

Universidade Federal do Triângulo Mineiro
Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica

Michael Ferreira Bertulucci

Modelagem matemática para otimização do planejamento e programação da
produção em uma fundição de pequeno porte

Uberaba - MG

2017

Michael Ferreira Bertulucci

Modelagem matemática para otimização do planejamento e programação da
produção em uma fundição de pequeno porte

Trabalho de conclusão apresentado ao Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, como requisito para obtenção do título de mestre.

Orientador: Prof. Dr. Victor Claudio Bento de Camargo.

Uberaba – MG

2017

**Catálogo na fonte: Biblioteca da Universidade Federal do
Triângulo Mineiro**

B463m Bertulucci, Michael Ferreira
Modelagem matemática para otimização do planejamento e programação da produção em uma fundição de pequeno porte / Michael Ferreira Bertulucci. -- 2017.
69 f. : il., fig., graf., tab.

Dissertação (Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica) --
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2017
Orientador: Prof. Dr. Victor Claudio Bento de Camargo

1. Fundição. 2. Pequenas e médias empresas. 3. Administração da produção. 4. Processos de fabricação - Automação. 5. Modelos matemáticos. I. Camargo, Victor Claudio Bento de. II. Universidade Federal do Triângulo Mineiro. III. Título.

CDU 621.74

MICHAEL FERREIRA BERTULUCCI

MODELAGEM MATEMÁTICA PARA OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO
E PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO EM UMA FUNDIÇÃO DE PEQUENO
PORTE

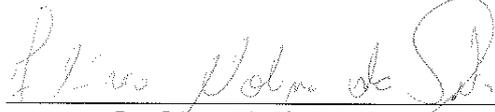
Trabalho de conclusão apresentado ao
Programa de Mestrado Profissional em
Inovação Tecnológica da Universidade
Federal do Triângulo Mineiro, como requisito
para obtenção do título de mestre.

Uberaba, 07 de março de 2017

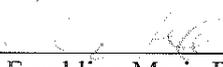
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Victor Cláudio Bento de Camargo
Orientador – PMPIT - UFTM



Prof. Dr. Flávio Molina da Silva
Membro Titular – UFTM



Profa. Dra. Franklina Maria Bragion de Toledo
Membro titular – USP

Agradecimentos

À minha companheira Marina que sempre se manteve ao meu lado nos momentos mais complexos dessa jornada. Aos meus pequenos e amados filhos, Lorenzo, Tuca e Pingu pelo amor incondicional dedicado a mim. Aos meus pais e irmãos por todo apoio e compreensão pela minha ausência. Aos meus amigos, que ao longo do tempo compartilharam comigo vários sentimentos, sendo eles bons e ruins.

À Fundação e sua equipe que abriram as portas e manteve seu suporte até o fim desse projeto.

A todos os professores, orientadores, tutores e coordenadores da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, que de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização de mais essa formação e sonho e em especial ao meu orientador e amigo, Victor, pela paciência e dedicação.

Resumo

O cenário atual de queda de demanda de materiais fundidos na economia reforça a necessidade de inovação do processo produtivo para manter as fundições competitivas. O presente trabalho analisa os principais modelos matemáticos encontrados na literatura para o dimensionamento de lotes e sequenciamento de ligas em fundições de mercado e propõe uma extensão para múltiplos fornos alternados em uma fundição de pequeno porte. O foco dos modelos analisados é a redução de custos de atraso, estoque e preparação dos fornos. A escolha do modelo validado foi feita a partir do resultado obtido da função objetivo, *gap* e subutilização dos fornos. Para o desenvolvimento desse trabalho, o processo de planejamento da produção de uma fundição foi estudado *in loco* com coleta de dados e aplicação de questionário para validação. Foram apresentados e validados planos de produção com desempenho significativamente melhor do que os realizados pela empresa. O modelo apresentado foi validado, porém, não implantado devido os custos inerentes de aquisição do *software* de otimização.

Palavra Chave: Fundição. Dimensionamento de lotes. Sequenciamento de ligas. Modelo matemático.

Abstract

The current economic scenery of falling demand of fused materials reinforces the need for innovation in the production process to keep the competitiveness of the foundries. The present work analyzes the main mathematical models found in the literature for the lot sizing and alloy sequencing in market foundries and proposes an extension for multiple alternative furnaces in a small foundry. The focus of the analyzed models is the reduction of the costs of delay, stock and furnace preparation. The choice of the model was made based on the objective function, gap and underutilization of the furnace given by computational tests. For the development of this work, the process of planning the production of a foundry was studied in loco with data collection and questionnaire application for validation procedure. Production plans with significantly better performance than those made by the company were presented and validated. The model was validated, however, not implemented due to the inherent costs of acquisition of the optimization software.

Key word: Foundry. Lot sizing. Alloy sequencing. Mathematical model.

Sumário

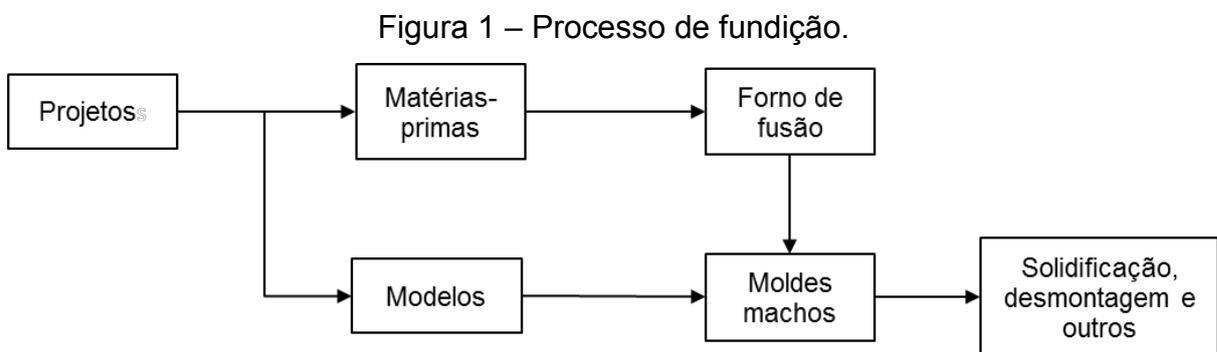
1	Introdução.....	6
2	Revisão bibliográfica.....	10
2.1	Planejamento da Produção.....	11
2.1.1	Dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção.....	11
2.1.1.1	<i>Big bucket lot sizing problem</i>	13
2.1.1.2	<i>Small bucket lot sizing problem</i>	19
2.2	Fundições.....	21
2.2.1	Estratégias de solução.....	22
3	Análise da fundição.....	24
3.1	Desafios.....	29
4	Modelos matemáticos.....	31
4.1	Modelo de Araujo, Arenales e Clark (2004).....	31
4.2	Modelo de Camargo e Navarenho (2016).....	33
4.3	Modelo de Toledo et al. (2014).....	35
4.4	Modelo MFA1.....	37
5	Avaliação dos modelos.....	40
6	Testes do modelo MFA1.....	48
7	Validação do modelo MFA1.....	53
7.1	Validação da formulação.....	55
7.2	Validação de dados.....	56
7.3	Validação experimental.....	56
7.4	Validação operacional.....	57
8	Considerações finais.....	60
9	Referências bibliográficas.....	62
	Anexo I – Questionário de Validação experimental.....	67
	Anexo II – Questionário de Validação operacional.....	68
	Anexo III – Pontuação consolidada dos Questionários I e II.....	69

1 Introdução

Fundição é um processo de fabricação que visa preencher com metal líquido (podendo ser um único tipo ou uma liga com vários metais) um molde com a geometria desejada com objetivo de obter uma peça metálica rígida no formato pré-estabelecido (CIMM, 2015).

Basicamente, os processos necessários na fundição de uma peça são: a confecção do molde a ser preenchido, a preparação e fundição do metal ou liga de metais, o vazamento do líquido obtido nos moldes e o acabamento às peças criadas após a solidificação do metal no molde (ARAUJO, 2003).

A Figura 1 ilustra de forma resumida um processo de fundição. O projeto da peça define as informações que determina o tipo de liga (quais matérias-primas serão utilizadas) e a confecção do modelo de peça a ser fundida. Na sequência, o modelo é utilizado para confecção do molde que irá receber a liga fundida do forno de fusão para dar forma ao projeto inicial.



Fonte: (ARAUJO, 2003).

As fundições são comumente classificadas em cativas e de mercado. Fundições cativas trabalham com produções em série, geralmente dedicadas a uma empresa (montadoras, por exemplo). As fundições de mercado, com foco diferente, visam atender vários pedidos e demandas de diferentes clientes (ARAUJO; ARENALES; CLARK, 2004).

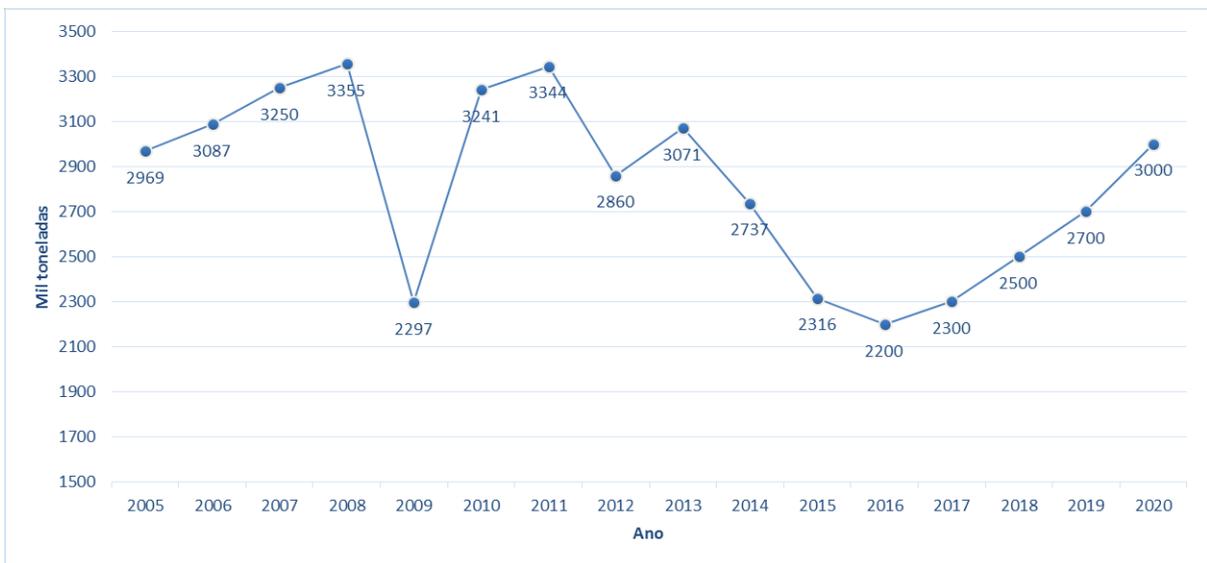
De acordo com levantamento da ABIFA (Associação Brasileira de Fundição) e disposto em seu Guia ABIFA (2016), 58% das fundições brasileiras destinam-se a abastecer o setor automobilístico, direta e indiretamente. Além desse setor, destacam-

se também os setores de bens de capital e exportações (13% cada), infraestrutura (6%), dentre outros.

Segundo o Guia ABIFA (2016), o Brasil ocupa a 7ª posição mundial em produção de fundidos (base 2012, 2013 e 2014). Em 2013, o setor faturou 11,6 bilhões de dólares empregando 65.072 pessoas distribuídas em aproximadamente 1.300 empresas. Em 2014, o setor retraiu e seu faturamento caiu para 8,4 bilhões de dólares e a mão-de-obra no setor foi reduzida para 61.278 pessoas (GUIA ABIFA, 2015). Retração também presenciada em 2015 onde o número de pessoas no setor foi de 53.433 e faturamento de 5,5 bilhões de dólares (GUIA ABIFA, 2016).

Ampliando a análise, ao verificar o cenário do mercado de fundidos na última década (Gráfico 1, período de 2005 a 2015), percebe-se uma queda acumulada de 22%. Uma breve análise dos dados do Gráfico 1, considerando agora as projeções para o setor (períodos a partir de 2016 do mesmo gráfico) verifica-se uma possível retomada dos patamares de 2013 apenas em 2020.

Gráfico 1 – Produção e projeção de fundidos, Brasil 2005/2020 (em mil toneladas).



Fonte: Adaptado Anuário ABIFA, 2016, páginas 25 e 28.

A queda na demanda de fundidos nos últimos anos, observada no Gráfico 1, devido alternância do cenário econômico e a crescente pressão para redução de custos para garantir a competitividade das fundições reforçam a importância de aprimorar o sistema de gestão do setor.

As práticas comuns de tomada de decisão baseadas no conhecimento e experiência do gestor têm demonstrado ser um sistema obsoleto perante a necessidade da empresa em se manter atualizada (ARAUJO; ARENALES; CLARK, 2004). Tal afirmativa se mantém verdadeira nos dias atuais.

De forma resumida, as informações mostradas no Gráfico 1 ressaltam a importância de as fundições buscarem novas formas de operação para se manterem competitivas. Outros fatores como a globalização de mercados e a velocidade crescente de desenvolvimento de novos produtos tornam o ambiente empresarial altamente competitivo (TONAKI, 2006). De acordo com Tonaki (2006), estes fatores fazem com que as empresas busquem continuamente novas técnicas que permitem elevar os índices de eficiência e reduzir de custos, com crescente investimento no planejamento da produção.

Devido a sua importância no abastecimento de peças para os diversos setores da indústria e as pressões de mercado (inclui-se concorrência e riscos econômicos), as fundições necessitam se aprimorar para atender a demanda e obter lucro em suas operações. Esse aprimoramento pode ser oriundo de atualização de tecnologias e de maquinário (o que pode representar valores elevados de investimento) e/ou no aprimoramento e na utilização de técnicas e de ferramentas de melhoria de processos para extração máxima da capacidade já instalada. As fundições de mercado, devido a sua natureza (geralmente pequenas e médias empresas com grande variedade de produtos), enfrentam maiores dificuldades em melhorar seu desempenho devido, principalmente, à quantidade de variáveis envolvidas no processo de planejamento e na programação de produção e às limitações de estrutura.

Fernandes e Leite (2002) mapeiam em seu trabalho tal dificuldade e mostram interesse por parte das fundições em melhorar o sistema de planejamento da produção, dentre outros interesses.

A programação da produção é uma das etapas mais desafiadoras no ambiente gerencial em um sistema produtivo (DREXL; KIMMS, 1997). O dimensionamento de lotes (*lot sizing*) e a programação da produção (*scheduling*) são amplamente explorados devido, dentre outros fatores, a grande diversidade de modelos produtivos, à quantidade de variáveis e de restrições encontradas em uma indústria. Não diferente, identifica-se grandes oportunidades de melhoria nas fundições, focando o planejamento das etapas produtivas, com relevante importância para o dimensionamento de lotes e o sequenciamento da produção.

O objetivo desse trabalho é aplicar e validar um modelo matemático que se adeque ao planejamento da produção de uma fundição de mercado retornando como produto um plano de produção, contemplando o dimensionamento de lotes e o sequenciamento da produção, com os menores custos encontrados (preparação, estoque e atraso). Para tal, estudou-se uma fundição de mercado com foco em uma etapa da produção (fundição), com demanda de múltiplas peças, diferentes ligas, existência de mais de uma máquina (fornos) e vários períodos de planejamento.

O estudo está apresentado nesse trabalho na seguinte estrutura: o Capítulo 2 apresenta uma breve revisão bibliográfica que engloba literatura de base para o desenvolvimento desse trabalho. No Capítulo 3, apresenta-se a empresa e o processo produtivo estudado. Os modelos matemáticos estudados para o sistema analisado são apresentados no Capítulo 4. Os modelos são analisados e comparados no Capítulo 5. O Capítulo 6 reporta os testes realizados e os resultados obtidos com o modelo selecionado. O Capítulo 7 apresenta o processo de validação do modelo na fundição estudada. No Capítulo 8 são feitas as considerações finais e o direcionamento para trabalhos futuros.

2 Revisão bibliográfica

Fernandes e Leite (2002) mostram por meio de sua pesquisa que uma grande preocupação das fundições de mercado do interior paulista é referente à etapa de planejamento e programação da produção. A maioria dos projetos de melhoria desenvolvidos ou de interesse destas empresas tem relação com a etapa de programação e planejamento. Essa etapa é de extrema importância e com alto grau de dificuldade em ser realizada devido a várias restrições presentes no setor de fundição, como exemplos, a limitação na utilização de fornos, lotes de quantidades e tipos de peças com grande variedade e preocupação em atendimento de prazos. Melhorar o processo de planejamento significa, em parte, que a empresa reduzirá a diferença entre capacidade a instalada da empresa e sua real produção.

Tonaki (2006) define o planejamento da produção como a etapa responsável em avaliar as decisões, no que concerne a parte produtiva, da melhor forma, otimizando a utilização dos recursos disponíveis para cumprir os objetivos produtivos da empresa no horizonte de planejamento (período contemplado pelo plano de produção). Para criar um plano de produção factível é importante definir o tamanho ideal de um lote de produção (dimensionar o lote) considerando as restrições do ambiente produtivo e buscando atingir o melhor resultado.

O foco do planejamento da produção das fundições de mercado (e não restrito a essas) é encontrar um plano de produção com custo mínimo, reduzindo as preparações de máquinas, atrasos na entrega, estoques e respeitando os recursos disponíveis (CAMARGO; MATTIOLLI; TOLEDO, 2012). Um planejamento da produção eficiente propicia vantagens estratégicas para as fundições de mercado.

Outro fator relevante para a delimitação do tema é a evolução de estudos dedicados à melhoria do planejamento em fundições nos últimos anos. Araujo, Arenales e Clark (2004) identificaram a escassez de estudos que tratam os problemas encontrados no planejamento e programação da produção em fundições, porém nota-se uma crescente movimentação acerca do tema na última década onde destacam-se os trabalhos de Araujo, Arenales e Clark (2008), Tonaki e Toledo (2010) e Toledo et al. (2014), dentre outros.

Uma ferramenta para otimizar o planejamento da produção é a modelagem matemática. Arenales et al. (2007) exemplificam a utilização da modelagem matemática em várias etapas do processo de produção, em que se destaca o

problema de misturas de insumos para obter a liga desejada, resultando um menor custo e atendendo as normas técnicas da metalurgia e problemas relacionados ao planejamento da produção. Direcionado ao planejamento de produção, a modelagem matemática pode auxiliar nas tomadas de decisão referentes ao mix de produção, no dimensionamento e na programação de lotes (ARENALES et al., 2007).

2.1 Planejamento da Produção

O planejamento da produção considera minimizar o custo de processamento em todas as operações (produção, preparação, estoques, atrasos, logística interna, etc.) utilizando para este fim os recursos disponíveis (CAMARGO, 2009). Considerando as fundições de mercado, Camargo (2009) define como objetivo do planejamento de produção o dimensionamento dos lotes de produção, bem como suas composições em um tempo pré-definido (horizonte finito de planejamento) e as ligas metálicas (e suas proporções) a serem fundidas para confecção dos produtos finais.

Para o dimensionamento da produção, deve-se considerar os parâmetros (dados pré-estabelecidos pela fundição como: a capacidade de fornada, penalidades por não cumprimento de prazos, a demanda dos itens por período, etc) e as variáveis do problema (como o próprio nome diz, trata-se dos valores que podem variar de acordo com o plano gerado, tais como a quantidade de um determinado item a ser produzido em um período, a quantidade de itens produzidos para estoque ou em atraso, etc).

Drexl e Kimms (1997) reforçam que um plano de produção factível não é suficiente do ponto de vista econômico. O objetivo então é encontrar um plano de produção passível de ser cumprido e que garanta o melhor resultado possível. Desta forma, a função objetivo que minimiza o custo envolvido na cadeia produtiva, tais como o custo de produção, armazenamento, atrasos, troca de lotes ou ferramenta, períodos ociosos, é amplamente utilizada nos modelos de dimensionamento de lotes e programação da produção.

2.1.1 Dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção

Problemas de dimensionamento de lotes (*Lot Sizing Problem* – LSP) compõem os problemas de planejamento da produção e são amplamente estudados. Pode-se

destacar as revisões apresentadas por Brahimí et al. (2006) que apresentam modelos e métodos de soluções para problema de dimensionamento de lotes na produção de um único item.

Várias classificações foram propostas para os problemas de dimensionamento de lote. Os processos de produção são classificados para determinar um modelo matemático que represente tais características do processo. Para classificar os modelos é necessário o entendimento de alguns critérios acerca do processo analisado. Brahimí et al. (2006) descrevem como principais critérios que servem de base para classificação dos problemas de dimensionamento de lote: o número de máquinas no processo, número de estágios no processo (podendo ser mono ou múltiplo estágios dependendo da quantidade de processos interdependentes), restrições de capacidade e duração do período de produção.

Enquanto o foco do LSP é o dimensionamento de lotes, o sequenciamento trata da ordenação desses lotes de produção. Devida a fatores intrínsecos de vários processos produtivos, tais como a necessidade de preparação de máquina na troca do lote, o aumento do custo dependendo da sequência de produção adotada ou limitações técnicas que impedem determinadas sequências de produção, o sequenciamento é amplamente abordado em conjunto com o problema de dimensionamento de lotes.

Drexl e Kimms (1997) apresentam um levantamento dos modelos de dimensionamento e sequenciamento de lotes explorando as diferenças entre os modelos. Os autores analisam os modelos de dimensionamento e sequenciamento de lotes em sistemas mono e múltiplos estágios. Considerando uma fundição, como exemplo, o dimensionamento e o sequenciamento de lotes analisando apenas o forno da fundição trata-se de um sistema monoestágio. Em alguns casos é necessário planejar a produção considerando as restrições de processos anteriores ou posteriores à etapa de fundição. Um exemplo comum é realizar o planejamento da fundição e o acabamento (quando existe a necessidade de acabamento) em conjunto, obedecendo as restrições de ambos os processos.

Uma pesquisa de modelos de dimensionamento e sequenciamento de lotes em ambientes monoestágio é apresentada por Staggemeier e Clark (2001). Os autores resumem em seu trabalho diferentes aspectos encontrados na literatura explicando os métodos mais utilizados na resolução de problemas de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção.

Uma importante informação que define um critério para classificação dos problemas de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção é quanto ao tamanho do período planejado. Brahimí et al. (2006) classifica os problemas de dimensionamento neste critério como *Small bucket problem* e *Big bucket problem*. O primeiro consiste em planos de produção com no máximo dois lotes ou itens a serem produzidos por período (comumente chamado de micro-período ou subperíodo), realizando no máximo uma preparação. Problemas de *Big bucket* contemplam planos mais longos, com possibilidade de produção de vários lotes de produtos diferentes, e conseqüentemente, a possibilidade de várias preparações (BRAHIMI et al., 2006).

2.1.1.1 *Big bucket lot sizing problem*

A importância dos modelos *Big bucket* se dá, principalmente, pela possibilidade de gerar planos táticos de produção facilitando a análise e dimensionamento dos recursos necessários para cumprimento do mesmo. Os problemas do tipo *Big bucket* trabalham com períodos relativamente longos e consideram o planejamento de vários lotes de produtos a serem produzidos no período planejado (BRAHIMI et al., 2006). Os modelos *Big bucket* consideram um horizonte de tempo finito, dividido em períodos menores com demandas variadas e conhecidas (BRAHIMI et al., 2006).

O modelo mais comum e utilizado nesses problemas é chamado de *Capacited lot sizing problem* (CLSP), traduzido como problema de dimensionamento de lotes capacitado (limitados pela capacidade de uma máquina ou recurso). O CLSP pode incluir o planejamento de múltiplos itens (Drexl e Kimms, 1997) e o planejamento de múltiplos níveis - MLLSP – *multi level lot sizing problem* (Brahimi et al., 2006).

Dentro do planejamento da produção, onde busca-se definir o tamanho e a seqüência dos lotes, uma abordagem comumente aplicada é a utilização destes modelos em problemas de dimensionamento de lotes e, posteriormente, resolver o problema de sequenciamento dos lotes de produção de maneira hierárquica (DREXL; KIMMS, 1997).

O modelo CLSP como apresentado em (Drexl e Kimms, 1997) é mostrado a seguir:

Dimensões e Índices:

$j = 1, \dots, J$ Itens.
 $t = 1, \dots, T$ Período de tempo.

Parâmetros do problema:

C_t Capacidade disponível da máquina no período t .
 p_j Capacidade utilizada para produção de uma unidade do item j .
 d_{jt} Demanda para o item j no período t .
 h_j Custo de estoque para uma unidade do item j .
 s_j Custo de preparação de máquina para a produção do item j .

Variáveis de decisão:

I_{jt} Estoque do item j no final do período t .
 X_{jt} Quantidade de produção do item j no período t .
 Y_{jt} Variável binária que indica a preparação da máquina para a produção do item j no período t ($Y_{jt} = 1$), ou não ($Y_{jt} = 0$).

Função objetivo:

$$\text{Min} \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T (s_j Y_{jt} + h_j I_{jt}) \quad (1)$$

Sujeito a:

$$I_{j, (t-1)} + X_{jt} = d_{jt} + I_{jt} \quad \forall j; \forall t \quad (2)$$

$$p_j X_{jt} \leq C_t Y_{jt} \quad \forall j; \forall t \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^J p_j X_{jt} \leq C_t \quad \forall t \quad (4)$$

$$I_{j0} = 0 \quad \forall j \quad (5)$$

$$Y_{jt} \in \{0,1\} \quad \forall j; \forall t \quad (6)$$

$$I_{jt}, X_{jt} \geq 0 \quad \forall j; \forall t \quad (7)$$

No modelo acima, a função objetivo (1) visa minimizar a soma dos custos de preparação e de estoque. O balanço de estoques é apresentado em (2). As restrições (3) garantem que um item seja produzido na máquina apenas após a sua preparação. As restrições (4) delimitam a capacidade da máquina. Assume-se que no início do planejamento não existe estoque (Restrições (5)). Definição da variável binária e garantia de não-negatividade são as restrições (6) e (7), respectivamente.

Outra extensão do CLSP é o CLSD (*Capacited lot sizing and scheduling problem with sequence-dependent setups*), tendo duas variantes: CLSD-PM e CLSD-SM (JAMES E ALMADA-LOBO, 2010). As variantes diferenciam-se pela disposição de máquinas consideradas no modelo, o CLSD-PM considera máquinas paralelas (*parallel-machine*) e o CLSD-SM, máquina simples (*single-machine*). James e Almada-Lobo (2011) propõem o modelo CLSD-PM para máquinas paralelas generalizando o modelo CLSD-SM, como segue.

Novas dimensões e Índices:

$j, i = 1, \dots, J$ Itens.
 $m = 1, \dots, M$ Máquina.

Novos parâmetros do problema:

C_{mt} Capacidade disponível da máquina m no período t .
 d_{jt} Demanda para o item j no período t .
 s_{mij} Custo de preparação na máquina m para alterar de itens i para j .
 r_{mij} Tempo de preparação da máquina m para alternar entre itens i e j .
 p_{mj} Tempo de processamento de uma unidade do item j na máquina m .
 I_{j0} Inventário inicial do item j .
 G_{mjt} Limite superior da quantidade de produção do item j na máquina m no período t .
 A_{mj} Indicador se a máquina m é capaz de produzir o item j . $A_{mj} = 1$, se capaz e $A_{mj} = 0$ caso contrário.

Novas variáveis de decisão:

X_{mjt} Quantidade de produção do item j na máquina m no período t .

V_{mit} Variável auxiliar que atribui o produto i na máquina m no período t .

Y_{mijt} Variável binária que indica a troca de produção do item j para o item i na máquina m no período t ($Y_{mijt} = 1$), ou não ($Y_{mijt} = 0$).

Q_{mjt} Variável binária que indica se a máquina m está preparada para produzir o item j no período t ($Q_{mjt} = 1$), ou não ($Q_{mjt} = 0$).

Função objetivo:

$$\text{Min} \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T s_{mij} Y_{mijt} + \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T h_j I_{jt} \quad (8)$$

Sujeito a:

$$I_{j, (t-1)} + \sum_{m=1}^M X_{mjt} = d_{jt} + I_{jt} \quad \forall j; \forall t \quad (9)$$

$$I_{j0} = 0 \quad \forall j \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^J p_{mj} X_{mjt} + \sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J r_{mij} Y_{mijt} \leq C_{mt} \quad \forall m; \forall t \quad (11)$$

$$X_{mjt} \leq G_{mjt} \left(\sum_{j=1}^J Y_{mijt} + Q_{mjt} \right) \quad \forall i; \forall t; \forall m \quad (12)$$

$$Q_{mj, (t+1)} + \sum_{j=1}^J Y_{mjit} = Q_{mjt} + \sum_{j=1}^J Y_{mijt} \quad \forall i; \forall t; \forall m \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^J Q_{mjt} = 1 \quad \forall m; \forall t \quad (14)$$

$$V_{mit} + J \cdot Y_{mijt} - (N - 1) - N \cdot Q_{mjt} \leq V_{mjt} \quad \forall i; \forall j; \forall t; \forall m \quad (15)$$

$$\sum_{t=1}^T X_{mjt} \leq G_{mjt} \cdot A_{mj} \quad \forall j; \forall m \quad (16)$$

$$X_{mjt}, I_{jt} \geq 0, Y_{mijt}, Q_{mjt} \in \{0,1\}, X_{mjt} \in Z^+ \text{ e } V_{mit} \in R^+ \quad (17)$$

Como no modelo anterior, a função objetivo (8) visa minimizar custos de estoque e de preparação. Em (9) tem-se o balanço de estoques. As restrições (10) garantem o inventário inicial nulo. Restrições (11) garantem que a capacidade disponível não seja excedida. As restrições (12) forçam preparação da máquina. As equações (13) mantêm as configurações de preparação ao longo dos períodos. Restrições (14) asseguram que cada máquina está preparada para produzir um produto no começo de cada período. Sequências de produção desconexas são eliminadas pelas restrições (15). As restrições (16) garantem que a produção dos produtos ocorra somente nas máquinas que estão preparadas para tais produtos. Por último, as condições de não-negatividade e integralidade são demonstradas em (17).

Uma outra forma de modelar a programação e o sequenciamento os lotes de produção é o GLSP (*general lot sizing and scheduling problem*). O GLSP apresenta as principais características entre os problemas DLSP, com foco em sequenciamento e o CLSP, orientado ao dimensionamento dos lotes. O modelo trabalha com demanda conhecida onde cada lote de produção é designado para uma posição no planejamento, definindo assim a sequência de produção (DREXL; KIMMS, 1997). Alguns autores (Camargo, Toledo e Almada-Lobo (2012), por exemplo) apoiam-se na subdivisão dos períodos em micro-períodos para classificá-lo como um modelo *small bucket*. Araujo (2003) e Ferreira, Morabito e Rangel (2005), classificam o GLSP como *big bucket* de acordo com Fleischmann e Meyr (1997).

O modelo GLSP é apresentado na sequência:

Novas dimensões e Índices:

$n = 1, \dots, N$ Micro-períodos.

Novas variáveis de decisão:

X_{jn} Quantidade de produção do item j no micro período n .

Y_{jn} Variável binária que indica a ocorrência de preparação de máquina para produção do item j no micro período n ($Y_{jn}=1$), ou não ($Y_{jn}=0$).

Q_{jn} Variável binária que indica se a máquina está preparada para produzir o item j no micro período n ($Q_{jn}=1$), ou não ($Q_{jn}=0$).

Função objetivo:

$$\text{Min} \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N s_j Y_{jn} + \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T h_j I_{jt} \quad (18)$$

Sujeito a:

$$I_{j, (t-1)} + \sum_{n=1}^N X_{jn} = d_{jt} + I_{jt} \quad \forall j; \forall t \quad (19)$$

$$p_j X_{jn} \leq C_t Q_{jn} \quad \forall j; \forall t; \forall n \quad (20)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^{L_t} p_j X_{jn} \leq C_t \quad \forall t \quad (21)$$

$$\sum_{j=1}^J Q_{jn} \leq 1 \quad \forall n \quad (22)$$

$$Y_{jn} \geq Q_{jn} - Q_{j, (t-1)} \quad \forall j; \forall n \quad (23)$$

$$Q_{jn} \in \{0,1\} \quad \forall j; \forall n \quad (24)$$

$$I_{jt} \geq 0 \quad \forall j; \forall t \quad (25)$$

$$X_{jn}, Y_{jn} \geq 0 \quad \forall j; \forall n \quad (26)$$

Novamente, a função objetivo (18) minimiza a soma dos custos de estoque e de preparação. Em (19), tem-se o balanço de inventário onde um item em particular pode ser produzido em vários micro-períodos. As inequações (20) garantem que se um lote do item j está agendado para o micro período n , a máquina estará preparada para produzir o item. Restrições de capacidade são apresentadas nas inequações (21). As restrições (22) limitam um único estado de preparação por micro período. As penalidades por troca de preparação são contabilizadas pelas restrições (23). As restrições (24)-(26) determinam o domínio das variáveis.

2.1.1.2 *Small bucket lot sizing problem*

Problemas de dimensionamento de lotes do tipo *small bucket* consideram pequenos intervalos de produção, garantindo a incidência de no máximo uma preparação de máquina por período planejado. O *Discrete Lot Sizing and Scheduling problem* (DLSP) considera os micro-períodos dos problemas CLSP (DREXL; KIMMS, 1997). Desta forma, o que difere um modelo do outro, basicamente, é a utilização total da capacidade disponível no período do DLSP (que representa um micro-período para o modelo CLSP) para a produção do item planejado. Sendo assim, custos de preparação podem não ocorrer em todos os micro-períodos planejados. Brahim et al. (2007) argumentam que uma única preparação pode ser suficiente para vários micro-períodos consecutivos para o mesmo lote de produção. Uma vantagem da utilização dos problemas de dimensionamento de lotes do tipo *small bucket* é que a programação e sequenciamento da produção são obtidos facilmente. O modelo DLSP assume a condição de “tudo ou nada” para cada micro-período planejado, ou seja, ele preenche todo o micro-período com a produção de um único lote ou deixa o mesmo vago.

O modelo DLSP é apresentado a seguir:

Novos parâmetros do problema:

Q_{j0} Valor binário que indica se a máquina está preparada para o produto j no início do micro-período 1 ($Q_{j0} = 1$) ou não ($Q_{j0} = 0$).

Novas variáveis de decisão:

Q_{jt} Variável binária que indica se a máquina está preparada para o item j no micro-período t ($Q_{jt} = 1$, caso positivo e $Q_{jt} = 0$, caso contrário).

Função objetivo:

$$\text{Min} \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T (s_j Y_{jt} + h_j I_{jt}) \quad (27)$$

Sujeito a:

$$I_{j, (t-1)} + X_{jt} = d_{jt} + I_{jt} \quad \forall j; \forall t \quad (28)$$

$$p_j X_{jt} = C_t Y_{jt} \quad \forall j; \forall t \quad (29)$$

$$\sum_{j=1}^J Q_{jt} \leq 1 \quad \forall t \quad (30)$$

$$Y_{jt} \geq Q_{jt} - Q_{j, (t-1)} \quad \forall j; \forall t \quad (31)$$

$$Q_{jt} \in \{0,1\} \quad \forall j; \forall t \quad (32)$$

$$I_{jt}, X_{jt}, Y_{jt} \geq 0 \quad \forall j; \forall t \quad (33)$$

A função objetivo e a maioria das restrições do DLSP são iguais ao modelo CLSP. As principais diferenças se encontram nas igualdades (29) e nas restrições (30) que garantem a utilização da capacidade produtiva do micro-período t com um único item. Outro fator que diferencia os modelos é o surgimento do índice n que trata micro-períodos de tempo, necessários para o sequenciamento dos itens na produção. As restrições (29) garantem a condição “tudo ou nada”, forçando o preenchimento completo da capacidade de produção ou não programando o item para o micro-período. As restrições (31) marcam o início de um novo lote. Os domínios das variáveis são definidos nas restrições (32) e (33).

Outros modelos *small bucket* são apresentados por Drexel e Kimms (1997). Como alternativa à limitação “tudo ou nada” do modelo DLSP, os autores exploram os modelos CSLP (*Continuous Setup Lot sizing Problem*) e PLSP (*Proportional Lot sizing and Scheduling Problem*). No CSLP, assume-se a possibilidade de utilizar uma parte do micro-período para preparação para o próximo item. Desta forma, o micro-período pode ser utilizado, mesmo que a produção do item não consuma todo o tempo do micro-período. Esta possibilidade permite deixar a máquina preparada para o início de um novo lote no próximo micro-período sem a incidência do custo de preparação (ARAUJO, 2003). Por outro lado, o PLSP, além de possibilitar a preparação dentro do micro-período, permite ainda o início de um segundo item a ser produzido no mesmo micro-período, permitindo a produção de até dois itens, desde que a máquina esteja preparada no período anterior (ou seja, somente uma preparação por micro-período).

2.2 Fundições

Araujo, Arenales e Clark (2004) estudam uma fundição de mercado de pequeno porte, com capacidade limitada, com um único forno, monoestágio, múltiplos produtos (itens oriundos de diferentes ligas, que devem ser fundidas em sequência) e com horizonte de planejamento finito. O modelo matemático visa a minimização dos custos de atraso na entrega, de estoque de produtos acabados e de preparação para a produção.

Outros trabalhos em fundições de pequeno porte são apresentados por Teixeira, Fernandes e Pereira (2010) que desenvolvem um modelo para sequenciamento da produção e Tonaki e Toledo (2010) e Camargo, Mattioli e Toledo (2012) com modelos para dimensionamento dos lotes e sequenciamento das ligas a serem fundidas. Silva e Morabito (2004) propõem um algoritmo para o planejamento da produção de uma pequena fundição de aço-inox com múltiplos fornos.

Araujo e Arenales (2003) modelam uma extensão do problema estudado por Santos-Meza, Santos e Arenales (2002) em que propõem minimizar os custos de estoque e atraso de itens, considerando custo de preparação. Outros modelos com objetivos similares são tratados Tonaki e Toledo (2010) e Camargo, Mattioli e Toledo (2012). Destaca-se que um dos objetivos comuns nesses trabalhos trata a redução de atraso na produção dos itens.

Existe uma lacuna na literatura para fundições de mercado de pequeno porte com possibilidade de alternar os fornos de produção. Esse trabalho mira essa lacuna

e foca no planejamento de fundições de mercado de pequeno porte com múltiplos fornos. Na literatura, várias estratégias são adotadas para propor planos de produção factíveis para os diferentes cenários encontrados.

2.2.1 Estratégias de solução

Existe uma tendência em separar os problemas de planejamento da produção em duas etapas facilitando sua resolução e a busca por soluções viáveis. A divisão do planejamento de produção em fundições em duas etapas justifica-se pela importância dos processos interligados de produção. Landmann e Erdmann (2011) e Tonaki e Toledo (2010) citam estas duas etapas como sendo a programação dos fornos de fundição e a programação das peças a serem fundidas, ou seja, a definição da liga a ser produzida em cada período de tempo e a programação de confecção dos moldes que determinará quais peças serão fundidas.

Tonaki e Toledo (2010), seguindo a análise de Araujo, Arenales e Clark (2008), propõem a divisão do problema em duas etapas, sendo a primeira focada no planejamento da produção de ligas e, posteriormente, o planejamento da produção de itens. Para cada solução é proposta uma heurística langrangiana baseada em transferência. Camargo, Mattioli e Toledo (2012) propõem a resolução do problema estudado por Tonaki e Toledo (2010) utilizando um algoritmo genético para determinar a sequência de ligas a serem fundidas e, posteriormente, utiliza o problema de mochila para a determinação dos itens a serem produzidos.

Araujo e Arenales (2003) adotam uma heurística de relaxação de ligas que permite atraso da demanda. Araujo, Arenales e Clark (2004) utilizam, além da estratégia de horizonte rolante, uma heurística *Relax-and-fix* e busca local. Teixeira, Fernandes e Pereira (2010), para obter uma solução viável, programa uma heurística de relaxação.

Silva e Morabito (2004) propõem uma heurística com objetivo de maximizar o peso total das peças produzidas em cada fornada, maximizando a utilização dos fornos. Duda (2005) elabora um modelo que maximiza o nível de utilização dos fornos e máquinas de moldes, considerando ainda penalidade por atraso a partir de um algoritmo genético para as etapas de planejamento do forno e peças.

Uma extensão do modelo de dimensionamento de lotes e programação de Araujo, Arenales e Clark (2008) é apresentada por Stawowy e Duda (2013) onde os autores propõem duas heurísticas populacionais e que, posteriormente (DUDA e

STAWOWY, 2015) utilizam lógica Fuzzy para algumas restrições e meta-heurística de algoritmo genético para solução do problema.

Seguindo outras linhas de estudo, Teixeira, Fernandes e Pereira (2010) desenvolvem um modelo de programação inteira binária para programação de moldes, dimensionamento de lotes e acabamento, Furtado (2012) trata o planejamento de produção em fundições de pequeno porte tentando maximizar a entrega completa dos pedidos dos clientes.

Como apresentado, existem estudos com diferentes métodos de resolução para o problema de dimensionamento e programação da produção em fundições de mercado. Observa-se que o foco desses estudos tem sido situações com um único forno (gargalo) e com objetivos similares (redução de estoque, atraso e custo de preparação, etc.).

Silva e Morabito (2004), Toledo et al. (2014) e Camargo e Navarenho (2016) apresentam propostas para utilização de múltiplos fornos. Camargo e Navarenho (2016) e Toledo et al. (2014) exploram mais a condição real de existência de múltiplos fornos nas fundições e propõem modelos que permitem a utilização de mais de um forno de forma alternada. No geral, os autores trabalham com modelos GLSP.

3 Análise da fundição

O planejamento de produção estudado foi baseado em uma fundição de mercado de pequeno porte situada no Triângulo Mineiro. A estrutura ativa da fundição analisada contempla um forno com três cavidades comumente chamadas cadinhos pelo setor, com capacidades nominais de 800, 800 e 400 quilogramas (kg). Devido às restrições na demanda contratada de energia, os cadinhos não operam de forma simultânea, restringindo a capacidade de fundição em 800 kg por fornada. Essa formatação da estrutura garante que a utilização de um forno com múltiplos cadinhos tenha o mesmo comportamento e restrições, para efeito de dimensionamento de lotes e sequenciamento de ligas, que uma fundição com múltiplos fornos.

A fundição trabalha com produção sob encomenda, produzindo apenas itens que compõem a carteira de pedidos. Devido a grande variedade de produtos, toda produção é programada com base em pedidos liberados pelo setor comercial. Cada pedido pode conter variados itens e com diferentes datas de entrega, de acordo com a solicitação do cliente. Esses fatores podem implicar no fracionamento do pedido de acordo com o material disponível e data de entrega de cada item. Respeitando a restrição de material e data de entrega, o setor de planejamento e controle da produção (PCP) agrupa itens de diversos pedidos para tentar utilizar a capacidade máxima de cada fornada.

O estudo na fundição se restringe ao planejamento do forno de fundição. Uma premissa necessária para o planejamento é a garantia de que os moldes estarão sempre prontos. Desta forma, reforça-se o objetivo desse trabalho que é propor uma extensão de um modelo matemático para o planejamento e programação dos fornos (ou cadinhos) de uma fundição de mercado.

Para melhor utilização dos recursos e redução de custos, a empresa força a utilização da máxima capacidade do cadinho de 800 kg. A utilização do cadinho de 400 kg acontece em duas situações: quando surgem peças com peso superior a 800 kg e inferior a 1200 kg ou; se a demanda de itens que utilizam a mesma liga não ultrapassar os 400 kg. No primeiro caso, utiliza-se o cadinho de 800 kg e, posteriormente, a cavidade de 400 kg até a fundição completa do material a ser envasado pelos dois cadinhos, sequencialmente. Esse processo demanda o dobro do tempo de fundição devido a necessidade de alternar os cadinhos.

O tempo de fundição por fornada é de aproximadamente 1,5 horas, com exceção da primeira fornada do dia onde considera-se 1 hora a mais para aquecimento do forno. A estrutura de turnos atual permite até sete fornadas por dia. Caso contrário, a fundição considera cinco fornadas por dia, podendo, inclusive, alternar os dias de acionamento do forno. As demandas de peças determinam tais critérios.

A fundição trabalha com ligas metálicas nodulares e cinzentas. A composição de cada liga é dada no Quadro 1.

Quadro 1 – Materiais fundidos.

Material	Descrição	Matéria-prima	Composição aproximada
60-45-12	Nodular	Ferro Gusa	48,5%
		Retorno nodular 60-45-12	24,5%
		Sucata de aço	24,5%
		Ligas especiais e carburantes	2,5%
70-50-05	Nodular	Ferro Gusa	48,5%
		Retorno nodular 70-50-05	24,5%
		Sucata de aço	24,5%
		Ligas especiais e carburantes	2,5%
80-60-03	Nodular	Ferro Gusa	48,5%
		Retorno nodular 80-60-03	24,5%
		Sucata de aço	24,5%
		Ligas especiais e carburantes	2,5%
A48CL30	Cinzento	Sucata de ferro fundido	67,0%
		Sucata de aço	15,0%
		Retorno cinzento	15,0%
		Ligas especiais e carburantes	3,0%
A48CL30S	Cinzento Especial	Sucata de ferro fundido	67,0%
		Sucata de aço	15,0%
		Retorno cinzento especial	15,0%
		Ligas especiais e carburantes	3,0%

Fonte: Autor.

Conforme ilustrado no Quadro 1, cada liga possui ao menos um item em sua composição (matéria-prima) que o diferencia dos demais. Esta diferenciação determina que cada fornada contenha apenas um tipo de liga a ser fundida.

Consideram-se para efeito de planejamento de fundição os cinco materiais (60-45-12, 70-50-05, 80-60-03, A48CL30 e A48CL30S) apresentados no Quadro 1.

Além da quantidade de liga utilizada, uma característica da empresa é a temperatura de fusão diferente para a mesma liga, de acordo com o projeto a ser fundido. Peças com dutos estreitos (geralmente peças menores ou com detalhes que necessitam de maior precisão) precisam de uma liga menos viscosa para seu completo preenchimento, exigindo uma temperatura maior de fusão e, em contraponto, peças maiores (ou menos detalhadas), podem ser fundidas em temperaturas menores, reduzindo os custos com energia elétrica. Mesmo esse trabalho não levando em consideração o custo exato em relação a temperatura de fusão, essa premissa é adotada pela empresa e altera todo o plano de produção.

A divisão de ligas por temperatura poderia ser feita criando uma restrição no modelo, o que mudaria a estrutura do mesmo tornando a comparação com os modelos analisados inviável. Para garantir a integridade na comparação dos modelos, a estratégia para contornar a questão técnica da temperatura de fusão para uma mesma liga foi considerar tais ligas diferentes. A liga 60-45-12, por exemplo, pode conter peças que necessitam de três temperaturas diferentes. Dessa forma, podemos assumir até três diferentes ligas para o mesmo material.

O percentual de matéria-prima utilizada em cada material sofre uma pequena variação, devido, principalmente, à quantidade de metais especiais (cobre, silício, cromo, etc.) e carburantes utilizados na composição da liga e pequenas variações na pesagem do material. Tal variação não será explorada por não afetar o tempo de preparo e fundição e, conseqüentemente, não alterar o planejamento das fornadas.

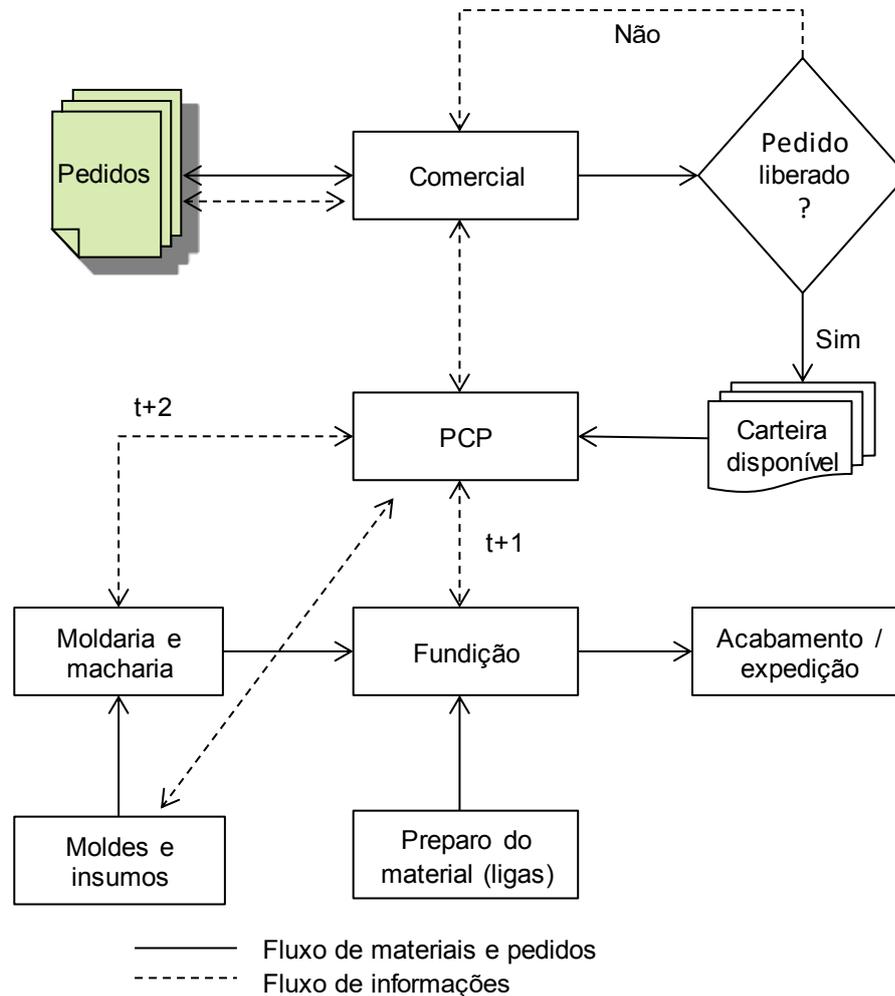
Atualmente, o planejamento da produção é feito com dois dias de antecedência para o setor de moldes e macharia (setor responsáveis pela confecção de moldes e complementos) e um dia para fundição. Isto implica dizer que, excetuando alguns casos especiais, conhece-se a produção esperada para o horizonte de dois dias. As exceções limitam-se às peças que possuem alguma restrição como falta de molde, matéria-prima, projeto, etc. ou ainda, quando a peça entra na carteira com caráter de urgência, garantindo prioridade em sua produção.

A limitação no horizonte de planejamento operacional em dois dias para confecção de machos e moldes e um dia para fundição ocorre devido à constante atualização da carteira disponível (entrada de pedidos com itens urgentes, liberação de novos pedidos, pedidos com prioridades relacionadas a fluxo de caixa, etc.) e pela

atualização da disponibilidade de matérias-primas, insumos, moldes e machos para o processo de fundição.

O processo de planejamento começa após o recebimento dos pedidos validados pelo setor comercial. A carteira de pedidos disponível é organizada de acordo com o vencimento da data de entrega de cada pedido ou item (quando se encontra em um mesmo pedido diferentes datas de entrega). O setor de Planejamento e Controle da Produção (PCP) é responsável pela organização dos pedidos e criação da ordem de produção que será encaminhada para os setores da produção. Com a ordem em mãos, o setor de macharia e moldes preparam os modelos a serem fundidos. O setor de fundição é responsável pela fusão das ligas e enchimento dos moldes. Por último, as peças recebem o acabamento e são disponibilizadas para o faturamento e envio aos clientes. Fatores como a incapacidade de disponibilizar os moldes e falta de insumos bloqueiam o planejamento operacional da produção dos pedidos e devem ser avaliados antes de criar o plano de produção. A Figura 2 ilustra o processo descrito acima até a fundição e expedição da peça. Destaca-se na Figura 2 o fluxo de informações trocadas entre o PCP e demais áreas envolvidas no processo produtivo. Esse fator é fundamental para sincronizar o planejamento de acordo com os recursos disponíveis.

Figura 2 – Fluxograma do processo de fundição.



Fonte: Autor.

Resumidamente, o processo de fundição na empresa analisada segue a seguinte sequência:

1. O setor PCP recebe os pedidos validados pela área comercial (Carteira disponível);
2. Com os pedidos em mãos, inicia o planejamento do que será fundido dois dias a frente. O processo de planejamento consiste em agrupar os itens por data de entrega e tipo de liga, priorizando os itens mais atrasados e considerando a capacidade de fundição do forno;
3. Após agrupamento de itens, cria-se ordens de produção até completar a capacidade de fundição em um dia;

4. Concluída as ordens de produção, as mesmas são encaminhadas (no final do dia ou no início do dia seguinte) ao setor de macharia e moldes para iniciar a confecção de moldes e machos;
5. Em paralelo, uma via das ordens de produção é utilizada para a preparação de ligas, que consiste em pesar e agrupar todo material metálico que irá compor cada fornada do dia seguinte em caixas preparadas para o carregamento dos cadinhos;
6. Dois dias após o planejamento inicia a fundição das ordens geradas. O processo consiste em aquecer o cadinho planejado e fundir cada caixa de material preparada no dia anterior. Após o tempo necessário, o líquido formado é envasado nos moldes previamente preparados;
7. Na sequência, as peças são desmoldadas e recebem os acabamentos necessários para disponibilizar ao setor de faturamento e expedição.

3.1 Desafios

O processo de fundição é limitado pela capacidade de cada fornada e pela quantidade de fornadas no dia, com horizonte finito de planejamento, múltiplos itens, estágio único de produção e múltiplas máquinas que não funcionam simultaneamente (necessidade de alternância dos cadinhos). As demandas são conhecidas por período e a empresa permite o atraso e a antecipação (estoque) de itens em seu planejamento.

Utilizar os fornos da melhor forma é uma premissa básica para fundições. Fundir o máximo de peças possíveis em cada fornada, garantir maiores quantidades de corridas (fornadas) no dia, evitar a criação de refugos, reduzir os estoques e evitar o atraso na entrega de itens ou pedidos são os maiores desafios no processo de dimensionamento de lotes e sequenciamento de ligas.

A utilização da capacidade máxima dos fornos otimiza o processo produtivo atingindo, direta ou indiretamente, os objetivos indicados pela empresa e dilui alguns dos principais custos da empresa como a energia elétrica e a manutenção dos fornos. Porém, o uso dos fornos não é comumente tratado diretamente na função objetivo, deixando a possibilidade, inicialmente, de subutilização da capacidade dos fornos. Espera-se que a calibração dos parâmetros (penalidades por atraso e estoque e custo

de preparação de fornos) defina se o forno será subutilizado ou não em detrimento do melhor cenário.

Pretende-se, desta forma, buscar o melhor cenário de utilização dos fornos, visando a redução dos custos de armazenamento, custos por atraso e custos de preparação de fornos. Ressalva-se que os custos de estoque, atraso e preparação são desconhecidos pela empresa e, devido a esse fator, são tratados de forma subjetiva e estimados de acordo com grau de importância para a empresa.

Destacam-se então os objetivos de maior atenção para a empresa estudada:

- Reduzir os atrasos;
- Reduzir os estoques de itens acabados e, conseqüentemente, o estoque de matéria-prima;
- Utilizar a máxima capacidade dos fornos;
- Reduzir o retorno oriundo de lingotes (subutilização dos fornos);

Citado os pontos acima, os principais desafios encontrados nesse trabalho e em linha com os interesses da empresa, são:

- Montar um plano de produção operacional com horizonte de planejamento semanal (podendo ser atualizado, se necessário) viável;
- Montar um plano de produção tático, com toda a carteira disponível para prover dados relevantes às tomadas de decisão a nível gerencial (estimativa de prazos, contratação e compra de materiais, adequação do quadro de funcionários, etc);
- Validar e implantar um modelo matemático e método de utilização na fundição.

A criação de planos de produção (operacional e tático) válidos retorna informações que balizarão as decisões a serem tomadas no âmbito operacional e tático. Garante-se assim melhor utilização dos recursos disponíveis e a possibilidade de visualizar e resolver possíveis problemas ou gargalos antes de afetarem o sistema produtivo.

4 Modelos matemáticos

Esse capítulo apresenta os modelos matemáticos utilizados na análise de dados desse trabalho. São apresentados modelos já publicados e uma extensão para que se possa realizar comparações de resultados e determinar um modelo para aplicar na fundição. Dessa forma, inicia-se com o modelo que serviu de base para os demais modelos apresentados na sequência.

Araujo, Arenales e Clark (2004) apresentam um modelo para representar o problema de planejamento da produção em fundições que utilizam um forno com apenas um cadinho. A extensão e os modelos para múltiplos fornos (ou cadinhos) apresentados nesse capítulo surgem com a adaptação desse modelo, o que justifica a importância da análise do modelo de Araujo, Arenales e Clark (2004) nesse trabalho.

4.1 Modelo de Araujo, Arenales e Clark (2004)

Novas dimensões e Índices:

$k = 1, \dots, K$ Número de ligas.

Novos parâmetros do problema:

Cap Capacidade do forno por micro-período em quilos.
 ρ_i Peso bruto do item i .
 b_{it} Custo de atraso na entrega de uma unidade do item i no período t .
 $s(k)$ Conjunto de itens fundidos na liga k .
 s_k Penalidade por preparação para liga k .

Novas variáveis de decisão:

B_{it} Quantidade do item i não entregue (atraso) no final do período t .
 Y_n^k Variável binária que indica se é cobrado custo de preparação para a liga k no micro-período n ($Y_n^k = 1$) ou não ($Y_n^k = 0$).
 Q_n^k Variável binária que indica se o forno está preparado para produzir a liga k no micro-período n ($Q_n^k = 1$) ou não ($Q_n^k = 0$).

Função objetivo:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (b_{it}B_{it} + h_{it}I_{it}) + \sum_{n=1}^L \sum_{k=1}^K s_k Y_n^k \quad (34)$$

Sujeito a:

$$I_{i,(t-1)} - B_{i,(t-1)} + \sum_{n=1}^N X_{in} + B_{it} = d_{it} + I_{it} \quad \forall i; \forall t \quad (35)$$

$$\sum_{i \in S(k)} \rho_i X_{in} \leq \text{Cap.} Q_n^k \quad \forall k; \forall n; \forall t \quad (36)$$

$$Y_n^k \geq Q_n^k - Q_{(n-1)}^k \quad \forall k; \forall n; \forall t \quad (37)$$

$$\sum_{k=1}^K Q_n^k \leq 1 \quad \forall n; \forall t \quad (38)$$

$$Q_n^k \in \{0,1\} \quad \forall k; \forall n \quad (39)$$

$$0 \leq Y_n^k \leq 1 \quad \forall k; \forall n \quad (40)$$

$$X_{imn}, I_{it}, B_{it} \in Y^+ \quad \forall i; \forall t; \forall n \quad (41)$$

A função objetivo (34) minimiza a soma dos custos de estoque, de atraso e de preparação do forno para produção. Restrições (35) fazem o balanço de produção e estoque de acordo com a demanda. Nas restrições (36), garante-se que o forno só produza se estiver preparado e limita a produção de acordo com a capacidade do forno. Definição da incidência de custo de preparação e sequência de ligas é imposta nas restrições (37). Restrições (38) impõem a quantidade de ligas em uma por período. Por último, temos em (39)-(41) as restrições de não negatividade das variáveis e integralidade.

Esse modelo é generalista, podendo ser adaptado facilmente em vários outros processos de fundição sem perder suas vantagens. Simples adaptações ou complementos podem representar restrições encontradas em outras fundições fazendo com que seja utilizado como base para outros modelos expostos na sequência.

Recentemente, alguns autores têm explorado a utilização de múltiplos fornos em fundição de mercado de pequeno porte. Camargo e Navarenho (2016) apresentam uma adaptação do modelo SMSGLSP de Camargo (2012) para indústrias com processos de dois estágios, conforme descrito a seguir.

4.2 Modelo de Camargo e Navarenho (2016)

Novas dimensões e Índices:

$t, t' = 1, \dots, T$	Períodos de tempo.
$m = 1, \dots, M$	Fornos (máquinas).

Novos parâmetros do problema:

Cap_m^{max}	Capacidade máxima do forno m em quilos.
Cap_m^{min}	Capacidade mínima do forno m em quilos.
$C_{itt'}$	Custo para o item i produzido no período t para atender a demanda de t' .
$\gamma_{mm'}$	Custo de preparação para mudar do forno m para o forno m' .
β_{mt}	Fração de tempo do período t utilizado para uma fornada pelo forno m .

Variáveis de decisão:

μ_{Stn}	Começo do micro-período n no período t .
$\mu_{f_{tn}}$	Final do micro-período n no período t .
$X_{itnt'}$	Quantidade produzida do item i no período t no micro-período n para atender a demanda do período t' .
U_{tnk}	1 se o recurso processado no micro-período n do período t é da liga k , 0 caso contrário.
F_{mnt}	1 se o forno m foi utilizado no micro-período n no período t , 0 caso contrário.
$Z_{mm'tn}$	1 se houve uma mudança do forno m para o forno m' , no período t e no micro-período n , 0 caso contrário.

Função objetivo:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{t'=1}^T (C_{itt'} X_{itnt'}) + \sum_{m=1}^M \sum_{m'=1}^M \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^L (Y_{mm'} Z_{mm'tn}) \quad (42)$$

Sujeito a:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^L X_{itnt'} = d_{it'} \quad \forall i; \forall t' \quad (43)$$

$$\rho_i X_{itnt'} \leq \text{Cap}_m^{\max} U_{tnk} \quad \forall k; \forall i \in s(k); \quad (44)$$

$$\forall t; \forall m; \forall t'$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{t'=1}^T (X_{itnt'} \rho_i) \leq \sum_{m=1}^M (\text{Cap}_m^{\max} F_{mntn}) \quad \forall t; \forall n \quad (45)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{t'=1}^T (X_{itnt'} \rho_i) \geq \sum_{m=1}^M (\text{Cap}_m^{\min} F_{mntn}) \quad \forall t; \forall n \quad (46)$$

$$\mu_{St1} = t - 1 \quad \forall t \quad (47)$$

$$\mu_{f_{tN}} = t \quad \forall t \quad (48)$$

$$\mu_{Stn} \geq \mu_{f_{t(n-1)}} \quad \forall t; n > 1 \quad (49)$$

$$\sum_{m=1}^M F_{mntn} \leq 1 \quad \forall t; \forall n \quad (50)$$

$$\mu_{f_{tn}} - \mu_{Stn} \geq \sum_{m=1}^M (\beta_{mt} F_{mntn}) \quad \forall t; \forall n \quad (51)$$

$$\sum_{n=1}^L \mu_{f_{tn}} - \mu_{Stn} \leq 1 \quad \forall t \quad (52)$$

$$F_{mntn} = \sum_{m'}^M Z_{mm'tn} \quad \forall t; \forall n; \forall m \quad (53)$$

$$F_{mt(n-1)} = \sum_{m'}^M Z_{mm'tn} \quad \forall t; \forall n; \forall m > 1 \quad (54)$$

$$F_{m(t-1)N} = \sum_{m'}^M Z_{mm't1} \quad \forall t; \forall m > 1 \quad (55)$$

$$X_{itnt'} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall i; \forall t; \forall m; \forall t' \quad (56)$$

$$F_{mnt}, U_{tnk} \in \{0,1\} \quad \forall t; \forall n; \forall k; \forall m \quad (57)$$

$$\text{Demais variáveis são não-negativas e contínuas.} \quad (58)$$

A função objetivo visa reduzir a soma dos custos de preparação de fornos, para produção de estoque e atraso. Os autores utilizam uma matriz de custo de atraso e estoque de itens para obter os valores de $C_{it't}$. Restrições (43) garantem o atendimento da demanda em cada período t' . Restrições (44) garantem que somente itens de uma mesma liga sejam produzidos na mesma fornada. Para garantir a utilização da capacidade mínima e máxima dos fornos são impostas as restrições (45) e (46), respectivamente. As restrições (47)-(49) fazem com que os micro-períodos comecem e terminem no momento correto e que não ocorra sobreposição entre eles. Restrições (50) garantem a utilização de exatamente um único forno por micro-período. Na prática e no modelo, cada forno demanda um tempo de fusão diferente. As restrições (51) fazem com que a duração de cada micro-período corresponda a um forno específico. As inequações (52) garantem que os fornos sejam utilizados apenas durante a duração do micro-período, limitando o número de fornadas. As restrições (53)-(55) contabilizam as trocas dos fornos. Por último, os domínios das variáveis são dados nas restrições (56)-(58).

Um modelo originado pelo modelo proposto por Araujo, Arenales e Clark (2004), com foco em múltiplos fornos alternados, é apresentado por Toledo et al. (2014).

4.3 Modelo de Toledo et al. (2014)

Novos parâmetros do problema:

μ_m Tempo de fusão do forno m em horas.

exp	Capacidade de fusão em cada período do horizonte de planejamento (em tempo).
$Maxt$	Número máximo de micro-períodos em um período do horizonte de planejamento ($Maxt = \lfloor exp/\min(\mu_m) \rfloor$).

Função objetivo:

$$Min \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (b_{it}B_{it} + h_{it}I_{it}) \quad (59)$$

Sujeito a:

$$I_{i,(t-1)} - B_{i,(t-1)} + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^L X_{imn} + B_{it} = d_{it} + I_{it} \quad \forall i; \forall t \quad (60)$$

$$\sum_{i=1}^{s(k)} \rho_i X_{imn} \leq Cap_m Q_{mn}^k \quad \forall k; \forall n; \forall m; \forall t \quad (61)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^L \mu_m Q_{mn}^k \leq exp \quad \forall t \quad (62)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M Q_{mn}^k \leq 1 \quad \forall n; \forall t \quad (63)$$

$$E_{i0} = 0; \quad A_{i0} = 0 \quad (64)$$

$$X_{imn} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall i; \forall n; \forall m; \forall t \quad (65)$$

$$E_{it}, A_{it} \geq 0 \quad \forall i; \forall t \quad (66)$$

$$Q_{mn}^k \in \{0,1\} \quad \forall k; \forall n; \forall m \quad (67)$$

A função objetivo do modelo visa minimizar os custos (ou penalidades) por atrasos e estoques. Equações (60) realizam o balanceamento de estoque. Restrições (61) limitam a produção à capacidade dos fornos utilizados. Inequações (62) limitam a quantidade de fornadas no período. As restrições (63) garantem que em cada micro-período, apenas uma liga é preparada por forno. Restrições (64) impõem, sem perdas

de generalidades, a condição de estoque e atraso nulos no início do horizonte de planejamento. Restrições (65)-(67) descrevem o domínio das variáveis.

Toledo et al. (2014) tratam, no modelo acima, o planejamento em fornos com tempo de fusão e capacidades diferentes. Dessa forma, as restrições (62) são tratadas em horas podendo ser diferentes para cada forno. Essa característica faz com que o número de fornadas (micro-períodos) em um período "t" varie em função do forno utilizado. Em outras palavras, as restrições (62) permitem representar de forma mais fiel processos em que fornos possuem tempos diferentes para fundição.

Para comparar os modelos é necessário realizar uma adaptação ao modelo de Toledo et al. (2014). Originalmente, o modelo acima não trata o custo de preparação de fornos, o que foi solucionado modificando a função objetivo e incluindo as restrições (69). Assim, a função objetivo passa a considerar preparação (68) e as restrições (69) indicam quando ocorrem as preparações. Para concretizar o modelo adaptado, faz-se necessário a inclusão da variável Y^{k}_{mn} que indica se é cobrado custo de preparação para o forno utilizado e o parâmetro s_{km} que representa o custo de troca de fornos.

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (b_{it}B_{it} + h_{it}I_{it}) + \sum_{n=1}^L \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M s_{km}Y^{k}_{mn} \quad (68)$$

$$Y^{k}_{mn} \geq Q^{k}_{mn} - Q^{k}_{m(n-1)} \quad \forall m; \forall n; \forall t; \forall k \quad (69)$$

Na sequência, é apresentada uma adaptação para utilização em fundições que possuem mais de um forno com objetivo de reduzir custos de preparação, atrasos e estoque de itens. O modelo Múltiplos Fornos Alternados, MFA1, permite o revezamento na utilização dos fornos em uma fundição.

4.4 Modelo MFA1

O modelo MFA1 é uma adaptação do modelo proposto por Araujo, Arenales e Clark (2004). Para adequar à realidade de múltiplos fornos, foram alteradas algumas variáveis e parâmetros, como segue:

Função objetivo:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (b_{it}B_{it} + h_{it}I_{it}) + \sum_{n=1}^L \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M s_{km}Y^{k}_{mn} \quad (70)$$

Sujeito a:

$$I_{i,(t-1)} - B_{i,(t-1)} + \sum_{n=1}^L \sum_{m=1}^M X_{imn} + B_{it} = d_{it} + I_{it} \quad \forall i; \forall t \quad (71)$$

$$\sum_{i \in S(k)} \rho_i X_{imn} \leq \text{Cap}_m Q^{k}_{mn} \quad \forall k; \forall n; \forall m; \forall t \quad (72)$$

$$Y^{k}_{mn} \geq Q^{k}_{mn} - Q^{k}_{m(n-1)} \quad \forall k; \forall m; \forall n; \forall t \quad (73)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M Q^{k}_{mn} \leq 1 \quad \forall t; \forall n; \quad (74)$$

$$Q^{k}_{mn} \in \{0,1\} \quad \forall k; \forall t; \forall m \quad (75)$$

$$Y^{k}_{mn} \geq 0 \quad \forall k; \forall t; \forall m \quad (76)$$

$$X_{imn}, I_{it}, B_{it} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall i; \forall t; \forall m \quad (77)$$

A função objetivo (70) minimiza os custos de estoque, atraso e preparação dos fornos. Restrições (71) fazem o balanço de produção e estoque de acordo com a demanda. Atendimento das capacidades dos fornos é observado nas inequações (72). A definição da incidência de custo de troca de preparação é mostrada nas restrições (73). Inequações (74) garantem que, no máximo, um único forno esteja preparado apenas para uma única liga em cada micro-período. A definição da variável binária que indica preparação do forno e seu período inicial é dado pelas restrições (75). Por último, em (76) e (77) temos as restrições de não-negatividade e integralidade das variáveis.

Esse modelo difere do modelo Toledo et al. (2014) adaptado pelo fato de considerar tempo de fornada fixo, independente do forno ou cadinho. Dessa forma, o único fator que o difere do modelo de Araujo, Arenales e Clark (2004) são as variáveis que consideram a possibilidade de utilizar mais de um forno, de forma alternada, mas

considerando o tempo de fusão igual, independentemente do tamanho do forno. Esse fato ocorre, por exemplo, na fundição estudada onde cadinhos com capacidades diferentes demandam o mesmo tempo para uma rodada de fundição.

A alternância entre os fornos disponíveis na fundição pode ser aplicada com o intuito de disponibilizar o forno atual para manutenção, utilizar um forno de menor capacidade ou menor custo de operação em detrimento de uma demanda momentânea reduzida, à produção de itens em ligas especiais com menor demanda, dentre outros fatores. Dessa forma, garante-se a utilização de um único forno por micro-período. O custo de preparação do cadinho de menor capacidade também é menor, fazendo com que justifique seu uso quando os itens não ultrapassarem sua capacidade.

Para todos os modelos testados a metodologia de cálculo para o custo de estoque e atraso adotada é a mesma proposta por Araujo (2003).

Tem-se que:

b_{it}	Custo de atraso de um item " i ".
h_{it}	Custo de estoque de um item " i ".
p_i	Peso do item " i ".
β_i	Atraso, em períodos, do item " i ".
γ_i	Antecipação, em períodos, do item " i ".

O atraso de um item sofre uma penalização em que " $b_{it} = p_i \cdot \beta_i$ ". Já o custo de estoque do mesmo item é calculado por " $h_{it} = (p_i \cdot \gamma_i) / 10$ ". Nota-se uma discrepância na ponderação entre custos de atraso e estoque. Essa subjetividade de cálculo faz com o que o modelo priorize a fabricação de itens em atraso em detrimento de criar estoques, mas não desconsidera o custo de estoque. Esses parâmetros são reflexo do não conhecimento dos custos por parte das fundições, porém, podem ser alterados para dados mais precisos, caso existam.

5 Avaliação dos modelos

A avaliação dos modelos consiste em comparar os principais aspectos e diferenças entre os modelos e os resultados obtidos com testes baseados em instâncias pré-definidas. O objetivo do capítulo é analisar os modelos apresentados no Capítulo 4 e definir qual deles, melhor se adapta aos dados da fundição estudada.

É importante destacar que não foram rodadas as instâncias para o modelo de Camargo e Navarenho (2016) nesse trabalho. As comparações realizadas por Camargo e Navarenho (2016) mostram uma melhor qualidade de solução para o modelo proposto por Araujo, Arenales e Clark (2004). Os autores utilizaram as instâncias de 12 a 19 expostas nesse trabalho e, consideraram os valores de FO, GAP e subutilização, para a comparação. Devido a qualidade da solução encontrada pelo modelo MFA1 ser superior ao modelo de Araujo, Arenales e Clark (2004) (como mostrado na sequência), subentende-se que a qualidade de solução de MFA1 é maior que Camargo e Navarenho (2016).

Destaca-se a importância do trabalho de Camargo e Navarenho (2016) para a área, propondo a adaptação de um modelo mais complexo, com maior quantidade de variáveis e restrições, o que justifica a dificuldade em encontrar a mesma qualidade de solução encontrada por Araujo, Arenales e Clark (2004). Mesmo não obtendo a mesma qualidade de solução, Camargo e Navarenho (2016) reforça a capacidade de seu modelo em encontrar as mesmas soluções e é uma importante contribuição para os estudos em fundições de mercado com múltiplos fornos.

Considerando o número de variáveis e restrições com base nos índices N , T , L , K e M a Tabela 1 apresenta a comparação para todos os modelos de múltiplos fornos e o modelo de Araujo, Arenales e Clark (2004) que considera um único forno, apresentados anteriormente.

Tabela 1: Variáveis e restrições por modelo.

	Araújo, Arenales e Clark (2004)	Toledo <i>et. al</i> (2014) mod	MFA1
Nº de variáveis em índices	$N(2T+L)+2KL$	$2NT+ML(2K+N)$	$2NT+ML(2K+N)$
Restrições	$T[L(2K+1)+N]$	$T[L(2KM+1)+N+1]$	$T[L(2KM+1)+N]$

Fonte: Autor.

Verifica-se na Tabela 3 um aumento de variáveis e restrições nos modelos com múltiplos fornos. Esses valores já eram esperados devido o acréscimo do índice M que determina o forno utilizado. Outro ponto é a similaridade na quantidade de variáveis entre os modelos de múltiplos fornos e uma pequena diferença na quantidade de restrições no modelo MFA1 devido a não utilização de períodos com micro-períodos variáveis.

Testes computacionais foram realizados para encontrar o melhor desempenho dos modelos utilizando pacotes comerciais de otimização (CPLEX versão 12.6.1). Todos os testes foram executados rodando as instâncias durante uma hora em um computador com processador Intel Core I3-5005U CPU 2GHz com 4 GB de memória RAM. Para cada modelo testado computacionalmente, foram utilizadas 19 instâncias encontradas na literatura. As instâncias nomeadas de 1 a 11 foram propostas por Tonaki (2006) e as instâncias de 12 a 19 aparecem no trabalho de Camargo e Navarenho (2016). O Quadro 2 demonstra as principais características das instâncias adotadas nos testes.

Quadro 2: Características das instâncias utilizadas.

Instância	Quantidade de Ligas	Quantidade de Itens	Períodos (dias)	Capacidade máxima de carga (em Kg)	Demanda em Kg	Origem	Característica
1	5	165	3	11400	13863,9	Tonaki (2006)	Itens atrasados das cinco ligas mais frequentes
2	5	165	5	19000	13863,9	Tonaki (2006)	Itens atrasados das cinco ligas mais frequentes
3	5	228	3	11400	20139,45	Tonaki (2006)	Todos os itens das cinco ligas mais frequentes
4	5	293	5	19000	24040,45	Tonaki (2006)	Todos os itens das cinco ligas mais frequentes
5	16	225	3	11400	17211,3	Tonaki (2006)	Considera todos os itens atrasados
6	16	225	5	19000	17211,3	Tonaki (2006)	Considera todos os itens atrasados
7	16	224	3	11400	15441,5	Tonaki (2006)	Considera aproximadamente 90% dos itens atrasados
8	16	224	5	19000	15441,5	Tonaki (2006)	Considera aproximadamente 90% dos itens atrasados
9	15	224	3	11400	13731,3	Tonaki (2006)	Considera aproximadamente 80% dos itens atrasados
10	15	224	5	19000	13731,3	Tonaki (2006)	Considera aproximadamente 80% dos itens atrasados
11	19	383	5	19000	29311,95	Tonaki (2006)	Carteira completa
12	19	150	5	19000	11990,05	Camargo e Navarenho (2016)	Itens sem atrasos e com até quatro dias de prazo para entrega
13	8	199	5	19000	18129,05	Camargo e Navarenho (2016)	Itens sem atrasos e com até quatro dias de prazo para entrega
14	8	283	5	19000	23442,95	Camargo e Navarenho (2016)	Itens sem atrasos e com até quatro dias de prazo para entrega
15	8	383	5	19000	29311,95	Camargo e Navarenho (2016)	Itens sem atrasos e com até quatro dias de prazo para entrega
16	19	199	5	19000	18129,05	Camargo e Navarenho (2016)	Itens sem atrasos e com até quatro dias de prazo para entrega
17	19	283	5	19000	23442,95	Camargo e Navarenho (2016)	Itens sem atrasos e com até quatro dias de prazo para entrega
18	19	383	5	19000	29311,95	Camargo e Navarenho (2016)	Itens sem atrasos e com até quatro dias de prazo para entrega
19	8	150	5	19000	11990,05	Camargo e Navarenho (2016)	Itens sem atrasos e com até quatro dias de prazo para entrega

Fonte: Autor.

Conforme mostrado no Quadro 2, instâncias de 1 a 11 tem uma grande quantidade de itens em atraso. Em paralelo, temos as instâncias 12 a 19 com itens sem atrasos.

Existe uma particularidade no cenário onde se trabalha com instâncias que iniciam com uma grande quantidade de itens em atraso que é a camuflagem dos custos de preparação dos fornos. Esses custos tornam-se pouco significativos quando comparados aos cenários mencionado. Porém, se considerar um horizonte de planejamento maior e com atualização constante dos itens em carteira, existe uma tendência em reduzir os atrasos e aumentar a participação do custo de preparação e de troca de fornos, fazendo com que essa decisão seja melhor analisada. Em outras palavras, na medida em que o atraso é reduzido, a troca de forno ou preparação do mesmo torna-se mais expressiva na tomada de decisão.

Ressalta-se que em cenários sem itens em atraso (instâncias de 12 a 19) ou mesmo quando o custo de atraso não seja tão expressivo, os custos de preparação passam a representar parcelas mais expressivas na função objetivo. É importante destacar que os custos de preparação e de estoques utilizados nesse trabalho são subjetivos, não representando com total fidelidade os custos da fundição. Reforça-se ainda que a empresa não conhece ou considera os custos diretos de atraso e estoque e a principal avaliação da empresa nesse sentido é o desgaste com o cliente devido ao atraso e a falta de espaço físico para estoques ou ainda o custo de quebra de contrato, quando existente.

No modelo que trabalha com tempo de fornos diferentes pode ocorrer o aumento de micro-períodos programados devido à possibilidade de usar mais vezes o forno com menor tempo de fusão. Nesses padrões, o modelo Toledo et al. (2014) adaptado foi calibrado com 0,8 e 1 fração de horas para cada forno e dez horas por período, o que gerou, em algumas instâncias, maior quantidade de micro-períodos. Essa situação pode representar uma vantagem quando o atraso é alto e o custo de preparação de fornos maiores é representativo.

A Tabela 2 apresenta os resultados das 19 instâncias rodadas nos modelos de fundição analisados anteriormente. São apresentados os resultados da Função Objetivo (FO) e o Gap da FO. Todos os testes consideram a capacidade de fusão de 140 Kg para fornos menores e 380 Kg para os fornos maiores. Esses valores de capacidade foram gerados de forma aleatória.

Tabela 2 – Resultados da Função Objetivo (FO e GAP) das instâncias 1 a 19.

Instâncias	Araújo, Arenales e Clarck (2004)		Toledo et al.(2014) adaptado		MFA1	
	FO	GAP	FO	GAP	FO	GAP
1	157232,75	0,58%	157226,25	0,72%	157126,45	0,53%
2	157665,05	0,79%	157630,85	1,04%	157423,75	0,74%
3	184048,91	0,55%	183823,48	0,64%	184195,73	0,74%
4	217345,70	2,30%	215936,65	1,66%	216087,85	1,71%
5	323053,10	1,20%	324733,60	2,04%	322834,70	1,07%
6	359734,40	2,43%	360682,40	3,34%	359862,80	2,62%
7	285478,80	1,16%	286306,00	1,91%	285289,65	1,14%
8	303727,10	2,30%	305724,25	3,65%	306131,10	3,08%
9	249764,20	1,36%	250603,25	2,13%	250399,60	1,70%
10	256588,40	3,69%	256301,55	4,07%	253281,00	2,35%
11	474126,54	2,05%	474534,26	2,99%	473743,84	2,01%
12	14153,66	17,53%	14420,44	33,57%	14311,06	26,71%
13	4072,48	50,34%	3985,69	68,50%	4279,21	69,63%
14	17571,65	40,21%	17349,11	41,09%	17079,04	40,68%
15	49001,19	10,84%	49837,66	12,44%	47187,44	7,50%
16	7153,50	18,90%	8484,10	48,78%	7102,19	25,38%
17	32148,50	4,74%	33626,69	14,11%	32440,18	6,23%
18	79796,05	6,44%	79128,32	10,80%	79299,69	6,70%
19	3666,13	17,81%	3309,70	31,60%	3241,13	27,07%

Fonte: autor.

Os valores FO e Gaps indicam os melhores resultados obtidos pela função objetivo considerando atrasos, estoques e preparação dos fornos.

Os resultados de Subutilização são apresentados na Tabela 3, em quilogramas e em percentual de Subutilização. A subutilização indica o volume de não preenchimento dos fornos e seu percentual. Na prática, a subutilização representa recursos extras de retrabalho, manutenção e energia. Mesmo não estando diretamente na função objetivo, a subutilização foi analisada por representar um impacto, mesmo que não dimensionado, ao processo.

Esse resultado é referente às ligas utilizadas que sobrarão no final da fornada ou espaço não utilizado do forno quando o mesmo é utilizado. O percentual da subutilização é definido pelo valor da soma de subutilização de cada fornada, em quilo, dividido pela soma do volume de todas as fornadas programadas. Destaca-se que a subutilização dos fornos não faz parte da função objetivo devido à empresa não conhecer os custos inerentes a esse fator.

Tabela 3 – Subutilização das instâncias 1 a 19.

Instâncias	Araújo, Arenales e Clarck (2004)		Toledo et al.(2014) adaptado		MFA1	
	Subutilização (kg / %)		Subutilização (kg / %)		Subutilização (kg / %)	
1	191,05	1,68%	191,60	1,68%	191,30	1,68%
2	956,10	6,45%	616,10	4,25%	716,10	4,91%
3	164,3	1,44%	163,60	1,44%	164,85	1,45%
4	452,85	2,38%	452,25	2,38%	453,00	2,38%
5	1019,90	8,94%	400,50	3,72%	779,60	6,99%
6	2039,45	10,73%	1798,35	9,59%	1799,45	9,59%
7	1018,90	8,94%	780,70	7,00%	780,40	6,99%
8	3558,50	18,73%	1978,50	11,36%	1978,50	11,36%
9	1019,20	8,94%	778,25	6,97%	779,20	6,98%
10	5268,70	27,73%	2648,70	16,17%	2408,70	14,92%
11	1627,80	8,57%	1163,20	6,28%	1164,40	6,29%
12	6973,95	36,70%	2067,35	14,62%	2005,35	14,26%
13	2626,35	13,82%	1086,35	6,22%	1201,65	6,84%
14	42,80	0,23%	167,30	0,88%	44,90	0,24%
15	8,95	0,05%	4,50	0,02%	2786,85	15,05%
16	2826,65	14,88%	1946,00	10,79%	2106,65	11,52%
17	1343,75	7,07%	1030,65	5,57%	1343,15	7,07%
18	1341,60	7,06%	877,00	4,74%	879,20	4,75%
19	6906,95	40,39%	2366,95	18,85%	2966,95	22,55%

Fonte: autor.

Considerando os dados obtidos, a Tabela 4 foi gerada com os dados FO, Gap e Subutilização. Foi criado um critério de pontuação simples, comparando todas as instâncias de cada modelo, valorizando em “0” o melhor resultado e “1”, para o pior resultado. A Tabela 4 mostra de forma clara qual o melhor desempenho para cada instância. Foi definida uma escala de cores para facilitar a interpretação dos resultados onde a cor vermelha representa o pior cenário (mais próximo ao valor 1) e a cor verde, o melhor cenário entre a comparação (0). Para analisar a Tabela 6, destaca-se que o modelo de Araujo, Arenales e Clark (2004) trabalha com um único forno.

Tabela 4 – Classificação das Instâncias.

Instâncias	Araujo, Arenales e Clarck (2004)			Toledo et al.(2014) adaptado			MFA1		
	FO	Gap	Subutilização	FO	Gap	Subutilização	FO	Gap	Subutilização
1	1,00	0,26	0,00	0,94	1,00	1,00	0,00	0,00	0,45
2	1,00	0,17	1,00	0,86	1,00	0,00	0,00	0,00	0,29
3	0,61	0,00	0,56	0,00	0,47	0,00	1,00	1,00	1,00
4	1,00	1,00	0,80	0,00	0,00	0,00	0,11	0,08	1,00
5	0,12	0,13	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,61
6	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,14	0,21	0,00
7	0,19	0,03	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	1,00	0,83	1,00	0,00	1,00	0,58	0,00
9	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,76	0,44	0,00
10	1,00	0,78	1,00	0,91	1,00	0,08	0,00	0,00	0,00
11	0,48	0,04	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,01	0,59	0,57	0,00
13	0,30	0,00	1,00	0,00	0,94	0,00	1,00	1,00	0,07
14	1,00	0,00	0,00	0,55	1,00	1,00	0,00	0,53	0,02
15	0,68	0,68	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00
16	0,04	0,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,22	0,18
17	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,20	0,16	1,00
18	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	0,26	0,06	0,00
19	1,00	0,00	1,00	0,16	1,00	0,00	0,00	0,67	0,13
	0,50	0,16	0,81	0,70	0,92	0,11	0,27	0,29	0,30

Fonte: autor.

Analisando os critérios de forma independente, nota-se melhores resultados de FO para o modelo MFA1. Os menores Gaps são observados no modelo Araujo, Arenales e Clark (2004) para um único forno e para o MFA1 se considerar apenas os modelos com múltiplos fornos. Mesmo não sendo um objetivo direto desse trabalho o valor de subutilização foi pontuado e comparado devido a importância do item para a fundição analisada. Para esse critério o modelo Toledo et al. (2014) retornou as menores subutilizações de fornos.

Conclui-se que o melhor resultado para a função objetivo foi obtido com a utilização do modelo MFA1. Verifica-se também um bom resultado da subutilização dos fornos para esse mesmo modelo.

6 Testes do modelo MFA1

A partir da definição do modelo a ser adotado e da coleta de dados de entrada para o modelo, foram gerados resultados e comparados com planos de produção construídos pela empresa. Esse capítulo apresentará os resultados dos testes para o modelo MFA1.

Esse trabalho trata da proposição de uma extensão e adaptação de um modelo já consolidado com o objetivo de auxiliar a tomada de decisão que influenciará diretamente o resultado de uma organização. Para verificar o resultado do modelo na prática, foram gerados planos de produção com o modelo a partir da carteira de pedidos da empresa e comparado com os planos de produção original. Para uma comparação ampla da proposta, dois cenários foram criados:

1 – Plano de produção tático com vinte e dois períodos e cinco micro-períodos (fornadas) cada, para verificação do atendimento à carteira de pedidos e a possibilidade de geração de um plano de requisição de matéria-prima e;

2 – Plano de produção operacional com cinco períodos e cinco micro-períodos (fornadas) para verificação da factibilidade do plano e ambos os planos foram comparados com o plano real gerado pela fundição.

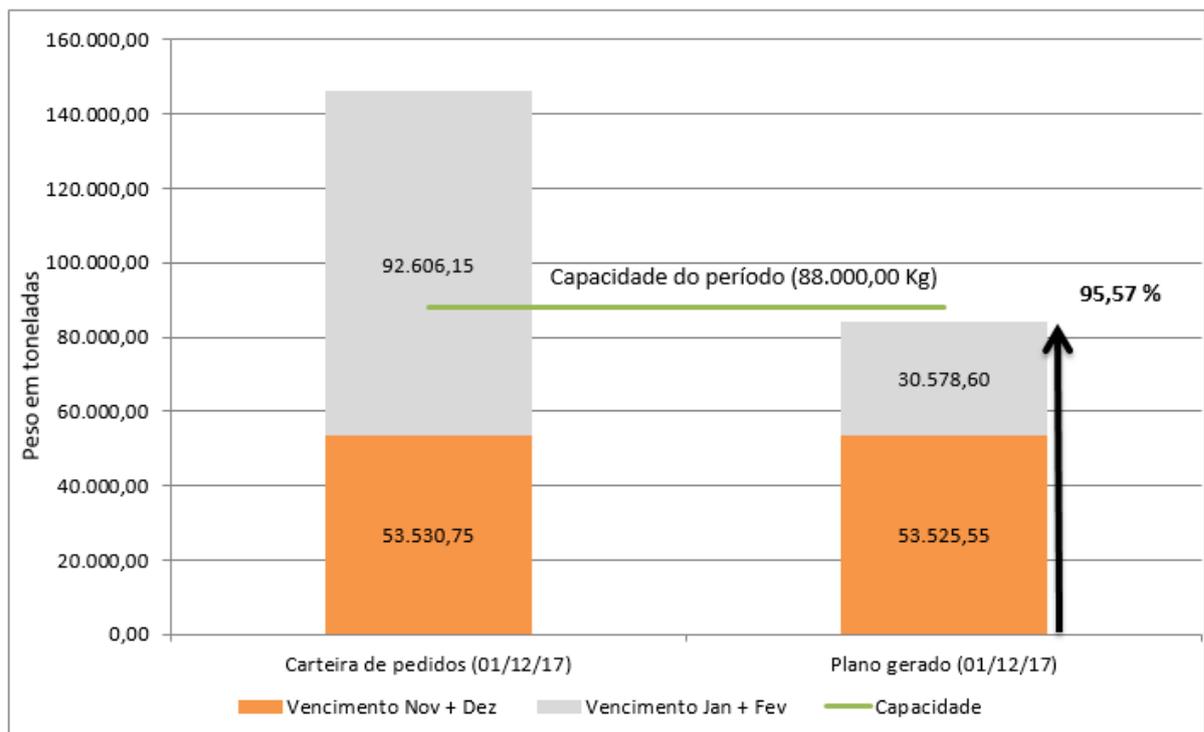
Ressalta-se que a fundição não visualiza o primeiro caso de forma antecipada e todo o plano de solicitação de material é feito com base em um horizonte menos preciso. Para efeito de comparação, foram levantados os planos operacionais da fundição durante um mês.

A carteira de pedidos utilizada para rodar o plano foi coletada a partir do *software* da empresa com todos os pedidos disponíveis no dia primeiro de dezembro de 2016. Para simplificar o entendimento, essa carteira será chamada de Instância teste e é composta por 214 itens, totalizando 146,1 toneladas de material a ser fundido. Desse volume, aproximadamente 19% estavam em atraso no início do planejamento (entrega prevista para novembro de 2016), aproximadamente 18% tinha data de entrega para dezembro de 2016 e o restante, 63% da Instância teste (ou aproximadamente 92 toneladas), eram entrega futura (vencimento a partir de janeiro de 2017). Destaca-se aqui as dificuldades na coleta das instâncias no primeiro

semestre de 2016, quando os dados eram levantados, em sua maioria, de forma manual devido inconsistência do *software* utilizado na época.

Verificou-se que o modelo, quando rodado com vinte e dois períodos (capacidade para o mês de dezembro de 2016), praticamente eliminou os atrasos e antecipou 33,02% da carteira de pedidos que previa entrega para janeiro e fevereiro. A antecipação visa reduzir a subutilização dos fornos (ocupação de 95,57 % para o período planejado) e é viável quando seus custos são baixos. O Gráfico 2 mostra o cenário traçado pelo plano se comparado com a carteira de pedidos disponíveis para dezembro de 2016. Destaca-se que foram planejados 99,99% dos itens atrasados, em peso. Os itens não planejados são quatro peças de 1,3 Kg que, devido ao baixo peso, ficou fora do plano tático.

Gráfico 2 – Comparativo carteira disponível x plano gerado pelo modelo em 22 períodos.

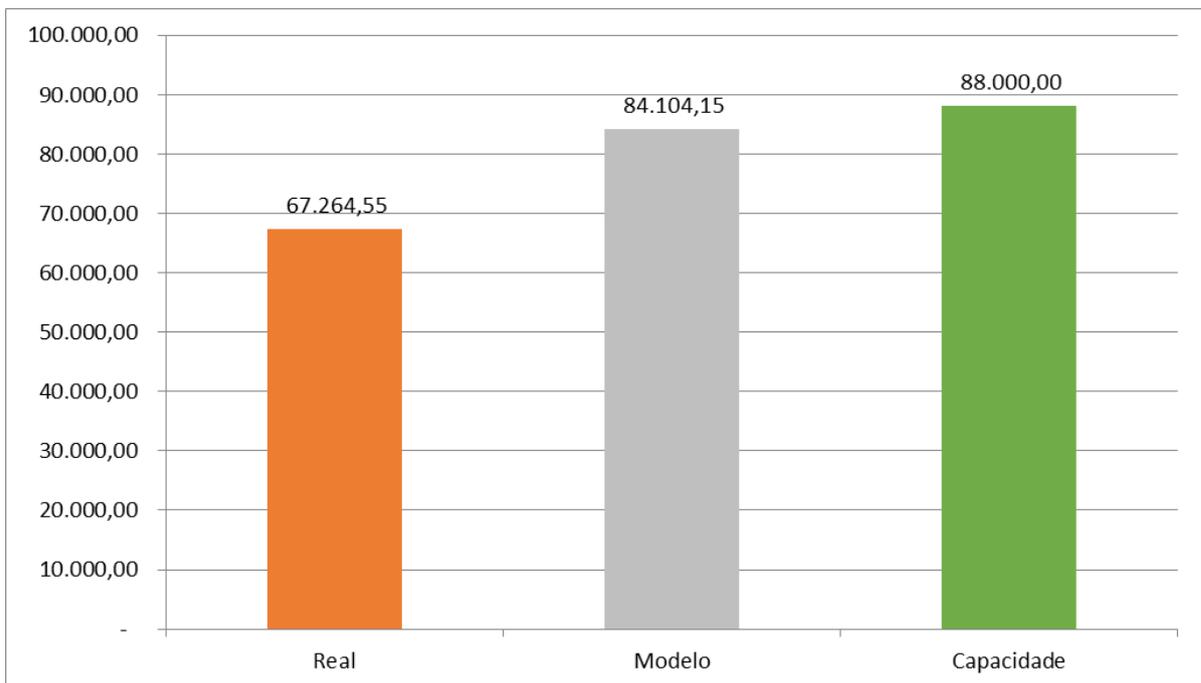


Fonte: autor.

O Gráfico 3 ilustra o plano tático gerado comparado à soma de todos os planos operacionais realizados pela fundição em dezembro de 2016. Foram considerados os mesmos vinte e dois períodos. Foi observado que o modelo MFA1 não gerou planos para o cadinho de 400 Kg, porém, durante o mês de dezembro de 2016, a fundição

realizou dois acionamentos do menor forno. Nota-se no Gráfico 3 uma programação 25,03% maior em volume de fundidos do que o realizado pela fundição. Esse volume representa itens em atraso melhor programados e antecipação de itens (conforme mostra o Gráfico 2). Esse cenário mostra a inviabilidade de utilizar o cadinho de menor capacidade em alguns casos e sinaliza que o custo de antecipação pode ser inferior ao custo de preparação do forno menor.

Gráfico 3 – Comparativo de utilização dos fornos mensal.



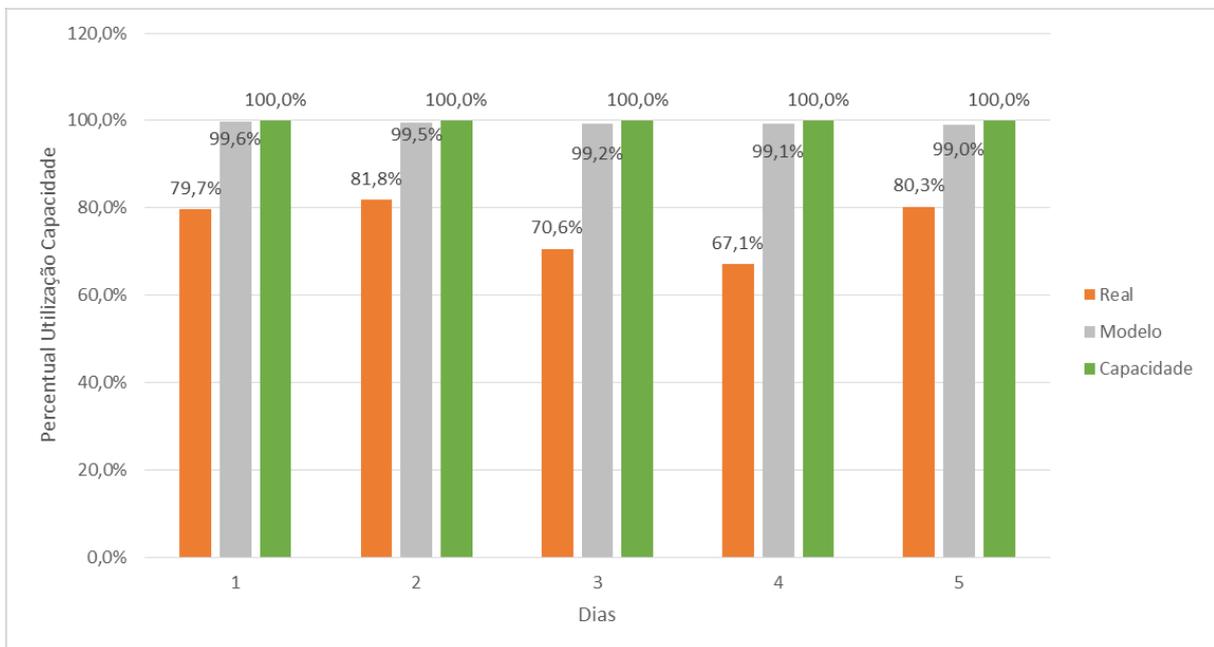
Fonte: autor.

Para análise prática da preparação foi considerada a mesma carteira de produtos (Instância teste). O Gráfico 4 compara a utilização dos fornos entre o plano de produção executado pela empresa na primeira semana de dezembro de 2016 e o proposto pelo modelo MFA1. Nota-se a utilização regular dos fornos (realizado) em torno de 75,9 % para a semana analisada enquanto o plano gerado pelo modelo MFA1 priorizou a antecipação de itens e atingiu uma média de 99,3% nos planos gerados como teste.

A diferença de utilização encontrada entre o plano com vinte e dois períodos demonstrada no Gráfico 3 (4,43%) e o plano operacional de cinco períodos, demonstrado no Gráfico 4 (0,7%) era esperada pois o modelo tende a reagrupar um

volume maior de itens em um período menor de planejamento justamente por reduzir os dias disponíveis para produção. Agrupando melhor os itens para produção, reduz-se a quantidade de fornada e a subutilização. Destaca-se que a comparação do plano operacional foi demonstrada apenas para a primeira semana de dezembro, enquanto o plano tático considerou o planejamento para o mês inteiro. Verificou-se nas demais instâncias coletadas que o comportamento do plano operacional gerado pelo modelo MFA1 e o plano real da empresa não sofreu alterações significativas em outros períodos. Esse fato se dá pelo baixo nível de alteração das características das carteiras de produção.

Gráfico 4 – Comparativo de utilização dos fornos para o plano operacional.



Fonte: autor.

Por último, foi verificado o atendimento de entrega de itens prioritários (maior atraso). Não houve divergências significativas quanto ao plano real e o plano gerado pelo modelo. Devido à penalização de itens em atraso pelo modelo MFA1 e o fato da empresa já praticar a priorização de itens em atraso, esperava-se resultados semelhantes.

Ambos os planos gerados (operacional e tático) entregam resultados importantes para a fundição. O plano operacional garante a melhor ocupação do forno com atualização constante da carteira de pedidos (semanalmente) enquanto o plano

tático permite aos tomadores de decisão visualizar situações de riscos e criar estratégias mais precisas.

Além dos dados expostos acima, destacam-se outros pontos observados a partir da coleta de dados e dos testes realizados e que servem de lições aprendidas para aprimorar o processo de planejamento da produção da fundição:

- Todos os planos gerados associaram as ligas de forma adequada. Destaca-se aqui, novamente, a dificuldades em coletar dados por inconsistência do *software* adotado pela empresa e a falta de padrão de cadastro de itens;
- Os planos gerados a partir do modelo apresentaram uma grande melhoria na utilização dos fornos. Mesmo não tratando esse item na função objetivo, tal resultado é visto como um importante fator para a tomada de decisão na fundição e está diretamente relacionado à preparação dos fornos e programação dos outros setores da empresa;
- O tempo para criar um plano de produção de cinco períodos ou vinte e dois períodos utilizando o modelo é inferior ao tempo atual para geração de um plano de produção para um único período. Ressalta-se que o tempo proposto é a soma do tempo de processamento do *software* (utilizado uma hora) e o tempo de preparo da base. Ambos os tempos podem ser reduzidos após aprimoramento na coleta de dados e com testes com tempos menores de processamento sem perdas significativas na qualidade da solução. Outro ponto acerca da coleta de dados, é o fato de poder personalizar o *software* utilizado para a empresa para gerar bases prontas, a partir da carteira de pedido disponível;
- O conhecimento dos custos de produção é um fator importante para melhorar a utilização do modelo. Dessa forma, consegue-se utilizar o modelo MFA1 em sua plenitude, conhecendo os custos de cada fornada de produção e aprimorando os planos gerados.

7 Validação do modelo MFA1

Os custos de estoque, de atraso e de preparação de fornos (subjetivos) foram utilizados para definição do melhor modelo a ser aplicado. A adoção desses parâmetros serviu para gerar um plano factível e direcionará os responsáveis pela empresa para uma correta calibração desses custos e melhorar, dessa forma, o plano gerado atualmente. Mesmo não utilizando esses parâmetros para a validação, sabe-se que os mesmos são os responsáveis pelo agrupamento de itens e sequenciamento das ligas para produção.

Após definição do modelo, foram simuladas rodadas de programação com dados reais da fundição e, na sequência, a validação do modelo. Fachini (2015) define validação de um modelo como a confirmação da representatividade do cenário real pelo modelo. O autor cita a comparação entre o resultado do modelo e o obtido pela empresa, coletado em dados históricos, como uma forma eficaz de validação. Entretanto, tal método é altamente influenciado pela qualidade dos parâmetros definidos e dados de entrada do modelo.

Devido ao não conhecimento de alguns parâmetros da fundição analisada, torna-se necessário o uso de métodos consolidados de validação de problemas de Pesquisa Operacional para garantir a utilização do modelo pelos méritos e de forma imparcial. Oral e Kettani (1993) apresentam uma estrutura de validação de modelos de Pesquisa Operacional em forma de tetraedro com suas facetas e vértices. Os quatro vértices, considerados pelos autores como estágios da validação de um modelo e que caracterizam um problema de Pesquisa Operacional, são: situação gerencial, modelo conceitual, modelo formal e decisão.

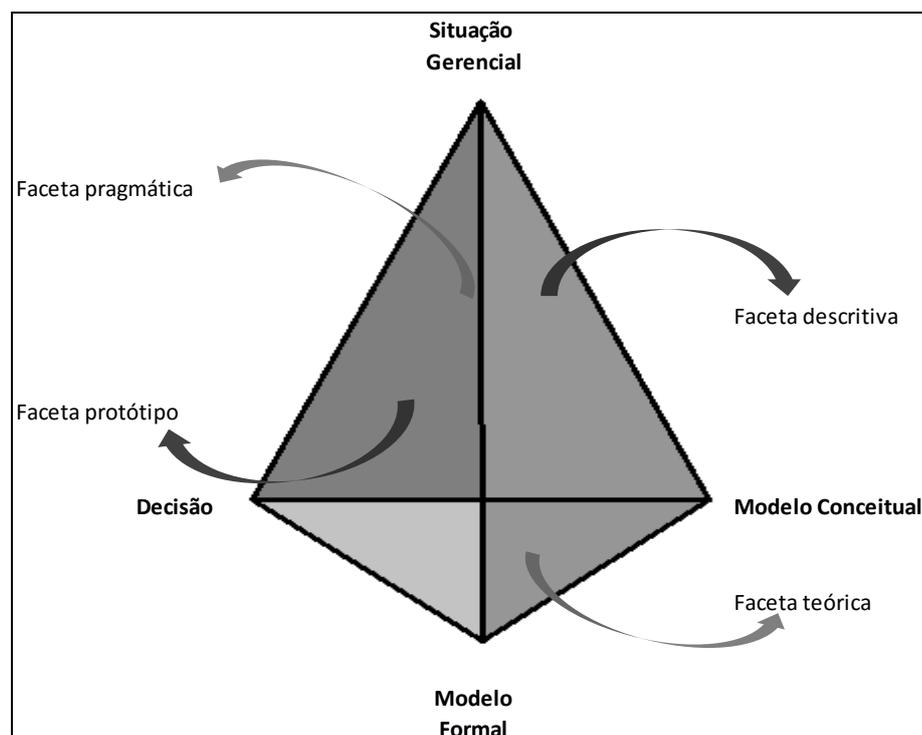
Ainda segundo Oral e Kettani (1993), a maioria dos problemas de Pesquisa Operacional pode ser caracterizada com apenas três dos quatro vértices citados, formando uma das facetas abaixo:

- Faceta descritiva: os vértices base dessa faceta são o Situação gerencial, Modelo conceitual e o Modelo formal. O foco dos problemas de pesquisa operacional que aqui se encaixam é o entendimento do sistema ou a situação gerencial ao qual ele está inserido. O foco, nesse momento, não é uma solução ou decisão para resolução de um problema;

- Faceta teórica: formada pelos estágios Modelo conceitual, Modelo formal e Decisão, essa faceta busca a construção de um modelo formal e métodos de solução que representam com fidelidade o modelo teórico. Não necessariamente o problema ao qual se busca uma solução parte de uma situação gerencial;
- Faceta pragmática: problemas onde a formalização do modelo é complexa e pode não representar de forma satisfatória o modelo conceitual, se encaixam na Faceta teórica. Resoluções pragmáticas com informações e conhecimentos de especialistas e da equipe podem retornar resultados mais satisfatórios que um modelo formal aqui expresso;
- Faceta protótipo: nessa faceta o vértice “Modelo conceitual” fica em segundo plano devido tratar com modelos já conhecidos e consolidados. O foco dessa faceta é aplicar um modelo formal para auxiliar na tomada de decisão para resolução de uma situação gerencial.

A Figura 3 demonstra o tetraedro formado pelos vértices e facetas expostos acima:

Figura 3 – Tetraedro de validação de problemas de Pesquisa Operacional.



Fonte: adaptado de Oral e Kettani (1993).

A validação de um modelo de Pesquisa Operacional, segundo proposto por Oral e Kettani (1993), segue algumas práticas de acordo com a faceta onde o problema se encaixa. Para cada faceta, Oral e Kettani (1993) sugerem as validações necessárias para a aceitabilidade do problema. O Quadro 3 apresenta os tipos de validações por facetas propostas pelos autores.

Quadro 3 – Facetas e Validações.

Validação \ Faceta	Faceta protótipo	Faceta pragmática	Faceta descritiva	Faceta teórica
Validação da formulação	x			
Validação da legitimação		x		
Validação da aptidão			x	
Validação verificacional				x
Validação experimental	x			x
Validação operacional	x	x		
Validação conceitual		x	x	
Validação lógica			x	x
Validação de dados	x	x	x	x

Fonte: adaptado de Oral e Kettani (1993).

Esse trabalho trata da proposição de um modelo já consolidado com o objetivo de auxiliar a tomada de decisão que influenciará diretamente o resultado de uma organização. Em acordo com as descrições prévias, o modelo proposto é um problema que se enquadra na Faceta protótipo. Com base no Quadro 3 definiu-se as etapas de validação, sugeridas por Oral e Kettani (1993) e aplicadas para a fundição analisada.

7.1 Validação da formulação

O modelo MFA1, conforme citado anteriormente, é uma extensão do modelo de Araujo, Arenales e Clark (2004) que, por sua vez, adapta o modelo GLSP apresentado por Fleischmann e Meyr (1997). Modelos esses publicados e difundidos

em trabalhos com resultados consolidados, inclusive em planejamento de fundições de pequeno porte, e permitindo com segurança a validação da formulação.

As adaptações do modelo MFA1 não alteram a estrutura do modelo, corroborando para a garantia da validade do modelo.

7.2 Validação de dados

Foi crucial para o sucesso desse trabalho a geração de soluções de planejamento que podem ser aplicadas na prática mesmo que essas não garantam o melhor resultado possível. Para obter soluções reais foi necessário garantir a entrada com dados reais da fundição. Todos os dados utilizados foram gerados a partir de pedidos reais consolidados pelo PCP da empresa e que compuseram a carteira de pedidos da empresa nos momentos das coletas e sem alteração de informação.

Além dos dados de entrada, foram validados os parâmetros do processo que interferem no modelo formal proposto para garantir a menor interferência por incoerência de parâmetros. Os parâmetros adotados na literatura foram aceitos pelos envolvidos na etapa de planejamento e utilizados devido à falta de conhecimento real dos custos de estoque, atraso e preparação.

Dessa forma, tornam-se válidos os dados e parâmetros utilizados, uma vez que os dados são os utilizados pela empresa sem qualquer modificação e os parâmetros foram aceitos até a apuração dos custos reais da fundição.

7.3 Validação experimental

Para essa etapa de validação, foram considerados os planos gerados a partir do modelo MFA1 com entradas reais (carteira de pedido da fundição), o plano de produção gerado e realizado pela empresa no método atual e um questionário de verificação. A comparação dos dois planos foi a base dessa validação, juntamente com questionário aplicado aos responsáveis pelo PCP e pela produção da empresa. A qualidade da solução obtida pelo modelo e a percepção dos usuários validam o experimento. Oral e Kettani (1993) citam atributos com foco na qualidade da solução, tipos e natureza da solução e a eficiência dos procedimentos de solução. Entretanto, tipos, natureza e eficiência dos procedimentos de solução foram considerados válidos por se tratar, novamente, de um modelo já validado.

Dessa forma, o questionário para validação experimental foca os critérios de qualidade expostos por Oral e Kettani (1993). São eles: nível de percepção obtida após conhecimento do modelo, nível de sensibilidade para mudança dos parâmetros do modelo, nível de aceitabilidade, nível de aplicabilidade e nível de utilidade do resultado gerado.

Para medir a qualidade do modelo, foi aplicado o Questionário 1 (Anexo I) ao responsável pelo planejamento da produção (nível técnico), ao responsável pelo departamento técnico (Engenheiro mecânico) e ao estagiário de planejamento (Engenheiro mecânico). Essa é a equipe responsável por todo o planejamento da produção. As questões aplicadas e as pontuações são consolidadas no Anexo III.

Algumas barreiras foram encontradas para a validação dessa etapa onde destacamos, novamente, a subjetividade dos parâmetros utilizados e seu impacto como entrada para o modelo. Porém, as pessoas envolvidas no processo de validação consentem que os parâmetros propostos pela literatura (custo de estoque e atraso) auxiliam na tomada de decisão e podem ser utilizados até o levantamento real dos custos da fundição. Superada essa barreira, o questionário de Validação experimental (Questionário I) atingiu pontuação máxima para todos os entrevistados.

Ressalta-se novamente que os custos de estoque, atraso e preparação não desqualificam essa validação do modelo. Como destacado anteriormente, esses parâmetros serviram como base para identificar o modelo a ser utilizado (MFA1).

Dessa forma, valida-se o modelo formal para a fundição.

7.4 Validação operacional

Diferente da validação experimental, a validação operacional baseia-se em cinco principais atributos relacionados principalmente com a capacidade de execução do modelo formal e seu impacto na operação (ORAL E KETTANI, 1993). São eles: usabilidade do modelo formal, a real utilidade do modelo formal, tempo de obtenção da solução, a sinergia do resultado com as decisões prévias e ao custo de implementação do modelo na prática.

A validação dessa etapa é a maior barreira encontrada principalmente pelo custo envolvido na implementação de um PCP com uma ferramenta de otimização. Para essa etapa foi desenvolvido um questionário, Questionário II (Anexo II), para validação (aplicado aos responsáveis pelo planejamento) e realizado comparações

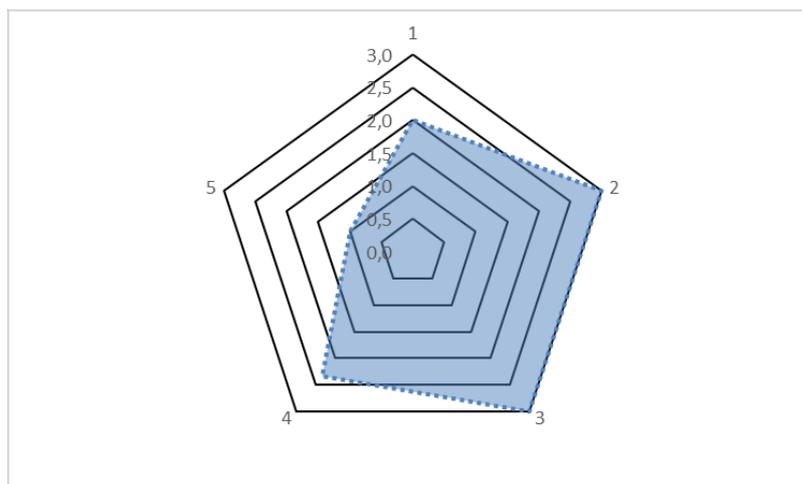
entre os planos de produção real e o gerado pelo modelo. O questionário foca as questões destacadas por Oral e Kettani (1993) e objetiva captar a percepção dos usuários.

O plano utilizado para validação foi o mesmo plano gerado para os testes e originados pela Instância teste. O resultado do plano foi satisfatório e atende as necessidades da companhia. Ressalta-se que foram identificados alguns pontos com necessidade de reajuste devido a informações incompletas no cadastro de produtos e ligas no *software* que gerou a base.

Além do plano proposto, foi aplicado o Questionário II (Anexo II) para os envolvidos no planejamento e execução do plano de produção.

O Gráfico 5 reporta a pontuação consolidada do Questionário II. Os vértices do pentágono representam as questões do Questionário II.

Gráfico 5 – Resultado do questionário de Validação operacional.



Fonte: autor.

O ponto de maior destaque no questionário refere-se ao custo de implantação de um pacote comercial (questão 5). Como alternativa, sugere-se a utilização de heurísticas já consolidadas na literatura ou a utilização de pacotes menos robustos e viáveis financeiramente.

A questão 1 surge com observações quanto a operacionalização do modelo para gerar planos de produção no dia-a-dia. Porém, é consenso dos integrantes da equipe que gerando bases padrões e capacitando a equipe, a dificuldade de geração do plano é superada.

Por último, as barreiras sinalizadas na questão 4 são referentes à possibilidade de intercorrência de uma quantidade elevada de itens planejados em um único micro-período (fornada), conforme dito anteriormente. Porém, não inviabiliza a utilização do modelo na prática devido ser eventos isolados e podendo ser programado de forma manual itens com grande quantidade de peças.

8 Considerações finais

O problema de planejamento de itens e sequenciamentos de ligas para fundição de mercado é levantado para preencher uma lacuna na literatura de fundições de mercado. O modelo proposto prevê plano de produção para uma fundição que trabalha com a possibilidade de alternar os cadinhos de um forno. Os objetivos desse trabalho são propor, testar e validar um modelo matemático que retornará planos de produção para a empresa analisada.

A limitação do planejamento da produção com dois dias de antecedência é o mínimo aceitável para que a programação siga sem maiores interferências. Ampliar essa capacidade de planejamento, certamente, reduzirá os riscos de falta de molde e atraso ou subutilização dos fornos e fornecerá informações importantes aos responsáveis por suprimentos e comunicação com os clientes, além de prever o faturamento do período. Outra vantagem de visualizar o horizonte de planejamento acima dos dois dias é a eliminação da ociosidade da equipe do setor de macharia e confecção de molde.

Devido à possibilidade de ocorrência de aumento da demanda repentinamente, entende-se como interessante uma extensão do modelo para o planejamento de utilização dos fornos de forma simultânea. Essa situação exige análise dedicada, devido ao aumento na demanda de energia contratada e, conseqüentemente, o aumento do custo de preparação. Essa alternativa é válida para reduzir atraso na carteira de pedidos ou aumentar a capacidade produtiva sem grande investimento em bens de capital.

Os modelos estudados e propostos consideram múltiplos fornos e são uma adaptação dos modelos usualmente abordados na literatura para o planejamento da produção de um forno em fundições.

Os resultados obtidos em testes direcionaram o modelo MFA1 como protótipo no planejamento da produção da fundição analisada. Os planos operacionais gerados pelo modelo se mostraram satisfatórios, sendo planos concisos, considerando toda a carteira de produção e mostrando um planejamento com melhor utilização dos fornos. Além do plano operacional, a geração de planos táticos auxilia na tomada de decisão a nível gerencial e à melhor utilização da capacidade instalada.

A partir da validação do modelo, sugere-se como próximos passos, o levantamento preciso dos custos contidos na função objetivo e demais custos de operação. Dessa forma, aumenta-se a confiabilidade nos planos de produção gerados pelo modelo. Outra evolução para a aplicação do modelo é a inclusão de restrições para regular a quantidade de itens a serem produzidos por fornada. Esse ponto foi levantado durante o questionário e pode ser um limitante devido a capacidade de produção de caixas.

Como evolução desse trabalho, visualiza-se a extensão do modelo para múltiplos níveis, considerando o planejamento da fundição de forma integrada aos demais setores produtivos (Macharia e confecção de moldes e Acabamento, por exemplo). Essa visão possibilita a otimização do resultado operacional com uma visão mais ampla.

Os desafios desse trabalho, em linha com os interesses da empresa analisada, foram atendidos parcialmente. Foram apresentados e validados os planos de produção operacional e tático factíveis e com desempenho na utilização dos fornos significativamente melhores aos realizados pela empresa. O modelo apresentado foi validado, porém, não implantado devido os custos inerentes de aquisição do software de otimização.

A implantação de um software de otimização não é viável para a fundição analisada do ponto de vista financeiro. Essa questão foi apontada no Questionário II e sinaliza a necessidade de se criar alternativas para a geração dos planos com custos mais acessíveis. Como trabalho futuro, estimula-se o desenvolvimento de heurísticas que propiciem resultados satisfatórios a custos acessíveis e que integram à base gerada pelo software de gestão adotado pela empresa.

9 Referências bibliográficas

ABIFA. **Relatório anual**. 2014. Disponível em: <<http://www.abifa.com.br>>.

ABIFA. **Relatório anual**. 2015. Disponível em: <<http://www.abifa.com.br>>.

ABIFA. **Relatório anual**. 2016. Disponível em: <<http://www.abifa.com.br>>.

Almeder, C.; Almada-Lobo, B. Synchronization of Scarce Resources for a Parallel Machine Lotsizing Problem. **International Journal of Production Research**, v. 49, 2011.

Araujo, S. A. **Modelos e métodos para o planejamento e programação da produção aplicados no setor de fundições**. 2003. 143 f. Tese de doutorado em Ciências – Ciências de computação e matemática computacional. Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

Araujo, S. A.; Arenales, M. N. Dimensionamento de lotes e programação do forno numa fundição automatizada de porte médio. **Pesquisa Operacional**, v. 23, p. 403-420, 2003.

Araujo, S. A.; Arenales, M. N. Planejamento e Programação da Produção numa Fundição Cativa Automatizada de Grande Porte. **Investigação Operacional**, v. 24, p. 197-210, 2004.

Araujo, S. A.; Arenales, M. N.; Clark, A. R. Dimensionamento de lotes e programação do forno numa fundição de pequeno porte. **Gestão e Produção**. São Carlos, v.11, p.1-20, 2004.

Araujo, S. A.; Arenales, M. N.; Clark, A. R. Lot Sizing and furnace scheduling in small foundries. **Computers & Operations Research**, v. 35, p. 916-932, 2008.

Arenales, M.; Armentano, V.; Morabito, R.; Yanasse, H. **Pesquisa Operacional** para cursos de engenharia. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007. 564 p.

Brahimi, N.; Dauzere-Peres, S.; Najid, N. M.; Nordli, A. Single item lot sizing problems. **European Journal of Operational Research**, v. 168, p. 1-16, 2006.

Camargo, V. C. B.; Mattioli, L.; Toledo, F. M. B. A knapsack problem as a tool to solve the production planning problem in small foundries. **Computers and Operations Research**. Karlsruhe: Elsevier, v.39, p.86-92, 2012.

Camargo, V. C. B.; Navarenho, D. Dimensionamento de lotes em fundições com múltiplos fornos não-simultâneos. In: XLVIII **SBPO Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, 2016, Vitória.

Camargo, V. C. B.; Toledo, F. M. B.; Almada-Lobo, B. Three time-based scale formulations for the two-stages lot sizing and scheduling in process industries. **Journal of the Operational Research Society**, v. 63, p. 1613-1630, 2012.

Camargo, V. C. B. **Optimization of processes in textile industry: models and solution methods**. 2012. 119 f. Tese de doutorado em Ciências Matemáticas e de Computação. Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

Camargo, V. C. B. **Um algoritmo evolutivo para o problema de dimensionamento de lotes em fundições de mercado**. 2009. 65 f. Dissertação de mestrado em Ciências – Ciências de computação e matemática computacional. Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

CIMM. **Centro de Informação Metal Mecânica**. Disponível em: <<http://www.cimm.com.br/portal/verbetes/exibir/459-fundicao>>. Acesso em 05/04/2015.

Drexl, A.; Kimms, A. Lot sizing and scheduling - Survey and extensions. **European Journal of Operational Research**, v. 99, p. 221-235, 1997.

Duda, J.; Stawowy, A. Production Scheduling under Fuzziness for the Furnace - Casting Line System. **Archives of Foundry Engineering**, v. 15, p. 29-32, 2015.

Duda, J. Lot-sizing in a Foundry Using Genetic Algorithm and Repair Functions. In: Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization, Lecture Notes in Computer Science. [S.l.]: **Springer**, 2005. p. 101-111.

Fachini, R. F. **Métodos quantitativos para o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes na indústria de embalagens de vidro**. 2015. 231 f. Dissertação de mestrado em Engenharia de Produção – Escola de engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

Fernandes, F. C. F.; Leite, R. B. Automação industrial e sistemas informatizados de gestão da produção em fundições de mercado. **Gestão e Produção**. São Carlos, v.9, p.313-344, 2002.

Ferreira, D.; Morabito, R.; e Rangel, M. S. Dois modelos do tipo big bucket para o dimensionamento e o sequenciamento da produção de bebidas, Anais XXVIII **Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional CNMAC**, São Paulo, Setembro, 2005.

Fleischmann, B.; Meyr, H. The general lotsizing and scheduling problem. **OR Spektrum**, v. 19, p. 11-21, 1997.

Furtado, M. G. S. **O planejamento da produção de pedidos em fundições de pequeno porte**. 2012. 71 f. Dissertação de mestrado em Ciências – Ciências de computação e matemática computacional. Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

James, R. J. W.; Almada-Lobo, B. Single and parallel machine capacited lotsizing and scheduling: Nom interactive MIP-based neighborhood search heuristics. **Computers & Operations Research**, v. 38, p. 1816-1825, 2011.

Landmann, R.; Erdmann, R. H. Uma abordagem heurística para a programação da produção na indústria de fundição com utilização da lógica fuzzy. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 18, p. 119-130, 2011.

Oral, M.; Kettani, O. The facets of the modeling and validation process in operations research. **European Journal of Operational Research**, v. 66, p. 216-234, 1993.

Santos-Meza, E.; Santos, M. O.; Arenales, M. N. A lot-sizing problem in an automated foundry. **European Journal of Operational Research**, v. 139, p. 490-500, 2002.

Silva, R. J.; Morabito, R. Otimização da programação de cargas de forno em uma fábrica de fundição em aço-inox. **Gestão e Produção**. São Carlos, v. 11, p. 135-151, 2004.

Staggemeier, A. T.; Clark, A. R. A survey of lot-sizing and scheduling models. **23rd Annual Symposium of the Brazilian Operational Research Society**, Campos do Jordão, November 2001.

Stawowy, A.; Duda, J. Production Scheduling for the Furnace - Casting Line System. **Archives of Foundry Engineering**, v. 13, p. 84-87, 2013.

Teixeira Junior, R. F.; Fernandes, F. C. F.; Pereira, N. A. Binary integer programming formulations for sch (Fleischmann & Meyr, 1997)eduling in market-driven foundries. **Computers & Industrial Engineering**, v. 59, p. 425-435, 2010.

Toledo, F. M. B.; Camargo, V. C. B.; Oliveira, M. P. B.; Tonaki, V. S. Dimensionamento de lotes em fundições de pequeno porte. **CNMAI Congresso**

Nacional de Matemática Aplicada à Indústria, Caldas Novas, 18 a 21 novembro 2014.

Tonaki, V. S. **Uma heurística para o problema de dimensionamento de lotes em fundições de mercado**. 2006. 103 f. Dissertação de mestrado em Ciências – Ciências de computação e matemática computacional. Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

Tonaki, V. S.; Toledo, F. M. B. An approach for solving the lot-sizing problem of market-driven foundry. **Journal of the Operational Research Society**, v. 61, p. 108-114, 2010.

Anexo I – Questionário de Validação experimental.

Questionário I - Validação experimental		
Cargo:		
Principais Funções:		
Tempo na função:		
Escolaridade:		
Pontuação:	1 Não concordo 2 Concordo com restrições 3 Concordo plenamente	
1 - Você concorda que o uso de modelo proposto promove uma melhor percepção do impacto do planejamento da produção?		
Nota: 1, 2,3 ?		Justificativa:
2 - Você considera que a alteração de parâmetros no modelo pode representar a realidade operacional (ou distanciar da realidade) ?		
Nota: 1, 2,3 ?		Justificativa:
3 - O modelo apresentado pode ser utilizado para dimensionar e sequenciar os itens e formular os planos de produção?		
Nota: 1, 2,3 ?		Justificativa:
4 - O modelo apresenta de forma fiel o problema de dimensionamento e planejamento da produção?		
Nota: 1, 2,3 ?		Justificativa:
5 - O resultado gerado é útil e pode contribuir, de alguma forma, para o planejamento dos planos de produção?		
Nota: 1, 2,3 ?		Justificativa:

Fonte: autor.

Anexo II – Questionário de Validação operacional.

Questionário II - Validação operacional		
Cargo:		
Principais Funções:		
Tempo na função:		
Escolaridade:		
Pontuação:	1 Não concordo 2 Concordo com restrições 3 Concordo plenamente	
1 - Você considera a operacionalização do modelo simples?		
Nota: 1, 2,3 ?		Justificativa:
2 - O modelo é útil para a formulação de planos de produção em sinergia com as estratégias da empresa?		
Nota: 1, 2,3 ?		Justificativa:
3 - A entrada de dados e a execução do modelo apresenta uma solução em tempo hábil para utilização do plano de produção?		
Nota: 1, 2,3 ?		Justificativa:
4 - Os resultados obtidos estão em linha com as premissas e observações prévias ao planejamento da produção?		
Nota: 1, 2,3 ?		Justificativa:
5 - O custo para implementar um sistema otimizador está coerente com o resultado obtido e é tangível para a empresa?		
Nota: 1, 2,3 ?		Justificativa:

Fonte: autor.

Anexo III – Pontuação consolidada dos Questionários I e II.

Validação experimental					
Questões	1	2	3	4	5
Engenheiro Mecânico (estagiário)	3	3	3	3	3
Engenheiro Mecânico (dpto. Técnico)	3	3	3	3	3
Líder PCP	3	3	3	3	3
Média	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0

Validação operacional					
Questões	1	2	3	4	5
Engenheiro Mecânico (estagiário)	2	3	3	2	1
Engenheiro Mecânico (dpto. Técnico)	2	3	3	3	1
Líder PCP	2	3	3	2	1
Média	2,0	3,0	3,0	2,3	1,0

Fonte: autor.