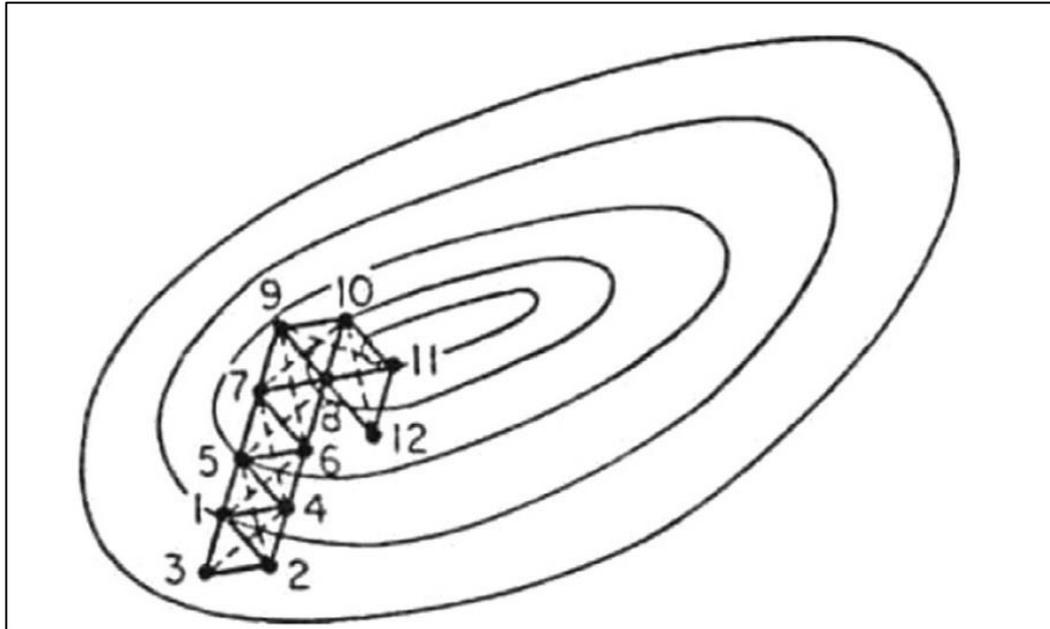
2.6.2 Interpretação geométrica

A interpretação geométrica do método simplex é a seguinte: inicia-se a análise em um ponto de canto, a origem, e observa-se as bordas incidentes com esse ponto. Em seguida, o método escolhe uma dessas bordas para seguir como caminho, movendo-se ao longo da mesma e fazendo com que o valor objetivo fique maior ou permaneça o mesmo. Se a borda continuar para sempre, então o LP (*linear programs*) é ilimitado; se a borda não perdurar para sempre, acaba em outro ponto de canto. Então o método simplex repete sucessivamente esse procedimento até parar em certo ponto. Esse ponto é o lugar onde o “valor objetivo” (solução de um problema linear ao qual pretende-se maximizar ou minimizar) é o maior. Normalmente, isso só levaria você a um máximo local, em vez do máximo global, mas isso não pode acontecer ao resolver um LP. Pois de fato isso ocorre porque os valores objetivos e as desigualdades são na forma linear [HECKMAN C. C, 2006].

Desse modo, geometricamente o método simplex é baseado em uma figura definida por um número de pontos igual a $N + 1$ ao número de fatores para otimizar (N) [CERDÀ, V.; CERDÀ J.L.; IDRIS, A. M., 2016].

O cenário mais simples compreende apenas dois fatores e o simplex seria, geometricamente, um triângulo. Como forma de exemplo, suponhamos que pretendemos otimizar a taxa de fluxo de combustível (fator 1, F_1) e o oxidante (fator 2, F_2) para determinar um elemento X usando espectrometria de absorção atômica. A figura 8 exibe curvas de nível de mesma resposta, ou seja, existe um valor constante de absorvência para diferentes combinações de taxas de combustível e oxidante. O objetivo é obter uma combinação dos dois fatores onde a absorvência é máxima [CERDÀ, V.; CERDÀ J.L.; IDRIS, A. M., 2016].

Figura 8. Representação hipotética da curva de nível entre a combinação de dois fatores: taxa de fluxo de combustível e taxa de oxidante.



Fonte: Adaptado CERDÀ, V.; CERDÀ J.L.; IDRIS, A. M., 2016.

A otimização começa nos pontos 1, 2 e 3, que formam um triângulo equilátero dando o ponto 3 como a pior resposta. Dessa forma, a resposta provavelmente aumentará na direção oposta ao ponto 3. Portanto, o triângulo refletido 1-2-4 é estudado, sendo 4 o ponto refletido a partir de 3. Um novo experimento é realizado para obter a absorvência no ponto 4 e, se a resposta do ponto 2 for a pior, um novo triângulo será gerado com um ponto refletido em 2. Este procedimento é sucessivamente repetido produzindo sucessão de simplex que se movem rapidamente sobre a resposta superfície.

Para alcançar uma estratégia de progresso mais eficiente, uma série de regras foram propostas como detalhado abaixo [CERDÀ, V.; CERDÀ J.L.; IDRIS, A. M., 2016]:

- **Regra 1:** O novo simplex é criado descartando o ponto que dá a pior resposta e substituindo-o por sua imagem espelhada em uma linha definida de acordo com os outros dois pontos. Se o novo ponto der a pior resposta a seguir, a regra 1 não poderá mais ser aplicada, desde que o ponto refletido será o original. A aplicação da regra 1 resultará em um loop infinito entre os dois simplex criados. Assim, a regra 2 deve ser seguida.
- **Regra 2:** Desse modo, se o novo ponto resultar na pior resposta, então o segundo pior ponto deve ser selecionado e seu ponto refletido será obtido para criar o novo simplex.

Uma mudança na direção da progressão para o ótimo é obtida. Isso acontece geralmente quando estamos nos aproximando do ótimo.

- **Regra 3:** Assim, se o novo ponto estiver próximo do ótimo, todos os novos pontos ultrapassarão o ápice da superfície de resposta e os próximos simplex girarão em torno do ótimo.

2.6.3 Aplicações do Método Simplex

Abaixo está descrito uma lista de diferentes programas desenvolvidos com a aplicação do método simplex em três casos distintos:

- a. Programa simplex: com o objetivo de encontrar o mínimo de uma função matemática, como exemplo: $U = Y^2 + X^2$, onde seu valor é 0 e localiza-se em $X = 0$ e $Y = 0$, de fato, valor este trivial [CERDÀ, V.; CERDÀ J.L.; IDRIS, A. M., 2016].
- b. Programa SIMFIA: para encontrar o mínimo de uma função experimental conhecendo seu modelo matemático (ajuste do quadrado mínimo) [CERDÀ, V.; CERDÀ J.L., 2015].
- c. Programa ExpSimplex: desenvolvido para encontrar o mínimo em um sistema experimental sem conhecer seu modelo matemático. Por exemplo, a otimização de um instrumento de absorção atômica ajustando as taxas de fluxo de combustível e oxidante. O método simplex foi aplicado para otimizar a automação da metodologia *Winkler* usando a Análise de Injeção Sequencial (SIA) [HORSTKOTTE B.; SÁNCHEZ A.T.; DUARTE C.M.; CERDÀ, V., 2010] e otimizar a configuração do espectrofotômetro de lente térmica de feixe cruzado de duplo laser. Recentemente, o método Simplex foi aplicado também para otimizar quatro variáveis volumétricas e duas variáveis químicas controlando a quantificação de oxigênio dissolvido por SIA [HORSTKOTTE B.; SÁNCHEZ A.T.; DUARTE C.M.; CERDÀ, V., 2010]. O cálculo dos vértices e a consequente aplicação, incluindo a preparação em linha de um reagente, foram realizados em tempo real, utilizando o software *AutoAnalysis* [CERDÀ, V.; CERDÀ J.L.; IDRIS, A. M., 2016].

2.7 Erro em modelos matemáticos

Os erros numéricos são oriundos do uso de aproximações para representar operações e quantidades matemáticas exatas. Outrossim, os erros resultam de truncamentos de valores para uma aproximação e viabilização de execução dos cálculos matemático, ou seja, quando números possuem quantidades limitadas de algarismos significativos para representar números exatos [CHAPRA, S. C., 2008]. Desse modo, é fundamental a quantificação dos erros imbricados na computação da solução de um dado problema. Para tanto, são necessárias medidas para definir erros (ou exatidão). As medidas de erro mais utilizadas são o erro absoluto e o erro relativo [LIVRO COLABORATIVO, 2018].

Definição: Seja x um número real e x' , sua aproximação. O "erro absoluto" da aproximação x' é definido como:

$$|x - x'|. \quad (2.5)$$

O "erro relativo" da aproximação de x' é definido como:

$$\frac{|x-x'|}{|x|}, \quad x \neq 0. \quad (2.6)$$

Observa-se na equação 2.6 que o erro relativo é adimensional e, muitas vezes, é expresso em porcentagens. Mais precisamente, o erro relativo em porcentagem da aproximação x' é dado por:

$$\frac{|x-x'|}{|x|} \times 100\%. \quad (2.7)$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Desenvolvimento do Método Numérico Computacional

3.1.1 Método Simplex

A utilização do método simplex é de suma importância, de modo que, através dele encontra-se a composição da carga metálica de menor custo. Para tal, o método parte de uma “função objetivo” a qual temos o interesse de minimizá-la, neste caso, a função objetivo definida será o custo total de uma carga metálica em função das quantidades em kg e custos unitários (R\$/kg) dos respectivos constituintes que fazem parte da composição global da carga metálica de menor custo. Para melhor compreensão, a função objetivo pode ser definida através da equação 3.1.

$$\varphi = x_1 \cdot c_1 + x_2 \cdot c_2 + x_3 \cdot c_3 + \dots + x_n \cdot c_n \quad (3.1)$$

Onde x_1 , x_2 , x_3 e x_n são as quantidades em kg dos constituintes da carga, podendo ser material sucata, material de retorno do processo de fundição ou elementos de liga adicionados na forma metálica ou na forma de ferroligas. Os símbolos c_1 , c_2 , c_3 e c_n representam os respectivos custos unitários de cada constituinte da carga em R\$/kg.

Outra representação da função objetivo pode ser gerada de forma mais simplificada e didática, atribuindo um somatório, como descrito na equação 3.2.

$$\varphi = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot c_i) \quad (3.2)$$

Onde x_i e c_i representam, respectivamente, a quantidade do componente da carga em kg e o custo unitário do componente em R\$/kg.

O método numérico computacional utilizará então a técnica Simplex para gerar o menor custo da carga metálica, ou seja, o método minimizará a função objetivo φ , a qual representa o custo global de uma carga. Para a solução da função objetivo, todas os cálculos numéricos são executados na plataforma *Microsoft Excel* em um computador, respeitando as condições de contorno estabelecidas no método

3.1.2 Condições de contorno

As condições de contorno ou também chamadas de condições de fronteira são um sistema de equações provido de um conjunto de restrições para um problema de valor. Neste trabalho, um sistema de equações foi desenvolvido para propor restrições à função objetivo discutida na seção anterior. O princípio básico, que permeia nas condições de contorno desenvolvidas, é estabelecer limitações e resultados que atendam as condições de fronteira que, neste trabalho em específico, será a própria composição química que a carga metálica deverá atender em uma corrida qualquer. Desta forma, para um elemento químico específico, o somatório das quantidades em kg dos constituintes da carga, vezes os seus respectivos teores fracionados para este elemento químico específico, deverá resultar em um valor que atenda uma faixa de quantidade em kg, onde convertendo em porcentagem, esta quantidade deverá resultar em um teor dentro de uma faixa estabelecida pelo material especificado na corrida. As equações 3.3 e 3.4 descrevem uma condição de contorno genérica para a composição química de um elemento qualquer.

$$\sum_{i=1}^n (x_i \cdot \theta_i) \geq \beta_1 \quad (3.3)$$

$$\sum_{i=1}^n (x_i \cdot \theta_i) \leq \beta_2 \quad (3.4)$$

Onde x_i e θ_i representam, respectivamente, a quantidade em kg e o teor fracionado presente do elemento químico no constituinte específico. Os símbolos β_1 e β_2 representam, respectivamente, o valor numérico da quantidade mínima da faixa estabelecida e a quantidade máxima desta mesma faixa em kg.

Desse modo, um sistema de equações de fronteira foi desenvolvido para atender a composição química e suas restrições dos materiais obtidos a partir de uma carga metálica.

3.1.3 Considerações e limitações das condições de contorno

Como é de senso comum, os aços produzidos atendem faixas de composição química especificadas por norma. Como exemplo, a tabela 2 ilustra a composição química do aço AISI 348.

Tabela 2. Composição química do aço AISI 348 (% em massa).

Material	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Co	Ta+Nb	Fe
AISI 348	0,08	2,0	1,0	0,04	0,03	17,0	9,0	0,20	Nb+Ta \geq 10xC	Bal
	máx	máx	máx	Máx	máx	19,0	13,0	máx	Ta máx = 0,1	

Fonte: ASM HANDBOOK, 1992.

Assim, uma aproximação se fez necessária nas condições de contorno. A variável θ da equação 3.1, representa o teor fracionado dos elementos químicos que compõe um aço. Assim, um valor numérico positivo deverá ser atribuído a esta variável, porém, usando como exemplo o AISI 348 para constituir um dos componentes da carga metálica, teríamos uma faixa de composição química para conceder à variável θ . A aproximação realizada neste trabalho, no desenvolvimento do método numérico, será de atribuir a variável θ o valor que se encontra no centro da faixa de composição química. Como exemplo, para o elemento químico Ni (níquel) do constituinte AISI 348, o valor concedido a variável θ será de 0,11. Note que o valor numérico de θ deverá, necessariamente, ser fracionado para qualquer elemento químico.

De fato, esta aproximação pode ocasionar resultados fora da faixa de composição química especificada para uma carga metálica. Por exemplo, considerando hipoteticamente que, todos os constituintes da carga metálica estejam com os valores de composição química próximos do máximo da faixa, para um determinado elemento químico, o resultado da composição química da carga para este elemento químico em questão, poderá extrapolar o máximo da faixa, isto porque a variável θ considera que os teores de todos elementos químicos dos constituintes da carga estejam com valores no centro da faixa de composição química. Entretanto, uma solução encontrada para minimizar este problema foi de estreitar a faixa de composição química que a carga metálica deverá atender. Como exemplo, considerando novamente o aço AISI 348, agora como material a ser obtido através de uma carga metálica, uma solução plausível para minimizar o problema anterior foi de estreitar a faixa de composição química do Cr (cromo), por exemplo, de 9 a 13 % para 10,5 a 11,5 %. Isto fará com que, obrigatoriamente, o método numérico computacional calcule as quantidades dos constituintes da carga para resultar em valores próximos do centro da faixa de composição química e conseqüentemente, minimizará a possibilidade de resultados não conformes e insatisfatórios.

3.1.4 Prática computacional: plataforma *Microsoft Excel*

O aplicativo *Microsoft Excel* é uma ferramenta poderosa para gerenciamento de dados e desenvolvimento de cálculos numéricos. Esta ferramenta foi de suma importância para que pudéssemos dar continuidade no desenvolvimento do método numérico abordado neste trabalho.

Na plataforma *Excel* foi gerado um banco de dados com toda matéria-prima disponível na empresa Sulmaq – Unidade Microfusão, juntamente com a composição química desta mesma matéria-prima catalogada em uma planilha de dados do método numérico. Outrossim, todas equações e variáveis foram dispostas no aplicativo, de tal forma que, os cálculos necessários fossem realizados pelo próprio *Excel* de forma rápida e precisa. A figura 9 abaixo ilustra uma parte do gerenciamento de dados no *Excel*, devido ao excesso de dados não é possível ilustrar a planilha por completo, por consequência da baixa resolução que a figura apresentaria.

Figura 9. Gerenciamento de dados no *Microsoft Excel*.

Matéria Prima			Faixas de composição química (%)													
		Custo R\$/Kg	C mín.	C máx.	Mn mín.	Mn máx.	Si mín.	Si máx.	Cr mín.	Cr máx.	Ni mín.	Ni máx.	Cu mín.	Cu máx.	Mo mín.	Mo máx.
x1	304		0	0,08	0	2	0	1	18	20	8	12	0	0	0	0
x2	430		0	0,12	0	1	0	1	16	18	0	0	0	0	0	0
x3	1010		0,08	0,13	0	1	0	0,6	0	0,5	0	0,5	0	0	0	0
x4	304L		0	0,03	0	2	0	1	18	20	8	10	0	0	0	0
	Fe-ligas	Custo R\$/Kg	C mín.	C máx.	Mn mín.	Mn máx.	Si mín.	Si máx.	Cr mín.	Cr máx.	Ni mín.	Ni máx.	Cu mín.	Cu máx.	Mo mín.	Mo máx.
x5	Fe-Cr		0	0	0	0	0	0	50	75	0	0	0	0	0	0
x6	Ni 4x4		0	0	0	0	0	0	0	0	99,5	100	0	0	0	0
x7	Carburante		97	99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x8	Mn		0	0	99,5	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x9	Fe-Si		0	0	0	0	55	70	0	0	0	0	0	0	0	0
x10	Cu		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	99,7	99,7	0	0
x11	Mo		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60	60
	Retorno	Custo R\$/Kg	C mín.	C máx.	Mn mín.	Mn máx.	Si mín.	Si máx.	Cr mín.	Cr máx.	Ni mín.	Ni máx.	Cu mín.	Cu máx.	Mo mín.	Mo máx.
x12	304		0	0,08	0	2	0	1	18	20	8	12	0	0	0	0
x13	316		0	0,08	0,8	1,5	1	1,5	18	21	9	12	0	0	2	3
x14	316L		0	0,03	0	1,5	0	1,5	18	21	9	12	0	0	2	3
x15	1.4581		0	0,07	1	1,5	0,2	1	18	19	11	12	0	0	2,3	2,5
x16	17.4 PH		0	0,06	0	1	0	1	15	17,5	3	5	0	0	0	0
x17	4140		0,35	0,45	0,7	1	0,2	0,8	0,8	1,1	0	0,5	0	0,5	0,15	0,25
x18	5140		0,38	0,43	0,7	0,9	0,15	0,35	0,7	0,9	0	0,25	0	0,35	0	0
x19	6150		0,45	0,55	0,65	0,95	0,2	0,35	0,8	1,1	0	0,5	0	0,5	0	0
x20	42CrMo4		0,38	0,45	0,6	0,9	0	0,4	0,9	1,2	0	0	0	0	0,15	0,3
x21	1.4713		0	0,12	0	1	0,5	1	6	8	0	0	0	0	0	0
x22	420 ESP.		0,2	0,3	0,5	0,8	0,5	1	12	14	0,2	0,5	0	0	0,55	0,65

Fonte: Autor, 2018.

De fato, o *Excel* permitiu que o método numérico fosse desenvolvido, visto que, pela imensidão de cálculos e informações, seria praticamente impossível ou demandaria um longo período de tempo para resolver analiticamente os cálculos numéricos por qualquer ser humano.

As condições de contorno estabelecidas no método geram uma matriz, onde seu tamanho é proporcional a quantidade disposta de matéria-prima para gerar uma carga metálica, como exemplo, para a matéria-prima disponível na empresa, foi gerado uma matriz com dimensões de 23X46, esta matriz além de inúmeros outros cálculos são executados pelo Excel em fração de segundo, o que de fato, analiticamente, seria praticamente impossível ou demandaria um tempo extremamente longo e inviável de execução.

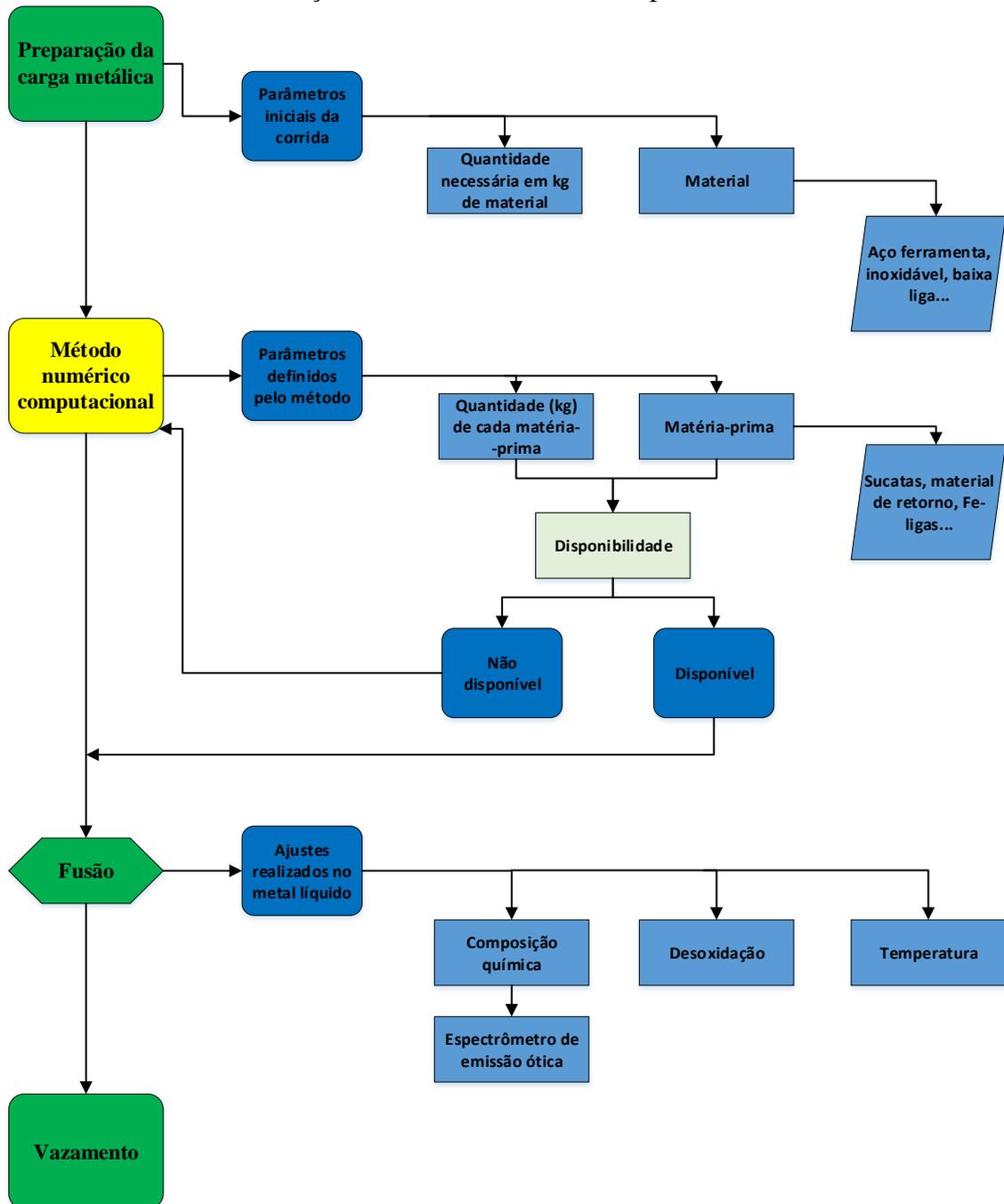
3.2 Etapa experimental

Para avaliar a coerência dos resultados obtidos pelo método numérico, assim como, validar o seu respectivo desenvolvimento e implementação na indústria com considerável exatidão, repetibilidade e redução de custos, uma metodologia consistente foi elaborada. Com base no modelo idealizado, um conjunto de testes foram executados no setor de fundição da empresa Sulmaq Comercial e Industrial – Unidade Microfusão. Os testes realizados compreendem um conjunto de etapas aplicadas em triplicidade para dois aços distintos, são eles: um aço SAE 8620 modificado e um aço DIN 1.3355. Os testes realizados nos respectivos materiais foram executados utilizando o método desenvolvido e, executados sem a utilização do método, ou seja, o cálculo de carga foi elaborado como de praxe pela empresa. Deste modo, um conjunto de 12 testes foram realizados na empresa, assim, foi possível distinguir os resultados com ou sem a utilização do método, assim como avaliar se houve redução de custo na elaboração da carga metálica para ambos os materiais citados.

O fluxograma exibido na figura 10 ilustra, esquematicamente, a metodologia de execução dos testes realizados na fundição da empresa utilizando o método numérico computacional para cada material especificado neste trabalho.

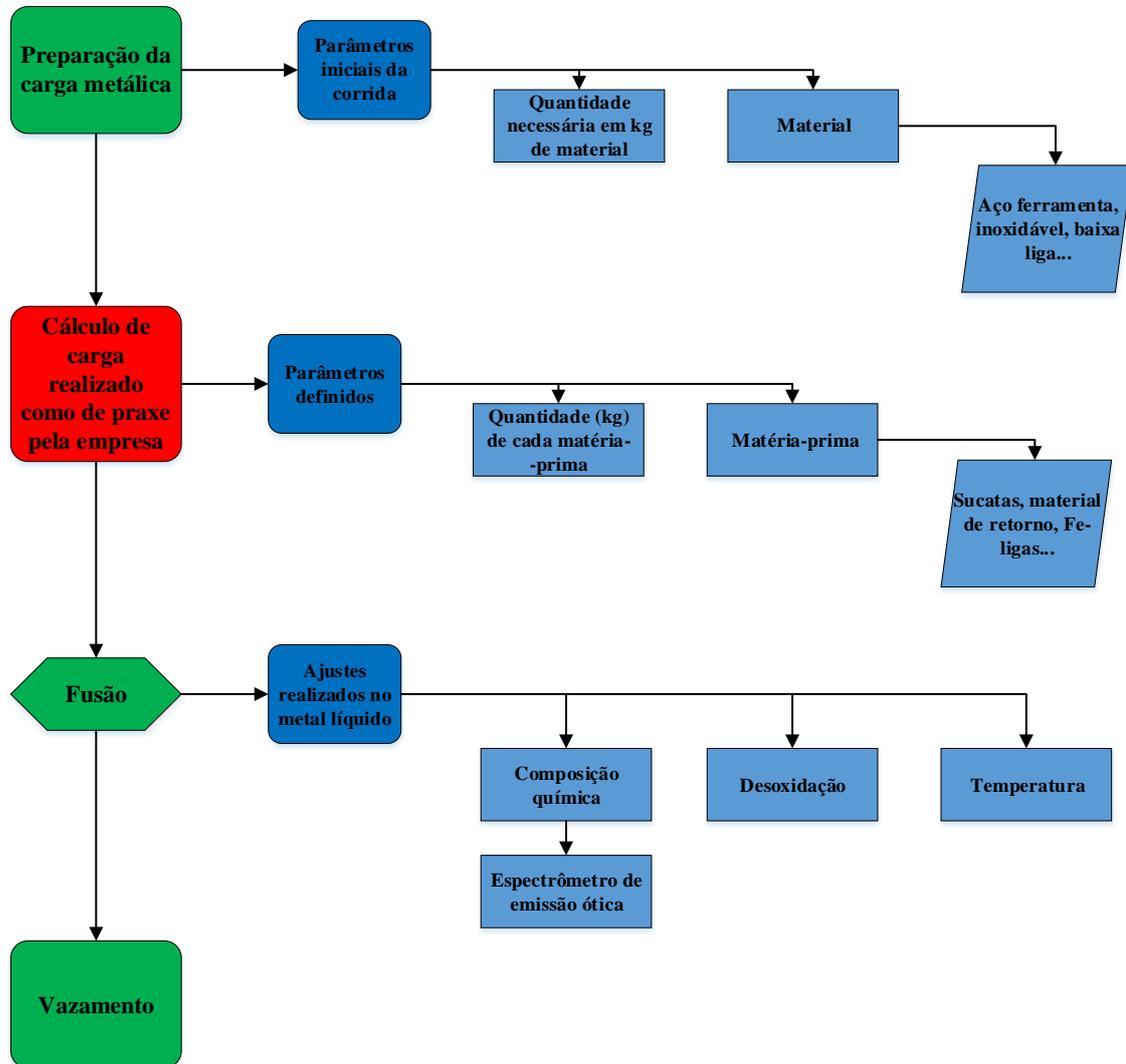
O fluxograma exibido na figura 11 ilustra, esquematicamente, a metodologia de execução dos testes realizados na fundição da empresa sem a utilização do método numérico computacional desenvolvido, ou seja, o cálculo para obtenção dos constituintes da carga, assim como suas respectivas quantidades, foi realizado como de costume pela empresa para cada material especificado para os testes neste trabalho.

Figura 10. Fluxograma da metodologia seguida neste estudo para os testes que contemplam a utilização do método numérico computacional.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 11. Fluxograma da metodologia seguida neste estudo para os testes que não contemplam a utilização do método numérico computacional, ou seja, metodologia seguida pela empresa como de praxe.



Fonte: Autor, 2018.

3.2.1 Cálculo de carga: DIN 1.3355 utilizando o Método Numérico Computacional

Na elaboração de uma carga metálica, seguindo a metodologia apresentada pelo fluxograma da figura 10, em um primeiro momento será definido os parâmetros iniciais de cada corrida. Estes parâmetros englobam o material a ser obtido e sua respectiva quantidade. No estudo deste tópico, o material escolhido é um aço DIN 1.3355 com composição química apresentada na tabela 3.

Tabela 3. Composição química do DIN 1.3355 (% em massa).

Material	C	Mn	Si	P	S	Cr	V	W	Fe
DIN 1.3355	0,7	0,4	0,45	0,03	0,03	3,8	1,0	17,5	Bal
	0,78	Máx	máx	máx	máx	4,5	1,2	18,5	

Fonte: Certificado de qualidade Sulmaq – Microfusão.

A quantidade necessária de material dependerá da capacidade máxima do forno de indução e da quantidade de cachos (em microfusão, é a denominação para os moldes contendo as cavidades das peças) para o preenchimento de material. Neste estudo foram executados testes em triplicidade para o DIN 1.3355 com quantidades de 178 kg, 196 kg e 178 kg.

Definidos os parâmetros iniciais de cada corrida, material e quantidade respectiva, a próxima etapa foi aplicar o método numérico computacional para fornecer a matéria-prima mais adequada, assim como, as respectivas quantidades necessárias de cada constituinte que fazem parte desta matéria-prima. O método elabora o cálculo de carga segundo o banco de dados de matéria-prima que nele está disposto. Pode ocorrer que, para o resultado de um cálculo de carga não haja a quantidade necessária de matéria-prima disponível no estoque da empresa, desse modo, o cálculo de carga é refeito retirando do banco de dados os constituintes da matéria-prima que apresentam indisponibilidade na empresa no momento. O cálculo é feito sucessivamente até encontrar a matéria-prima disponível para a carga metálica. De fato, o custo da carga tenderá a aumentar toda vez que o cálculo for feito, porém este aumento muitas vezes é insignificante.

Com a matéria-prima selecionada pelo método, assim como suas respectivas quantidades, a próxima etapa contempla a fusão da carga. Através de um forno de indução disponível na empresa, foi possível fundir toda carga metálica. Nesta etapa do processo, amostras do aço líquido são retiradas do forno para avaliação da composição química em um espectrômetro de emissão ótica, a julgar necessário pelo técnico que realiza o procedimento, correções são realizadas no banho com ferroligas ou ligas metálicas disponíveis no laboratório metalúrgico. Estando a composição química do aço adequada à norma vigente, este passa pelo processo de desoxidação e ajuste de temperatura para posterior vazamento.

O vazamento do metal líquido se dá pela força gravitacional e, em um primeiro momento, é feito para uma panela com capacidade de 50 kg para posteriormente ser transferido para os cachos (moldes cerâmicos que englobam as peças a serem obtidas).

3.2.2 Cálculo de carga: DIN 1.3355 realizado pela empresa

Na elaboração de uma carga metálica, seguindo a metodologia apresentada pelo fluxograma da figura 11, semelhante ao tópico anterior, em um primeiro momento foram definidos os parâmetros iniciais de cada corrida. No estudo deste tópico, o material escolhido é um DIN 1.3355, com composição química descrita na tabela 3 e com testes realizados em triplicidade com quantidades de 187 kg, 196 kg e 187 kg.

No estudo deste tópico os parâmetros iniciais foram estipulados pela empresa, dessa forma, as matérias-primas bem como suas respectivas quantidades foram definidas como de praxe.

A etapa de fusão e vazamento compreendem, sistematicamente, os mesmos procedimentos descritos no tópico anterior.

3.2.3 Cálculo de carga: SAE 8620 modificado utilizando o Método Numérico Computacional

Seguindo a metodologia desenvolvida e, esquematicamente apresentada neste trabalho por meio do fluxograma da figura 10, o material escolhido para o estudo neste tópico foi um SAE 8620 modificado, com composição química descrita na tabela 4 abaixo.

Tabela 4. Composição química do SAE 8620 modificado (% em massa).

Material	C	Mn	Si	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	W	Fe
SAE 8620	0,15	0,65	0,50	0,04	0,045	0,40	0,5	0,15	0,40	0,10	Bal
	0,25	0,95	máx	Máx	máx	0,70	máx	0,25	0,70	máx	

FONTE: Certificado de qualidade Sulmaq – Microfusão.

Os testes executados para o aço SAE 8620 compreenderam quantidades de 265, 230 e 285 kg. Semelhante ao tópico descrito acima, a próxima etapa contemplou a utilização do método numérico para estipular as matérias-primas para obtenção da carga metálica, juntamente com suas respectivas quantidades. Definida as cargas metálicas para o respectivo conjunto de testes, a etapa conseguinte foi a fusão da mesma em um forno de indução. Amostras de metal líquido foram retiradas do banho para avaliar a composição química do aço e, feitas as correções com ferroligas caso houvesse necessidade. Com a composição química do aço adequada, ajustes na temperatura do banho e desoxidação foram realizados para posterior execução do vazamento

do metal líquido que, em um primeiro momento, é feito para uma panela com capacidade de 50 kg para posteriormente, ser transferido para os moldes cerâmicos.

3.2.4 Cálculo de carga: SAE 8620 modificado realizado pela empresa

Na elaboração de uma carga metálica, seguindo a metodologia apresentada pelo fluxograma da figura 11, semelhante ao tópico 3.2.2, em um primeiro momento foram definidos os parâmetros iniciais de cada corrida. No estudo deste tópico, o material escolhido é um SAE 8620 modificado, com composição química descrita na tabela 4 e quantidades de 265, 230 e 285 kg para os testes executados em triplicidade.

No estudo deste tópico os parâmetros iniciais foram estipulados pela empresa, dessa forma, as matérias-primas bem como suas respectivas quantidades foram definidas como de praxe.

A etapa de fusão e vazamento compreendem, sistematicamente, os mesmos procedimentos descritos no tópico anterior.

3.3 Método Numérico Computacional: análise de erro

Análise de erro se faz necessária para todas ferramentas que utilizam dados numéricos que possuem alguma forma de arredondamento. Para o método numérico desenvolvido neste trabalho não foi diferente.

Após a execução dos testes em triplicidade para ambos os materiais (DIN 1.3355 e SAE 8620 modificado) uma minuciosa análise de erro foi desenvolvida e realizada em uma corrida (um teste) específica para cada material. O procedimento para avaliar o erro associado à utilização do método foi comparar o percentual de cada elemento químico determinado pelo método numérico com o percentual de cada elemento químico encontrado no metal líquido imediatamente antes de vazar para os moldes. As ferramentas utilizadas para avaliar o erro foram o erro absoluto e o erro relativo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo serão apresentados os resultados obtidos para o cálculo de carga em cada corrida efetuada, assim como, análise da viabilidade econômica e uma estimativa de erro na utilização do método numérico computacional.

Importante ressaltar que os custos das matérias-primas apresentados neste trabalho retratam valores de forma indicativa da empresa com base no mercado de matérias-primas, ou seja, os custos exibidos não são necessariamente os custos utilizados pela empresa Sulmaq – Unidade Microfusão.

4.1 Cálculo de cargas: DIN 1.3355 realizado pela empresa

Neste estudo, a primeira corrida realizada foi a de nº 1266005 com uma quantidade obtida de 178 kg de aço DIN 1.3355. A matéria-prima utilizada nessa corrida foi determinada pela empresa e está descrita na tabela 5, juntamente com os custos envolvidos considerando somente a matéria-prima.

Tabela 5. Carga metálica utilizada na corrida 1266005.

Matéria-prima	Quantidade kg	R\$/kg	Custo R\$
Sucata SAE 1010	127	1,00	127,00
Fe – Cr 60%	13,4	15,70	207,24
Carburante	1,32	2,00	2,64
Fe – Si 75%	0,45	10,00	4,50
Fe – V 50%	3,84	220,00	844,80
W metálico	32,0	172,00	5.504,00
Total	178	–	6.693,32

Todas as corridas geradas na empresa Sulmaq – Unidade Microfusão possuem um certificado de qualidade com informações pertinentes para o cliente, como a composição química e a dureza dos itens fabricados. Dessa forma, pode-se avaliar se a carga metálica apresentada acima atingiu a composição química esperada do aço DIN 1.3355. Importante ressaltar que a composição química do certificado é do aço líquido imediatamente antes do vazamento, desse modo a composição química apresentada é a mais próxima possível dos

produtos obtidos. Na figura 12 é apresentado o certificado de qualidade da respectiva corrida descrita acima descrita na tabela 5.

Figura 12. Certificado de qualidade da corrida 1266005 com destaque em vermelho.

Certificado Norma/Certificate Norm: EN 10204 3.1		Certificado Nº/Certificate Norm:			
Nº Nota/Order Nº:		Ordem de compra Nº/Invoice Nº:		Desenho Nº/Drawing Nº:	
Material/ Material Especifications: 148 - 1.3355				Norma/Norm:	
Cliente/Client:				Quantidade/Quantity:	
Código Item/Idem Code:		Descrição/Description:			
Tratamento Térmico/ Heat Treatment: RECOZER, TEMPERAR, REVENIR					
Composição Química/ Chemical Composition %		Limites/Limits		OF	
		Min.	Máx.	Lote/Heat	
				1266005	
C	%	0,7000	0,7800	0,7700	
CR	%	3,8000	4,5000	4,0500	
MN	%	0,0000	0,4000	0,3980	
P	%	0,0000	0,0300	0,0170	
S	%	0,0000	0,0300	0,0210	
SI	%	0,0000	0,4500	0,4340	
V	%	1,0000	1,2000	1,0800	
W	%	17,5000	18,5000	17,7100	
Propriedades Mecânicas / Physical Properties		Limites/Limits		Encontrado / Found	
		Min.	Máx.		
DUREZA HRC	HRC	58,0000	62,0000	61,0000	62,0000

Fonte: SULMAQ, 2018.

Com base na figura 12, pode-se afirmar que as matérias-primas utilizadas na tabela 5 atingiram a composição química desejada para o DIN 1.3355 da respectiva corrida.

A próxima corrida executada foi a de número 1266007 com uma quantidade obtida de 178 kg. A matéria-prima utilizada, juntamente com os custos envolvidos, estão descritos na tabela 6.

Tabela 6. Carga metálica utilizada na corrida 1266007.

Matéria-prima	Quantidade kg	R\$/kg	Custo R\$
Sucata SAE 1010	127	1,00	127,00
Fe – Cr 60%	13,0	15,70	204,10
Carburante	1,5	2,00	3,00
Fe – Si 75%	0,4	10,00	4,00
Fe – V 50%	3,7	220,00	814,00
W metálico	32,4	172,00	5.572,80
Total	178	–	6.724,90

A última corrida realizada para o conjunto de testes neste tópico, com o aço DIN 1.3355 utilizando o cálculo de carga costumeiro da empresa, foi a 1266009. A tabela 7 ilustra as matérias-primas utilizadas, assim como suas respectivas quantidades e custos envolvidos.

Tabela 7. Carga metálica utilizada na corrida 1266009.

Matéria-prima	Quantidade kg	R\$/kg	Custo R\$
Sucata SAE 1010	141	1,00	141,00
Fe – Cr 60%	14,2	15,70	222,94
Carburante	1,5	2,00	3,00
Fe – Si 75%	0,3	10,00	3,00
Fe – V 50%	4,1	220,00	902,00
W metálico	34,9	172,00	6.002,8
Total	196	–	7.274,74

O certificado de qualidade exibido na figura 13, ilustra a composição química final das corridas 1266007 e 1266009. Nota-se que as matérias-primas apresentadas na tabela 6 e 7 obtiveram um resultado satisfatório para a composição química esperada do aço DIN 1.3355.

Figura 13. Certificado de qualidade das corridas 1266007 e 1266009 com destaques em vermelho.

sulmaq microfação **CERTIFICADO DE QUALIDADE/MLL TESTE & INSPECTION**

Certificado Norma/Certificate Norm: EN 10204 3.1				Certificado N°/Certificate Norm:			
N° Nota/Order N°:		Ordem de compra N°/Invoice N°:			Desenho N°/Drawing N°:		
Material/ Material Especifications: 148 - 1.3355					Norma/Norm:		
Cliente/Client:					Quantidade/Quantity:		
Código Item/Item Code:		Descrição/Description:					
Tratamento Térmico/ Heat Treatment: RECOZER, TEMPERAR, REVENIR							
Composição Química/ Chemical Composition %		Limites/Limits		OF			
				Lote/Heat			
		Min.	Máx.	1266007	1266009		
C	%	0,7000	0,7800	0,7200	0,7300		
CR	%	3,8000	4,5000	3,9100	4,0100		
MN	%	0,0000	0,4000	0,3870	0,3800		
P	%	0,0000	0,0300	0,0180	0,0220		
S	%	0,0000	0,0300	0,0190	0,0200		
SI	%	0,0000	0,4500	0,2890	0,3980		
V	%	1,0000	1,2000	1,0300	1,0900		
W	%	17,5000	18,5000	17,6200	17,9800		

Fonte: SULMAQ, 2018.

4.2 Cálculo de cargas: DIN 1.3355 realizado com o Método Numérico Computacional

Os resultados a seguir também serão apresentados em triplicidade, com cargas metálicas que compreendem as mesmas quantidades do conjunto de testes do tópico anterior; 178, 178 e 196 kg de aço DIN 1.3355. Considerando o rendimento dos fornos de indução da empresa para os elementos químicos, as matérias-primas encontradas pelo método numérico para cada corrida foram as disponíveis no estoque da empresa referente a data de realização dos testes. Nas tabelas 8, 9 e 10 estão dispostos os resultados das corridas 1266508, 1266510 e 1266876, respectivamente.

Tabela 8. Carga metálica utilizada na corrida 1266508.

Matéria-prima	Quantidade kg	R\$/kg	Custo R\$
Sucata SAE 1010	58,9	1,00	58,90
Sucata SAE 430	13,2	1,30	17,16
Carburante	1,0	2,00	2,00
Retorno DIN 1.4713	69,2	1,92	132,86
Fe – V 50%	3,75	220,00	825,00
W metálico	32	172,00	5.504,00
Total	178	–	6.539,92

Tabela 9. Carga metálica utilizada na corrida 1266510.

Matéria-prima	Quantidade kg	R\$/kg	Custo R\$
Sucata SAE 1010	58,9	1,00	58,90
Sucata SAE 430	13,2	1,30	17,16
Carburante	1,0	2,00	2,00
Retorno DIN 1.4713	69,2	1,92	132,86
Fe – V 50%	3,75	220,00	825,00
W metálico	32	172,00	5.504,00
Total	178	–	6.539,92

Tabela 10. Carga metálica utilizada na corrida 1266876.

Matéria-prima	Quantidade kg	R\$/kg	Custo R\$
Sucata SAE 1010	65	1,00	65,00
Sucata SAE 430	14,4	1,30	18,72
Carburante	1,1	2,00	2,2
Retorno DIN 1.4713	76,2	1,92	146,30
Fe – V 50%	4,12	220,00	906,40
W metálico	35,2	172,00	6.054,40
Total	196	–	7.193,02

O certificado de qualidade da figura 14 demonstra que as cargas metálicas calculadas pelo método numérico computacional obtiveram um resultado satisfatório na composição química final das corridas 1266508 e 1266510.

Figura 14. Certificado de qualidade das corridas 1266508 e 1266510 destacadas em vermelho.

sulmaq CERTIFICADO DE QUALIDADE/MLL TESTE & INSPECTION

Certificado Norma/Certificate Norm: EN 10204 3.1		Certificado N°/Certificate Norm:			
N° Nota/Order N°:		Ordem de compra N°/Invoice N°:		Desenho N°/Drawing N°:	
Material/ Material Especifications: 148 - 1.3355				Norma/Norm:	
Cliente/Client:				Quantidade/Quantity:	
Código Item/Item Code:		Descrição/Description:			
Tratamento Térmico/ Heat Treatment: RECOZER, TEMPERAR, REVENIR					
Composição Química/ Chemical Composition %		Limites/Limits		OF	
				Lote/Heat	
		Min.	Máx.	1266508	1266510
C	%	0,7000	0,7800	0,7500	0,7400
CR	%	3,8000	4,5000	3,9600	4,0500
MN	%	0,0000	0,4000	0,3540	0,3410
P	%	0,0000	0,0300	0,0190	0,0200
S	%	0,0000	0,0300	0,0170	0,0170
SI	%	0,0000	0,4500	0,3680	0,3310
V	%	1,0000	1,2000	1,1200	1,1300
W	%	17,5000	18,5000	18,1200	18,2900
Propriedades Mecânicas / Physical Properties		Limites/Limits		Encontrado / Found	
DUREZA HRC	HRC	58,0000	62,0000	62,0000	61,0000

Fonte: SULMAQ, 2018.

A carga metálica da corrida 1266876 calculada pelo método numérico também obteve a composição química desejada, evidenciada no certificado de qualidade da figura 15.

Figura 15. Certificado de qualidade da corrida 1266876 com destaque em vermelho.

Certificado Norma/Certificate Norm: EN 10204 3.1		Certificado Nº/Certificate Norm:			
Nº Nota/Order Nº:		Ordem de compra Nº/Invoice Nº:		Desenho Nº/Drawing Nº:	
Material/ Material Especifications: 148 - 1.3355				Norma/Norm:	
Cliente/Client:				Quantidade/Quantity:	
Código Item/Item Code:		Descrição/Description:			
Tratamento Térmico/ Heat Treatment: RECOZER, TEMPERAR, REVENIR					
Composição Química/ Chemical Composition %		Limites/Limits		OF	
		Min.	Máx.	Lote/Heat	
C	%	0,7000	0,7800	0,7700	
CR	%	3,8000	4,5000	4,2600	
MN	%	0,0000	0,4000	0,2550	
P	%	0,0000	0,0300	0,0088	
S	%	0,0000	0,0300	0,0150	
SI	%	0,0000	0,4500	0,4330	
V	%	1,0000	1,2000	1,1400	
W	%	17,5000	18,5000	17,8600	
Propriedades Mecânicas / Physical Properties		Limites/Limits		Encontrado / Found	
		Min.	Máx.		
DUREZA HRC	HRC	58,0000	62,0000	61,0000	

Fonte: SULMAQ, 2018.

Através das tabelas 8, 9 e 10, pode-se evidenciar a utilização de sucata SAE 430 e material retorno DIN 1.4713 em todas as corridas apresentadas pelas tabelas. Outrossim, é possível notar a ausência total de Fe-Cr 60% e Fe-Si 75%. Desse modo, a utilização desta matéria-prima poderá contribuir para uma potencial redução de custo na utilização do método numérico computacional para o DIN 1.3355.

4.3 Cálculo de cargas: SAE 8620 modificado realizado pela empresa

Os resultados encontrados para os testes elaborados em triplicidade com o SAE 8620 modificado foram executados como de costume pela empresa e estão dispostos nas tabelas 11, 12 e 13, que correspondem as corridas 1267608, 1267612 e 1267614, respectivamente.

Tabela 11. Carga metálica utilizada na corrida 1267608.

Matéria-prima	Quantidade kg	R\$/kg	Custo R\$
Sucata SAE 1010	240	1,00	240,00
Fe – Cr 60%	2,3	15,70	36,11
Carburante	0,45	2,00	0,90
Mn metálico	2,2	10,40	22,88

Matéria-prima	Quantidade kg	R\$/kg	Custo R\$
Ni 4x4 metálico	1,6	67,00	107,20
Fe – Mo 60%	1,3	74,00	96,20
Fe – Si 75%	1,5	10,00	15,00
Total	250	–	518,29

Tabela 12. Carga metálica utilizada na corrida 1267612.

Matéria-prima	Quantidade kg	R\$/kg	Custo R\$
Sucata SAE 1010	253	1,00	253,00
Retorno AISI 302 M	4	9,64	38,56
Fe – Cr 60%	1,7	15,70	26,69
Carburante	0,4	2,00	0,80
Mn metálico	2,3	10,40	23,92
Ni 4x4 metálico	1,2	67,00	80,40
Fe – Mo 60%	1,25	74,00	92,5
Fe – Si 75%	1,6	10,00	16,00
Total	265	–	531,87

Tabela 13. Carga metálica utilizada na corrida 1267614.

Matéria-prima	Quantidade kg	R\$/kg	Custo R\$
Sucata SAE 1010	244	1,00	244
Retorno AISI 302 M	4	9,64	38,56
Fe – Cr 60%	1,6	15,70	25,12
Carburante	0,4	2,00	0,80
Mn metálico	1,8	10,40	18,72
Ni 4x4 metálico	1,0	67,00	67,00
Fe – Mo 60%	1,1	74,00	81,40
Fe – Si 75%	1,5	10,00	15
Total	255	–	490,60

Nas tabelas 12 e 13 pode-se inferir a ocorrência da utilização de um canal de retorno AISI 302M que poderá reduzir o custo da carga metálica. Este canal de retorno de aço AISI 302M que possui aproximadamente 4 kg e, em sua composição química, há a presença dos elementos de liga Ni, Cr e Mo, que de fato contribuíram para a composição química global da carga e poderão reduzir o custo. A utilização do canal de retorno é consequência da experiência e do *feeling* do técnico em metalurgia responsável pelo cálculo de carga da empresa. Porém, em algumas corridas não são utilizados canais de retorno, como exibe a corrida 1267608 na tabela 11, além do mais, o técnico não consegue estimar o canal retorno e sua respectiva quantidade mais adequada para uma ótima redução de custo.

Para validar os testes executados neste tópico, o certificado de qualidade das respectivas corridas é ilustrado na figura 16. Pode-se afirmar que o conjunto de testes obtiveram um resultado dentro do esperado para o SAE 8620 modificado.

Figura 16. Certificado de qualidade para as corridas 1267608, 1267612 e 1267614 com destaques em vermelho.

sulmaq CERTIFICADO DE QUALIDADE/MLL TESTE & INSPECTION

Certificado Norma/Certificate Norm: EN 10204 3.1				Certificado N°/Certificate Norm:					
N° Nota/Order N°:		Ordem de compra N°/Invoice N°:				Desenho N°/Drawing N°:			
Material/ Material Especifications: 354 - IC 8620 TAURUS (SI 0,50)						Norma/Norm:			
Cliente/Client:						Quantidade/Quantity:			
Código Item/Idem Code:		Descrição/Description:							
Tratamento Térmico/ Heat Treatment: NORMALIZAR C/ RECUP CARBONO, RECOZER									
Composição Química/ Chemical Composition %		Limites/Limits		OF					
				40889	40889	40889	40889	40891	40891
				Lote/Heat					
		Min.	Máx.	1267608	1267610	1267612	1267614	1267616	1267616
C	%	0,1500	0,2500	0,2270	0,2290	0,2030	0,2340	0,2430	0,2430
CR	%	0,4000	0,7000	0,5400	0,4930	0,5100	0,5700	0,5800	0,5800
CU	%	0,0000	0,5000	0,0110	0,0150	0,0170	0,0170	0,0160	0,0160
MN	%	0,6500	0,9500	0,9000	0,8400	0,8300	0,8900	0,8900	0,8900
MO	%	0,1500	0,2500	0,2150	0,2170	0,2180	0,2280	0,2340	0,2340
NI	%	0,4000	0,7000	0,5000	0,4670	0,5100	0,5400	0,5800	0,5800
P	%	0,0000	0,0400	0,0170	0,0190	0,0180	0,0180	0,0180	0,0180
S	%	0,0000	0,0450	0,0081	0,0079	0,0082	0,0088	0,0093	0,0093
SI	%	0,0000	0,5000	0,3470	0,2860	0,2570	0,2520	0,2910	0,2910
W	%	0,0000	0,1000	0,0080	0,0075	0,0079	0,0070	0,0070	0,0070
Propriedades Mecânicas / Physical Properties		Limites/Limits		Encontrado / Found					
		Min.	Máx.						
DUREZA HRB	HRB	90,0000	98,0000	95,0000	95,0000	94,0000	94,0000	96,0000	95,0000

Fonte: SULMAQ, 2018.

4.4 Cálculo de cargas para o aço SAE 8620 modificado realizado com o Método Numérico Computacional

Semelhante aos testes discutidos no tópico anterior e, considerando o rendimento dos fornos de indução da empresa, as matérias-primas encontradas para as respectivas corridas foram as disponíveis no estoque da empresa na data dos ensaios. As tabelas 14, 15 e 16 exibem os cálculos de carga para as corridas 1267627, 1267629 e 1267632, respectivamente.

Tabela 14. Carga metálica utilizada na corrida 1267627.

Matéria-prima	Quantidade kg	R\$/kg	Custo R\$
Sucata SAE 1010	148	1,00	148
Retorno SAE 4340	70	2,50	175,00
Retorno DIN 1.4713	10,8	1,92	20,74
Mn metálico	0,8	10,40	8,32
Fe – Mo 60%	0,5	74,00	37,00
Fe – Si 75%	0,2	10,00	2
Total	230	–	391,06

Tabela 15. Carga metálica utilizada na corrida 1267629.

Matéria-prima	Quantidade kg	R\$/kg	Custo R\$
Sucata SAE 1010	253	1,00	253
Retorno AISI 302 M	9	9,64	86,76
Mn metálico	1,2	10,40	12,48
Ni 4x4 metálico	0,3	67,00	20,1
Carburante	0,25	2,00	0,5
Fe – Mo 60%	0,5	74,00	37,00
Fe – Si 75%	0,4	10,00	4
Total	265	–	413,84

Tabela 16. Carga metálica utilizada na corrida 1267632.

Matéria-prima	Quantidade kg	R\$/kg	Custo R\$
Sucata SAE 1010	218	1,00	218
Retorno AISI 302 M	7,8	9,64	75,19

Matéria-prima	Quantidade kg	R\$/kg	Custo R\$
Mn metálico	1	10,40	10,4
Ni 4x4 metálico	0,250	67,00	16,75
Carburante	0,2	2,00	0,4
Fe – Mo 60%	0,43	74,00	31,82
Fe – Si 75%	0,350	10,00	3,5
Total	230	–	356,06

O certificado de qualidade da figura 17 demonstra que as corridas apresentadas nesse tópico obtiveram a composição química adequada.

Figura 17. Certificado de qualidade para as corridas 1267627, 1267629 e 1267632 com destaques em vermelho.

sulmaq CERTIFICADO DE QUALIDADE/MLL TESTE & INSPECTION

Certificado Norma/Certificate Norm: EN 10204 3.1				Certificado Nº/Certificate Norm:					
Nº Nota/Order Nº:		Ordem de compra Nº/Invoice Nº:		Desenho Nº/Drawing Nº:					
Material/ Material Especifications: 354 - IC 8620 TAURUS (SI 0,50)						Norma/Norm:			
Cliente/Client:						Quantidade/Quantity:			
Código Item/Item Code:		Descrição/Description:							
Tratamento Térmico/ Heat Treatment: NORMALIZAR C/ RECUP CARBONO. RECOZER									
Composição Química/ Chemical Composition %		Limites/Limits		OF					
				Lote/Heat					
		Min.	Máx.	1267625	1267627	1267629	1267632	1267815	126781
C	%	0,1500	0,2500	0,2200	0,2300	0,2140	0,2080	0,2350	0,2
CR	%	0,4000	0,7000	0,6000	0,5600	0,5300	0,4960	0,5800	0,5
CU	%	0,0000	0,5000	0,0210	0,0170	0,0150	0,0170	0,0210	0,0
MN	%	0,6500	0,9500	0,8200	0,8600	0,8900	0,8200	0,8900	0,8
MO	%	0,1500	0,2500	0,2480	0,2010	0,1950	0,2080	0,2350	0,2
NI	%	0,4000	0,7000	0,5700	0,5300	0,5100	0,4700	0,5300	0,4
P	%	0,0000	0,0400	0,0170	0,0160	0,0160	0,0190	0,0210	0,0
S	%	0,0000	0,0450	0,0081	0,0078	0,0076	0,0073	0,0087	0,0
SI	%	0,0000	0,5000	0,1980	0,2150	0,2280	0,2620	0,2550	0,2
W	%	0,0000	0,1000	0,0100	0,0150	0,0085	0,0082	0,0073	0,0
Propriedades Mecânicas / Physical Properties		Limites/Limits		Encontrado / Found					
		Min.	Máx.						
DUREZA HRB	HRB	90,0000	98,0000	96,0000	95,0000	96,0000	95,0000	93,0000	91,0

Fonte: SULMAQ, 2018.

Importante ressaltar que, na falta de matéria-prima no estoque da empresa, a carga metálica tenderá a aumentar seu custo, como podemos averiguar nas tabelas apresentadas acima. Comparando as tabelas 15 e 16 com a tabela 14, é possível inferir que a falta de canais retorno AISI 302M obrigou o método numérico computacional a gerar uma nova carga metálica utilizando, entre outros, o SAE 4340 e o DIN 1.4713.

As matérias-primas, assim como suas respectivas quantidades foram calculadas pelo método numérico de forma precisa e rápida. Desse modo, os resultados poderão ocasionar em uma potencial redução de custo para o SAE 8620 modificado.

4.5 Método Numérico Computacional: viabilidade econômica

4.5.1 Análise de resultados: conjunto de testes DIN 1.3355

A análise econômica inicia-se com os testes realizados com o aço DIN 1.3355. A tabela 17 especifica os custos envolvidos com as matérias-primas do conjunto de testes realizados como de praxe pela empresa.

Tabela 17. Análise de custos do conjunto de testes realizados pela empresa para o aço DIN 1.3355.

Descrição	Corrida (nº)	Quant. (kg)	Custo total (R\$)	Custo un. (R\$/kg)
Teste 1	1266005	178	6.693,32	37,60
Teste 2	1266007	178	6.724,90	37,78
Teste 3	1266009	196	7.274,74	37,12
Média	–	184	6.897,65	37,50

A tabela 18 ilustra os resultados de uma análise dos custos envolvidos para testes realizados em triplicidade com o método numérico computacional.

Tabela 18. Análise de custos do conjunto de testes executados com a utilização do método numérico computacional para o aço DIN 1.3355.

Descrição	Corrida (nº)	Quant. (kg)	Custo total (R\$)	Custo un. (R\$/kg)
Teste 1	1266508	178	6.539,92	36,74
Teste 2	1266510	178	6.539,92	36,74
Teste 3	1266876	196	7.193,02	36,70
Média	–	184	6.757,62	36,73

Com base nos resultados expressos acima através das tabelas 17 e 18, pode-se inferir que ocorreu uma redução de custo nos testes realizados utilizando o método numérico para o aço DIN 1.3355. Avaliando a média dos custos unitários dos testes executados em triplicidade, o

custo unitário para os testes realizados como de praxe pela empresa foi de R\$ 37,50/kg e o custo unitário médio dos testes desempenhados em triplicidade utilizando o método numérico foi de R\$ 36,73/kg. Desse modo, houve uma redução média de custo unitário de 2,1% para o aço DIN 1.3355. Como o aço em questão possui muita liga e um elevado custo unitário, o percentual encontrado de 2,1% de redução de custo é relevante, visto que, avaliando os custos absolutos das cargas metálicas, para uma carga metálica de 196 kg de aço DIN 1.3355, a utilização do método numérico computacional para o cálculo de carga poderá reduzir o custo em R\$ 151,00. Para uma quantidade de 1000 kg, quantidade fabricada em alguns meses pela empresa, a redução de custo será entorno de R\$ 770,00.

Feita uma análise minuciosa das matérias-primas das cargas, a redução de custo encontrada foi consequência da utilização de sucata SAE 430 e canal retorno DIN 1.4713, como é evidenciado nas tabelas 8, 9 e 10. Além dos canais de retorno possuírem um baixo custo unitário, sua utilização contribuiu para a redução da quantidade utilizada de ferroligas, como por exemplo a supressão total de Fe-Cr 60% que possui um custo relativamente alto. A utilização destes constituintes na carga e suas respectivas quantidades, foram calculadas com precisão pelo método numérico, assim, este fato resultou na redução de custo unitário médio de 2,1% para o aço DIN 1.3355.

4.5.2 Conjunto de testes SAE 8620 modificado

A análise dos resultados deste tópico inicia com os testes executados em triplicidade para o aço SAE 8620 modificado utilizando o cálculo de carga feito como de praxe pela empresa. Os resultados são evidenciados através da tabela 19.

Tabela 19. Análise de custos do conjunto de testes realizados pela empresa para o aço SAE 8620 modificado.

Descrição	Corrida (nº)	Quant. (kg)	Custo total (R\$)	Custo un. (R\$/kg)
Teste 1	1267608	250	518,29	2,07
Teste 2	1267612	265	531,87	2,01
Teste 3	1267614	255	490,60	1,92
Média	–	256,67	513,59	2,00

A tabela 20 ilustra os resultados de uma análise dos custos envolvidos com as matérias-primas dos testes realizados em triplicidade com o método numérico computacional para o aço SAE 8620 modificado.

Tabela 20. Análise de custos do conjunto de testes executados com a utilização do método numérico computacional para o SAE 8620.

Descrição	Corrida (nº)	Quant. (kg)	Custo total (R\$)	Custo un. (R\$/kg)
Teste 1	1267627	230	391,06	1,70
Teste 2	1267629	265	413,84	1,56
Teste 3	1267632	230	356,06	1,55
Média	–	241,67	386,99	1,60

Com base nos resultados expostos acima, pode-se aferir se houve redução de custo com o aço SAE 8620 modificado. A tabela 19 apresenta um custo médio unitário de R\$ 2,00/kg e a tabela 20 um custo médio unitário de R\$ 1,60/kg. Desse modo, houve uma redução de custo significativa de 20% no custo unitário médio da carga metálica. Outrossim, avaliando as corridas individualmente, a corrida 1266627 possui um custo unitário de R\$ 1,70/kg que é cerca de 9% maior que as demais corridas do mesmo conjunto de testes realizados em triplicidade. Este fato é consequência da ausência da matéria-prima AISI 302M para a corrida 1267627, desse modo, utilizou-se os canais de retorno SAE 4340 e o DIN 1.4713 que, consequentemente, aumentou o custo unitário. A utilização do método numérico proporcionou uma redução significativa de ferroligas que possuem elevado custo, como o Ni 4x4 metálico, o Fe-Mo 60% e em especial a supressão total de Fe-Cr 60%. De fato, a redução de custo é consequência da utilização dos canais de retorno que possuem baixo custo unitário e contribuem para a composição química global do SAE 8620 modificado.

Considerando que, para uma média mensal de 2.000 kg de aço SAE 8620 modificado produzidos pela empresa, haverá uma redução de custo médio de R\$ 800,00 considerando a redução de custo encontrada de 20%, que de fato é muito significativo.

Assim, o método numérico computacional mostrou-se eficiente, preciso e viável economicamente para o cálculo de carga da empresa e, outrossim, uma relevante redução no tempo de preparação da carga foi verificada.

4.6 Erro associado à utilização do Método Numérico Computacional

O erro encontrado na utilização do cálculo numérico para elaboração das cargas metálicas pode ser estimado avaliando a composição química prevista pelo método e a composição química final encontrada na prática para cada corrida efetuada. Utilizou-se para a análise deste estudo duas corridas aleatórias com ambos os materiais, desta forma foi possível averiguar o erro tanto para o aço DIN 1.3355, quanto para o aço SAE 8620 modificado. As corridas contempladas para a presente análise foram: 1266508 do aço DIN 1.3355 e a corrida 1267627 do aço SAE 8620 modificado. As tabelas 21 e 22 ilustram os resultados obtidos para as corridas 1266508 e 1267627, respectivamente.

Tabela 21. Análise de erro para a corrida 1266508.

Elemento Químico	% calculada	% encontrada	erro absoluto %	erro relativo %
C	0,756	0,750	0,006	0,800
Mn	0,280	0,354	0,074	20,904
Si	0,250	0,368	0,118	32,065
Cr	4,010	3,960	0,050	1,263
V	1,060	1,120	0,060	5,357
W	17,800	18,120	0,320	1,766

Tabela 22. Análise de erro para a corrida 1267627.

Elemento Químico	% calculada	% encontrada	erro absoluto %	erro relativo %
C	0,220	0,230	0,010	4,348
Mn	0,740	0,860	0,120	13,953
Si	0,175	0,215	0,065	18,605
Cr	0,610	0,560	0,050	8,929
V	0,180	0,201	0,021	10,448
W	0,600	0,530	0,070	13,208

Ao verificar os resultados das tabelas acima, o erro relativo apresenta valores consideráveis. Com erros relativos próximos a 30%, o método em um primeiro momento aparenta ser impróprio. Porém, ao analisar o erro absoluto, constata-se que o valor é relativamente baixo e insignificante, visto que, os elementos químicos devem atender uma faixa de composição química e o valor numérico do erro absoluto é baixo, como por exemplo o silício da tabela 21, este elemento químico apresentou um erro relativo de aproximadamente 32%, porém o valor absoluto foi de 0,118%. Considerando que a faixa de composição química do silício para o aço DIN 1.3355 é de 0 a 0,45%, o valor encontrado foi de 0,368%, consideravelmente distante do máximo.

A utilização de um fator de estreitamento da faixa de composição química para os materiais no método numérico foi de suma importância. De modo que, o valor da composição química de cada elemento calculado pelo método, estará sempre próximo do centro da faixa especificada. Isso fará com que qualquer oscilação da composição química esperada esteja dentro da faixa considerando os erros absolutos encontrados.

5 CONCLUSÕES

As conclusões aqui expostas são uma síntese do Capítulo 4 – Resultados e Discussão, bem como um parecer final referente a viabilidade econômica e técnica do método numérico computacional desenvolvido.

O método numérico mostrou-se viável economicamente tanto para o aço DIN 1.3355 quanto para o aço SAE 8620 modificado. Com um custo unitário médio de R\$ 36,73/kg, o método numérico proporcionou uma redução média de 2,1% no custo unitário médio para o DIN 1.3355. Apesar de baixa, essa redução de custo é muito expressiva e significativa, fato este proporcionado pelo alto custo de fabricação do aço. Com um custo médio de R\$ 1,60/kg, a redução de custo para o aço SAE 8620 modificado foi expressivamente maior, atingindo um valor médio de redução do custo unitário de 20%.

Outrossim, o método numérico obteve resultados positivos e satisfatórios avaliando aços de duas extremidades; para um aço de alta liga como o DIN 1.3355 e, para um aço baixa liga como o SAE 8620 modificado. Assim, claramente será viável a aplicação do método para os demais materiais fabricados nas fundições.

Além da redução de custo com matéria-prima, a utilização do método auxilia o fundidor na tomada de decisão, que conseqüentemente reduzirá o tempo gasto para elaborar uma carga metálica. De fato, a redução no tempo de confecção da carga além de aumentar a produtividade diária e reduzir os custos energéticos, proporcionará uma redução no tempo de reação entre o metal líquido e a atmosfera que, metalurgicamente, minimizará a ocorrência de efeitos deletérios para o aço.

O erro relativo encontrado na utilização do método numérico computacional apesar de apresentar um valor expressivo, os resultados demonstraram-se aceitáveis. Fato este corroborado pelo baixo resultado do erro absoluto encontrado.

6 TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar o comportamento, a viabilidade técnica e econômica na utilização do método numérico computacional em outros materiais, incluindo aços, ferro fundido e não-ferrosos.
- Estimar através de testes convenientes, dados matemáticos com maior consistência para o método numérico computacional utilizando modelos estatísticos, como por exemplo o valor médio do rendimento para cada elemento químico, bem como seus respectivos desvios padrões a fim de mitigar possíveis erros.
- Avaliar a possibilidade da aplicação do método numérico computacional em conjunto com um sistema de gestão para o controle total da matéria-prima disponível na empresa, juntamente com a demanda e utilização da mesma.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASM HANDBOOK, **Volume 15: Casting**. Ohio: ASM International, 1992.

BALDAM, R. L.; VIEIRA, E. A. **Fundição: Processos e Tecnologias Correlatas**. 2a. ed. São Paulo, Editora Érica, 2014.

BEELEY, P. **Foundry Technology**. 2th ed, 2001.

BORGWARDT, K. H. **The Simplex Method: A Probabilistic Analysis**. 1949.

BROWN, J. R. **Foseco Foundryman's HANDBOOK**, 11^a ed. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000.

CERDÀ, V.; CERDÀ J.L. **Optimization of analytical techniques using the gradient and simplex methods**. 19th International Conference on Flow Injection Analysis and Related Techniques, Fukuoka, Japan, 2015.

CERDÀ, V.; CERDÀ J.L.; IDRIS, A. M. **Optimization using the gradient and simplex methods**. Talanta Journal, p. 641-648, 2016.

CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. **Métodos Numéricos para Engenharia**. Pearson, 2008

FRUEHAN R. J. **Ladle Metallurgy Principles and Practices**. Iron and Steel Society, 1985.

GAJIC D.; SAVIC-GAJIC I.; GEORGIEVA O.; GENNARO S. **Modelling of electrical energy consumption in an electric arc furnace using artificial neural networks**. Energy Journal, 2016, p. 132-139.

HECKMAN C. C. **Linear Programming: Beyond 4.2 (The Simplex Method)**. Department of Mathematics and Statistics, Arizona State University, 2006.

HORSTKOTTE B.; SÁNCHEZ A.T.; DUARTE C.M.; CERDÀ, V. **Response functions for SIMPLEX optimization of flow-injection analysis and related techniques.** Trends in Analytical Chemistry Journal, 2010.

KLEE, V.; MINTY, G. **How good is the simplex algorithm?**. New York, 1972.

KOHMANN, T. M. **Modelos de Eficiência Metálica, Carregamento e Otimização de Composição Química para Ligas Ferrosas em Fundições.** Dissertação (mestre em engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015

MAGALHÃES, D. R. **Otimização de cargas metálicas em fornos à indução.** 48º Seminário de Aciaria, Fundição e Metalurgia de Não-Ferrosos, ABM Week, São Paulo, SP, Brasil, 2017.

MAROS, I. **Computational Techniques of the Simplex Method.** Imperial College, London and Computer and Automation Research Institute, Budapest, 2003.

MATSUURA, H.; MANNING, C. P.; FORTES, R. A. F. O.; RICHARD, J.; FRUEHAN, R. J. **Development of a decarburization and Slag Formation Model for Electric Arc Furnace.** ISIJ international Journal, 2008, p. 1197-1205.

MILLS, K. **A short course on Estimation of Slag Properties.** Southern African Pyrometallurgy, Department of Materials, Imperial College, London UK, 2011.

SEIDU S. O., ONIGBAJUMO A. **Development of charge calculation program for target steel in induction furnace.** Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, 2015, p.81-97.

SULMAQ – Unidade Microfusão. **Banco de dados da engenharia da qualidade.** Consulta em 2018.

TODOS OS COLABORADORES. **Cálculo numérico** - um livro colaborativo - versão com scilab. Disponível em <https://www.ufrgs.br/reatmat/CalculoNumerico/livro-sci/main.html>, 2018.