

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO DE GESTÃO E ECONOMIA  
ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DA PRODUÇÃO

ADRIAN LUCAS LOS

**NIVELAMENTO DA PRODUÇÃO DENTRO DE UMA FUNDIÇÃO ATRAVÉS DO  
SEQUENCIAMENTO DE PRODUÇÃO E ANÁLISE DO MAPEAMENTO DO  
FLUXO DE VALOR**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2017

ADRIAN LUCAS LOS

**NIVELAMENTO DA PRODUÇÃO DENTRO DE UMA FUNDIÇÃO ATRAVÉS DO  
SEQUENCIAMENTO DE PRODUÇÃO E ANÁLISE DO MAPEAMENTO DO  
FLUXO DE VALOR**

Trabalho de Conclusão de Curso de  
Especialização apresentado como requisito  
parcial para a obtenção do título de Especialista  
em Engenharia da Produção.

Orientador: Prof. Tiago Weller M. Eng.

CURITIBA

2017

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **NIVELAMENTO DA PRODUÇÃO DENTRO DE UMA FUNDIÇÃO ATRAVÉS DO SEQUENCIAMENTO DE PRODUÇÃO E ANÁLISE DO MAPEAMENTO DO FLUXO DE VALOR**

Esta monografia foi apresentada no dia 04 de março de 2017, como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Engenharia da Produção – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato apresentou o trabalho para a Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após a deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. M.Sc. Tiago Weller.  
Orientador

---

Prof. M.Sc. Alexandre Dantas Pinheiro da Silva  
Banca

---

Prof. Dr. Paulo Daniel Batista de Sousa  
Banca

Visto da coordenação:

---

Prof. Dr. Paulo Daniel Batista de Sousa

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

## **AGRADECIMENTOS**

Para a realização deste trabalho contei com o apoio de pessoas e instituições que foram fundamentais para a execução deste trabalho e aos quais sou grato, em especial:

À WEG Equipamentos Elétricos por ter incentivado a realização deste curso, dando a oportunidade para ampliar meus conhecimentos contribuindo para meu desenvolvimento profissional.

À minha esposa e família que também incentivaram a realização deste curso aceitando os momentos perdidos de nossa convivência.

Ao meu colega de trabalho, Joarez Pintarelli Junior e com seus conhecimentos de programação, o qual auxiliou na operacionalização dos conceitos teóricos aqui explanados.

*“Não há futuro para uma nação onde as pessoas só reclamam  
e esperam que os outros resolvam seus problemas”*

*Autor desconhecido*

## RESUMO

LOS, Adrian Lucas. Nivelamento da produção dentro de uma fundição através do sequenciamento de produção e análise do mapeamento do fluxo de valor. 2016. 65 f. Monografia. (Especialização em Engenharia da Produção) – Departamento de Gestão e Economia - DAGEE, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

O presente trabalho aborda o problema de programação e sequenciamento da produção em uma Fundição. Para a realização deste foi realizado um Mapeamento do Fluxo de Valor visando identificar pontos de melhoria para o processo como um todo, e quais ações são necessárias para eliminação de grandes desperdícios existentes no processo e caminhar rumo a um sistema de produção enxuto. O foco do trabalho foi no sequenciamento da produção entre as operações de Moldagem e Acabamento, e para isso foi utilizado um método para a análise da programação entre os dias e também o sequenciamento das ordens existentes em cada dia, visando o nivelamento da produção entre as etapas do processo, mas ainda obedecendo-se as restrições das demais etapas da cadeia. Utilizando-se de um algoritmo genético foram mensurados quais os ganhos potenciais na implementação das ferramentas desenvolvidas. Estas apresentaram ganhos significativos no nivelamento da produção reduzindo o desvio padrão na carga máquina programada entre os dias nas etapas do processo. Além disso, existem ganhos no nivelamento dentro do dia entre as etapas de Moldagem e Acabamento reduzindo oscilações na temperatura de vazamento e tamanho da fila de peças na operação de Acabamento, reduzindo o problema de saturação de peças no pulmão, criação de estoque intermediário, excesso de movimentações, perda do FIFO e atrasos de entrega.

**Palavras-chave:** Sequenciamento e Nivelamento da Produção. Fundição. Mapeamento de Fluxo de Valor.

## ABSTRACT

LOS, Adrian Lucas. Production leveling in a foundry using the production scheduling and value stream map analysis. 2016. 65 f. Monografia. (Especialização em Engenharia da Produção) – Departamento de Gestão e Economia - DAGEE, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

This study was made to analyze the problem of scheduling and sequencing of production in a foundry. To accomplish this, a Value Stream Mapping was performed aiming to identify improvement points for the whole process, and what actions are necessary to eliminate large wastes in the process and move towards a lean production system. The focus of the work was on the sequencing of the production between the Molding and Finishing operations, and for this a method was used to analyze the scheduling between the days and also the sequencing of the existing orders in each day, aiming the leveling of the production among the Stages of the process, but still obeying the constraints of the other stages of the foundry. Using a genetic algorithm, the potential gains in the implementation of the developed tools were measured. These tools developed showed significant gains in leveling of production by reducing the standard deviation in the machine load programmed between the days in the process steps. In addition, there are gains in day-to-day leveling between the Molding and Finishing steps, reducing fluctuations in casting temperature and the queue size in Finishing operation, reducing the problem of exceed the capacity of the buffer, creation of the intermediate stock, excess of movements, loss of the FIFO and delays in delivery.

**Keywords:** Production Scheduling and Leveling. Foundry. Value Stream Mapping.

## LISTRA DE EQUAÇÃO

Equação 1. Cálculo tempo de ciclo .....	29
Equação 2. Número de estágios.....	29
Equação 3. <i>Tack time</i> .....	30
Equação 4. Custo direto.....	32
Equação 5. Custo de preparação.....	32
Equação 6. Custo de manutenção .....	32
Equação 7. Custo total do estoque.....	32
Equação 8. Equação da função objetivo (sequenciamento dentro do dia).....	44
Equação 9. Equação de penalização por tempo de <i>setup</i> .....	45
Equação 10. Equação para penalização por fila no fim do dia no acabamento.....	45
Equação 11. Equação para penalização por variações de temperatura no forno.....	45
Equação 12. Equação para penalização por tempo de <i>setup</i> na moldagem.....	45
Equação 13. Equação para penalização por picos de fila no acabamento .....	45
Equação 14. Equação para penalização por desagrupamentos na moldagem .....	45
Equação 15. Equação da função objetivo (sequenciamento entre dias).....	48



## LISTRA DE FIGURAS

Figura 1. Produção mundial de fundidos em mil toneladas (base 2013).....	12
Figura 2. Desenho esquemático de uma Fundição (processo areia verde).....	14
Figura 3. Fluxograma genérico de uma fundição. ....	16
Figura 4. <i>Layout</i> esquemático do departamento.....	19
Figura 5. Layout esquemático da seção de acabamento em estudo.....	20
Figura 6. Estoque intermediário criado devido picos de demanda.....	21
Figura 7. Alteração do ponto de entrada e saída de matérias nos centros de trabalho. ....	21
Figura 8. Representação esquemática da área da Fusão.....	23
Figura 9. Exemplo de um MFV do estado Atual.....	25
Figura 10. Exemplo de um MFV do estado Futuro.....	25
Figura 11. Exemplo <i>layout</i> por produto ou em linha.....	26
Figura 12. Exemplo <i>layout</i> por processo.....	27
Figura 13. Exemplo <i>layout</i> celular.....	28
Figura 14. Exemplo de <i>layout</i> misto.....	28
Figura 15. Exemplo <i>layout</i> posicional.....	29
Figura 16. Destaque para o tempo ocioso entre estágios com diferença de tempos.....	30
Figura 17. Exemplo da aplicação do <i>heijunka</i> .....	35
Figura 18. Mapeamento do Fluxo de Valor do departamento em estudo – Estado Atual.....	40
Figura 19. Mapeamento do Fluxo de Valor do departamento em estudo – Estado Futuro 1. ...	42
Figura 20. Mapeamento do Fluxo de Valor do departamento em estudo – Estado Futuro 2. ...	43
Figura 21. <i>Layout</i> da planilha utilizada e informações disponíveis para o operador.....	47
Figura 22. Interface criada para analisar o sequenciamento entre dias.....	49

## LISTRA DE GRÁFICOS

Gráfico 3. Oscilação na carga máquina do acabamento.....	17
Gráfico 4. Variações de temperatura de vazamento ao longo do dia (Sequenciador x Critérios anteriores).....	50
Gráfico 5. Número de peças acumulado no acabamento (Sequenciador x Critérios anteriores).	51
Gráficos 6. Gráficos comparativos entre o desvio padrão entre o método atual (PCP) e o proposto ( <i>software</i> ) – MACHARIA.....	54
Gráficos 7. Gráficos comparativos entre o desvio padrão entre o método atual (PCP) e o proposto ( <i>software</i> ) – MOLDAGEM e ACABAMENTO.....	55
Gráfico 8. Balanceamento das linhas de rebarbação – Situação atual.....	57
Gráfico 9. Balanceamento das linhas de rebarbação – Situação proposta.....	58

## **LISTRA DE TABELAS**

Tabela 1. Expoentes utilizados na Equação 11.....	46
Tabela 2. Valor de penalização para cada data de ordem modificada.....	48
Tabela 3. Tabela comparativa da carga máquina entre os dias das semanas analisadas (PCP x <i>Software</i> ).....	53
Tabela 4. Resumo dos ganhos do trabalho. ....	59

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	DESCRIÇÃO DA EMPRESA	13
1.2	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	14
1.2.1	O processo de Fundição para Ferro Fundido Cinzento	14
1.2.2	Problema 1 – Programação entre dias	17
1.2.3	Problema 2 – Sequenciamento do dia	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
1.3	OBJETIVO GERAL	21
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	22
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>23</b>
2.1	PROCESSO DE FUNDIÇÃO	23
2.2	MAPEAMENTO DO FLUXO DE VALOR (MFV)	24
2.3	ARRANJOS FÍSICOS DE PRODUÇÃO	26
2.3.1	Arranjo físico por produto – Balanceamento	29
2.4	TIPOS DE DESPERDÍCIO	30
2.5	ESTOQUES	31
2.6	NIVELAMENTO DA PRODUÇÃO	33
2.6.1	<i>Heijunka</i>	34
2.7	SEQUENCIAMENTO DE PRODUÇÃO	35
2.8	FERRAMENTAS PARA RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO	36
2.8.1	Algoritmo genético	36
2.8.2	Solver Excel	37
2.9	LÓGICA <i>FUZZY</i>	38
<b>3</b>	<b>PROCECIMENTOS METODOLÓGICOS</b>	<b>39</b>
3.1	REVISÃO DOS OBJETIVOS	39
3.2	ETAPAS DO ESTUDO	39
3.3	MAPEAMENTO DO FLUXO DE VALOR (MFV)	39
3.4	TÉCNICAS PARA SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO	41
3.4.1	Sequenciamento dentro do dia	44
3.4.2	Sequenciamento entre dias	47
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE RESULTADOS</b>	<b>50</b>
4.1	SEQUENCIAMENTO DENTRO DO DIA	50
4.2	SEQUENCIAMENTO ENTRE DIAS	52
4.2.1	Avaliação na redução de mão de obra do acabamento após implantação do sequenciamento	56
4.3	RESUMO DOS GANHOS POTENCIAIS DO TRABALHO	59
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>60</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>63</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria de fundição possui um mercado amplo e diversificado. Existem variados tamanhos de unidades fabris e com diversas técnicas e processos diferentes implantados. A definição desses processos é feita a partir do tipo de peça, liga a ser utilizada e tamanho dos lotes a serem fabricados. Cada processo tem suas vantagens e desvantagens técnica, econômica e ambiental (EUROPEAN IPPC BUREAU, 2004).

1º	CHINA / CHINA	44.500,0
2º	EUA / USA	12.250,0
3º	ÍNDIA / INDIA	9.810,0
4º	JAPÃO / JAPAN	5.538,0
5º	ALEMANHA / GERMANY	5.186,7
6º	RÚSSIA / RUSSIA	4.100,0
7º	<b>BRASIL / BRAZIL</b>	<b>3.071,4</b>
8º	CORÉIA / KOREA	2.562,0
9º	ITÁLIA / ITALY	1.971,0
10º	FRANÇA / FRANCE	1.748,2

Figura 1 Produção mundial de fundidos em mil toneladas (base 2013).  
Fonte: Modern Casting, 2014 apud ABIFA (2015, p. 24).

Segundo ABIFA (2015), dados de 2014 mostram que a indústria de fundição no Brasil apresentou um faturamento de 8,4 bilhões de dólares e emprega aproximadamente 65.000 pessoas. Apresentou um crescimento contínuo, com exceção dos anos em que o mercado sofreu com uma crise interna (2014) ou externa (2009) (Gráfico 1). No ranking do mercado mundial, o Brasil ocupa o 7º lugar no *ranking* mundial dos produtores de fundidos, conforme Figura 1.

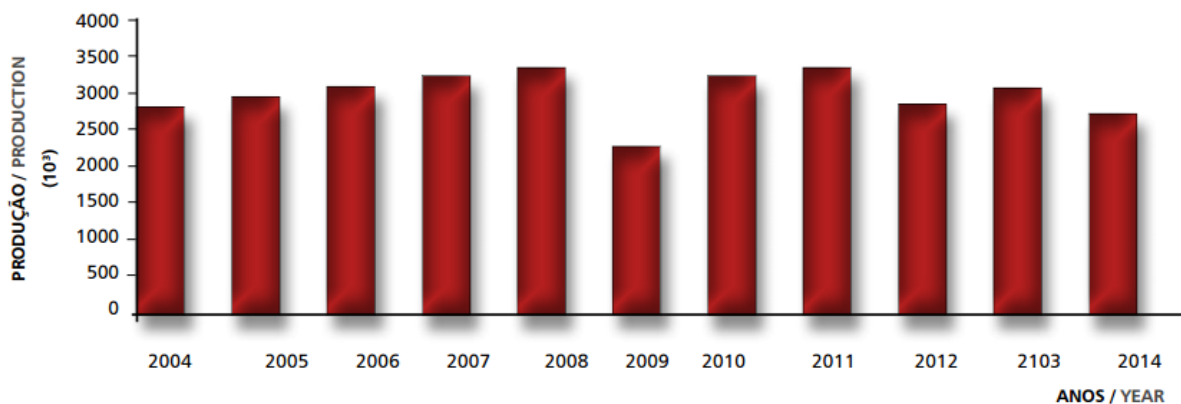


Gráfico 1. Produção Brasileira de fundidos.  
Fonte: ABIFA (2015, p. 24).

Os componentes fundidos no Brasil se distribuem pelos diferentes segmentos de mercado, sendo que 59% da produção destinam-se ao mercado automotivo, seguido do setor de Bens Capitais (16%) e infraestrutura (7%) (ABIFA, 2015).

representa a evolução na exportação de 2004 a 2014 (ABIFA, 2015). A exportação de componentes fundidos vem crescendo ao longo dos anos. Em 2014 apresentou um total de 1.216 mil toneladas, representando um valor maior que 1 bilhão de dólares.

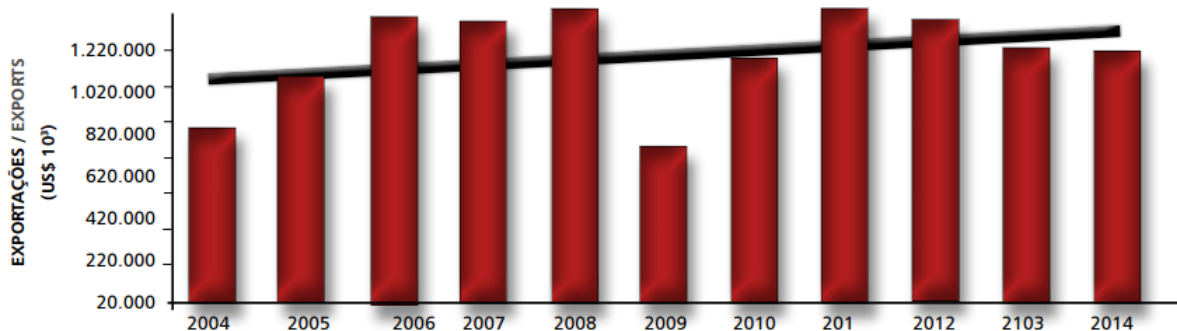


Gráfico 2. Gráfico das exportações.

Fonte: ABIFA (2015, p. 26).

Em geral as fundições trabalham com grandes lotes de produção, isto devido a complexidade dos processos envolvidos, como um sistema de areia e também a preparação da liga. Entretanto isto causa alguns desperdícios, como excesso de estoques, produção desbalanceada, dentre outros, parte dos quais serão abordados neste trabalho.

## 1.1 DESCRIÇÃO DA EMPRESA

A empresa em estudo possui sua sede no estado de Santa Catarina e é uma referência na produção de motores elétricos. Possui quatro fundições destinadas apenas a atender a produção interna, sendo elas denominadas: Metalúrgico I, Metalúrgico II, Metalúrgico III e Metalúrgico IV. As quatro fundições juntas possuem uma capacidade de produção de, aproximadamente, 160.000 ton. de ferro fundido cinzento por ano.

O Metalúrgico I é a primeira fundição construída pela empresa no ano de 1973, está situada em seu primeiro parque fabril, é uma fundição de pequeno porte com capacidade para produzir 1.500 ton. de ferro fundido por mês, possui três linhas de moldagem areia verde e uma macharia com duas sopradoras *cold box* fabricando, aproximadamente, 4.500 itens diferentes.

O Metalúrgico II, construído no ano de 1979, produz peças de 0,5 kg até 6 ton., operando com uma capacidade de produção de 3.000 ton. por mês. Possui cinco linhas de moldagem com

todos os processos por resina, tendo os processos *cold box* e cura a frio produzindo, aproximadamente, 3.400 itens diferentes. Os processos são bem manuais, com a característica que não possuem tempo de *setup*, possuindo capacidade de produzir itens seriados e também itens especiais, o que está dentro do ramo de negócio da empresa.

O Metalúrgico III construído no ano de 1992 e produz peças de 0,1 kg a 22 kg, com capacidade de produção de 2.700 ton. por mês, produzindo aproximadamente 1000 itens diferentes. Possui duas linhas de moldagem areia verde de alta produção e sem processo de macharia.

O Metalúrgico IV é o objeto de estudo neste trabalho. Foi construído no ano de 2010 e produz peças de 1,2 kg a 62 kg, com capacidade de produção de 6.300 ton. por mês. Possui duas linhas de moldagem areia verde de alta produção e uma macharia com três sopradoras *cold box*. Esta é uma fundição que foi concebida com um conceito para produção de peças mais seriadas, com lotes variando de 20 a 200 moldes e aproximadamente 270 itens diferentes, linhas bem automatizadas, com robôs e transportadores automáticos, visando a eliminação de operações manuais e evitar a movimentação de peças de forma manual (empilhadeiras e afins).

## 1.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O processo de fundição se divide basicamente nas seguintes etapas (EUROPEAN IPPC BUREAU, 2004):

- Fusão e tratamento do metal;
- Preparação dos moldes e machos (moldagem e macharia);
- Vazamento do metal no molde;
- Solidificação e resfriamento;
- Acabamento;

### 1.2.1 O processo de Fundição para Ferro Fundido Cinzento

Diversos fatores devem ser levados em consideração para a produção de uma peça de ferro fundido cinzento, dentre eles: tamanho da peça; complexidade da peça; qualidade superficial exigida; demanda de produção; tipo de moldagem; dentre outros. A Figura 2 ilustra basicamente o arranjo físico de uma fundição.

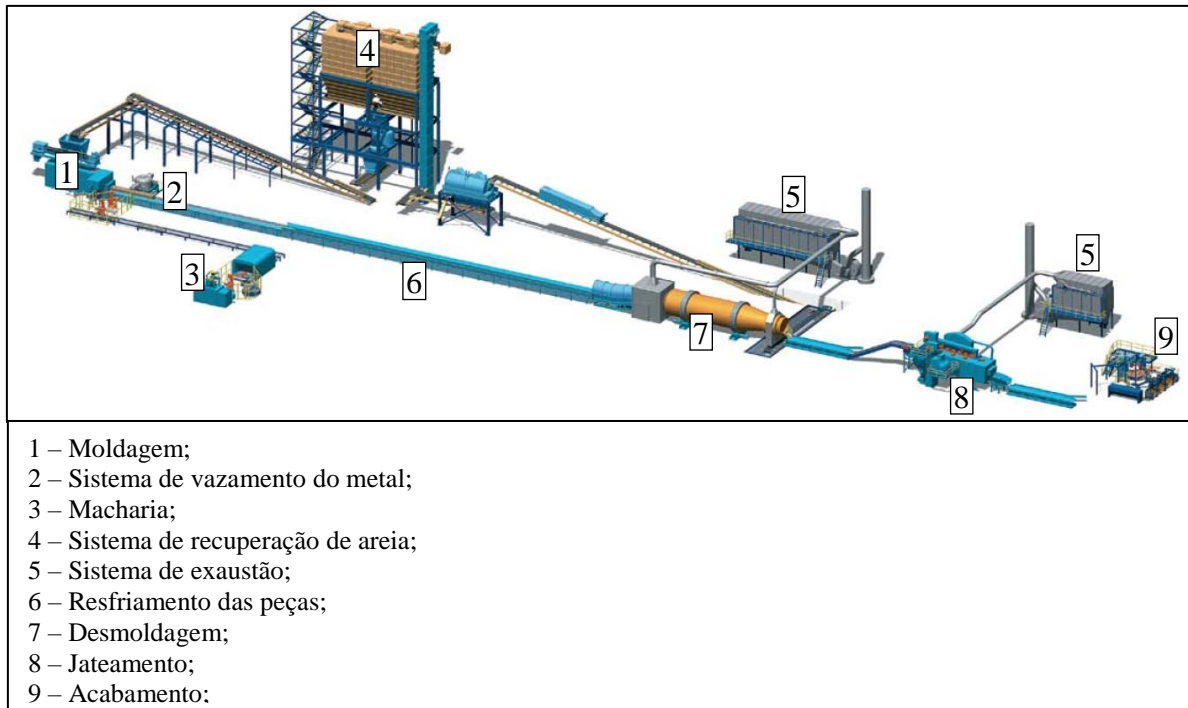


Figura 2. Desenho esquemático de uma Fundição (processo areia verde).

Fonte: Adaptado de DESENHO ESQUEMÁTICO DE UMA FUNDIÇÃO (2017).

Em um processo de fundição de Ferro Fundido Cinzento, cada etapa do processo possui suas restrições para a produção de peças com qualidade, como temperatura de vazamento, composição química, tempo de resfriamento, tipo de peça, dentre outros. (AMERICAN FOUNDRY SOCIETY, 2013). Por exemplo, conforme o perfil da peça há uma determinada temperatura ideal para seu vazamento, a qual pode ser muito diferente da peça que será produzida na sequência, então um bom sequenciamento minimiza este impacto, e em geral trabalha-se com grandes lotes para evitar a necessidade de mudanças em todo o sistema em con da mudança de uma peça.



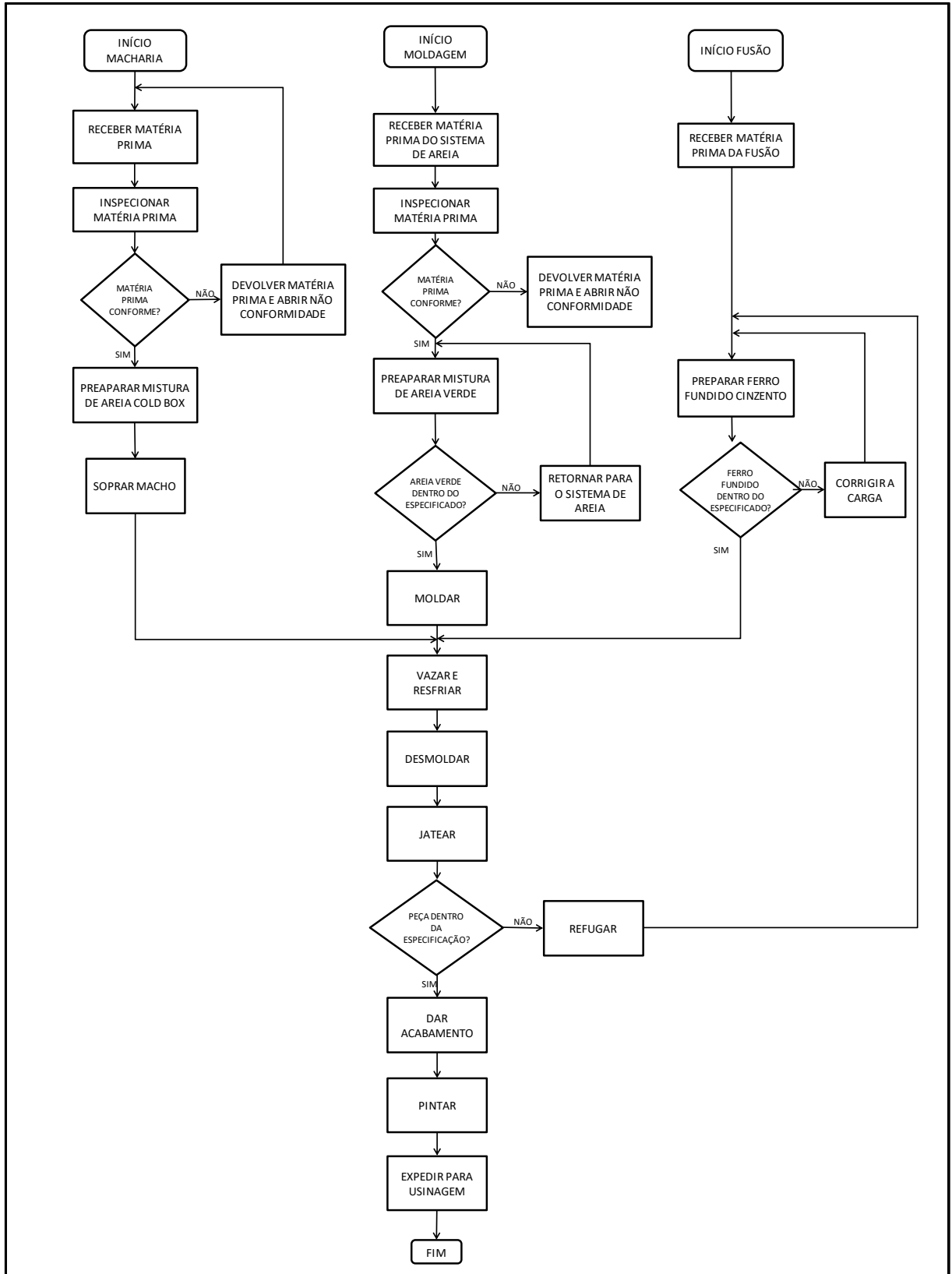


Figura 3. Fluxograma genérico de uma fundição.

Fonte: Autoria própria.

### 1.2.2 Problema 1 – Programação entre dias

A fundição em estudo possui um problema entre as etapas de moldagem e acabamento (rebarbação), onde os dois possuem taxas de produção horária muito diferentes entre cada item produzido, impactando em ociosidade ou sobre capacidade, dependendo do item que está sendo produzido. Como o processo crítico e com maior patrimônio investido é a moldagem, o PCP realiza a programação desta etapa como sendo o gargalo da linha, controlando para que a carga máquina não exceda a capacidade diária, e as demais etapas anteriores ou posteriores se adequam a necessidade. Este problema gera uma oscilação muito grande na carga máquina diária do acabamento, conforme pode ser verificado no Gráfico 3.

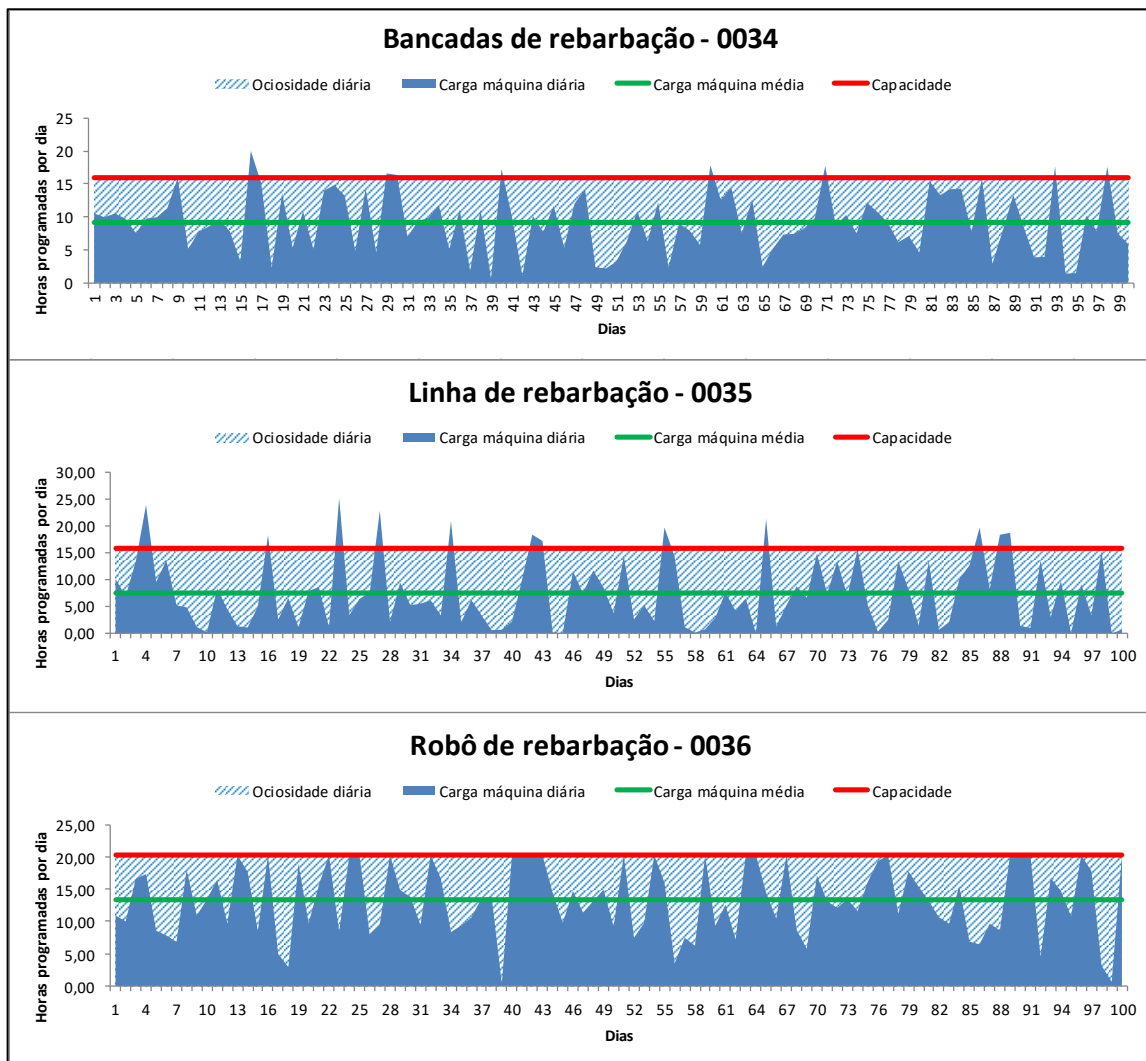


Gráfico 3. Oscilação na carga máquina do acabamento.

Fonte: Autoria própria.

No acabamento existem três conceitos de rebarbação, contendo um sistema de pulmão que alimenta todas as linhas, e que possui capacidade limitada. Um conceito de rebarbação é

uma linha de produção, outro conceito com bancadas de rebarbação, e o último é um robô de rebarbação. Alguns detalhes entre os conceitos são:

- Uma peça que é rebarbada na linha não é produzida nas bancadas;
- Peças que são rebarbadas no robô podem ser rebarbadas na linha;
- Quando a capacidade do robô é excedida, este excesso é rebarbado na linha, isto faz com que o robô nunca tenha carga superior a 100%.

A capacidade de rebarbação do acabamento é definida basicamente pelo número de colaboradores alocados nos postos de trabalho. Tendo isto e o problema de oscilação da carga máquina diária, temos dias em que são necessários, por exemplo, 25 colaboradores e dias que necessitam 50 colaboradores para suprir a quantidade de peças produzidas pela moldagem. Chamaremos isto neste trabalho de programação entre dias.

### 1.2.3 Problema 2 – Sequenciamento do dia

Além do problema da programação entre dias, temos um problema semelhante dentro do próprio dia, o qual está descrito nos próximos parágrafos. Na operação de moldagem temos diversas restrições de operação como:

- Temperatura de vazamento do metal;
- Taxa de consumo de metal;
- Tipo de peça (com macho ou sem macho);
- Tipo de *setup* a ser realizado;
- Semelhança de peças produzidas na sequência;

Estas restrições citadas devem ser seguidas para evitar perdas de produtividade na moldagem, caso contrário a moldagem poderá parar devido necessidade de alteração brusca na temperatura do metal, maior tempo de *setup*, dentre outros problemas.

Como existem muitas restrições na moldagem, a forma de sequenciamento adotada utiliza apenas as restrições nesta operação, negligenciando as operações posteriores, que no nosso caso é a operação de acabamento.

No acabamento existem três conceitos de rebarbação, conforme citado no item 1. O layout esquemático do foco do estudo está demonstrado nas Figura 4 e Figura 5.

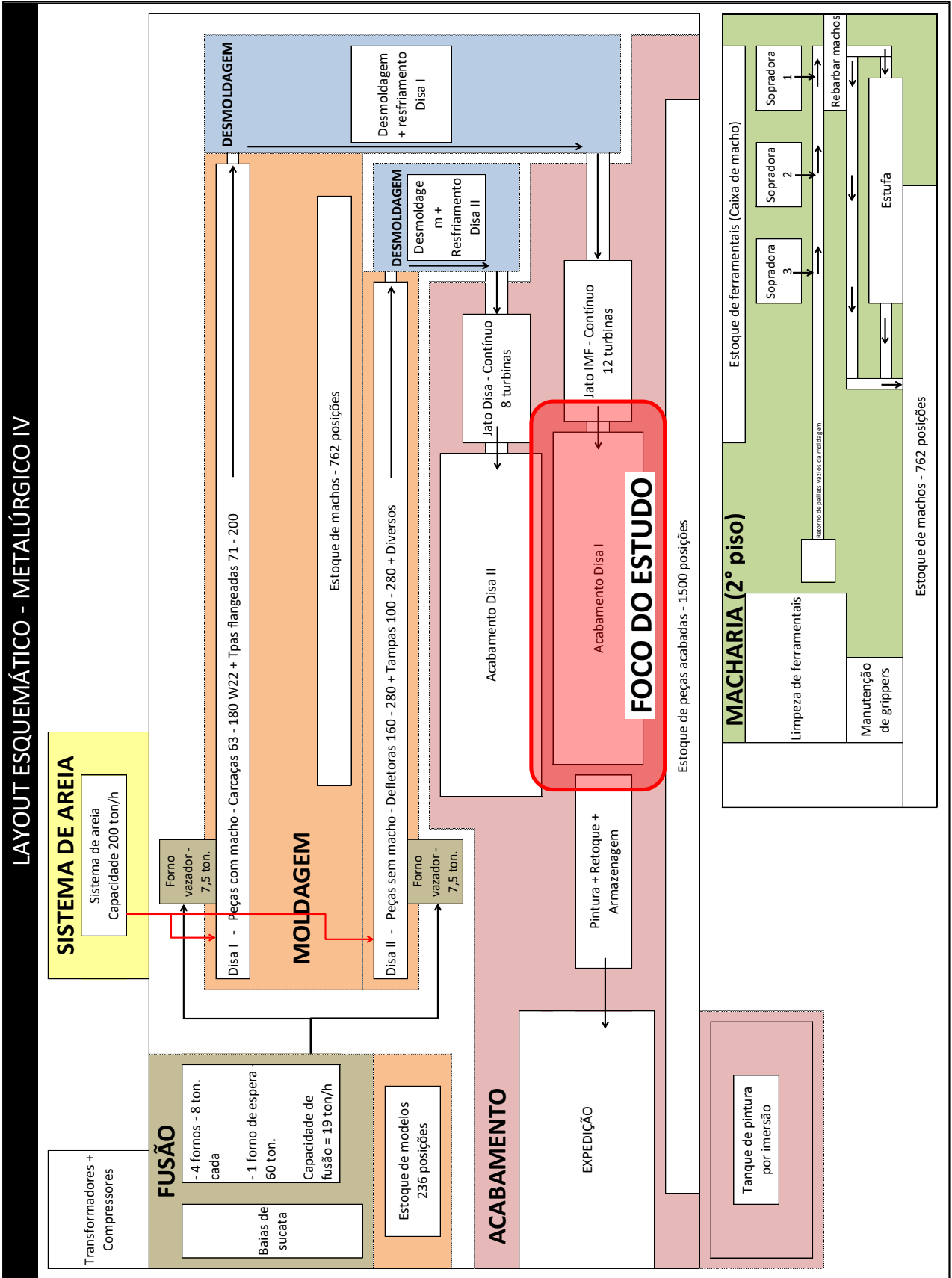


Figura 4. *Layout* esquemático do departamento  
 Fonte: Autoria própria.

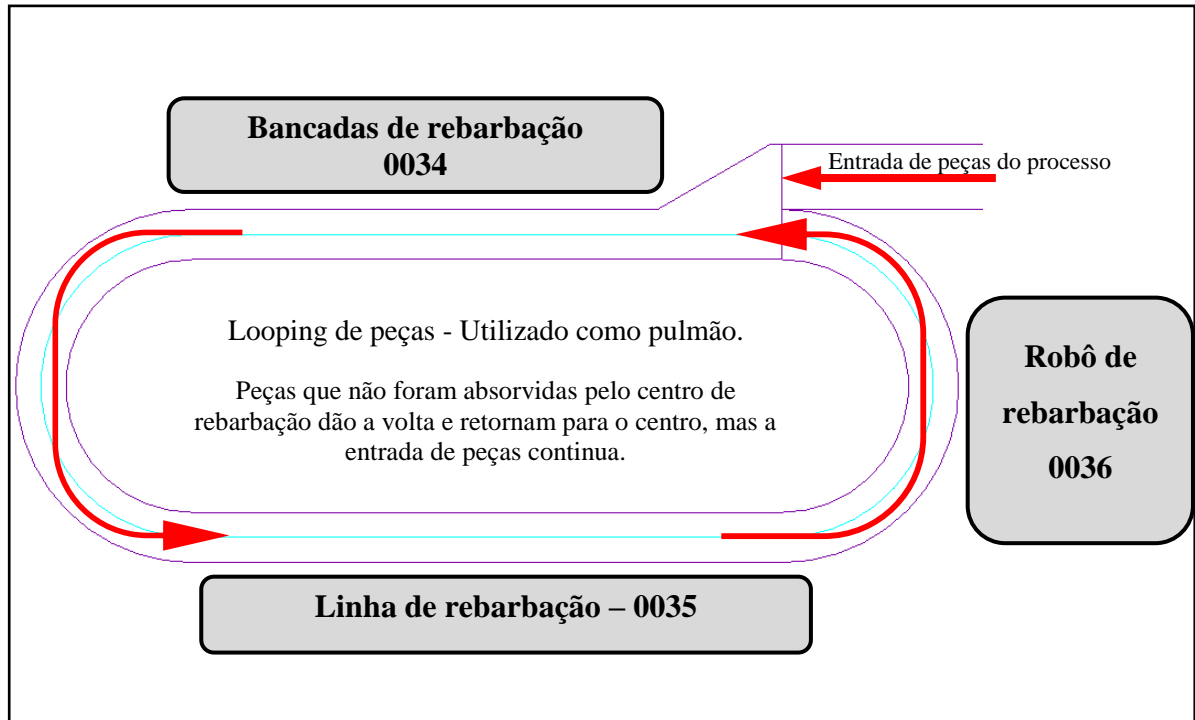


Figura 5. Layout esquemático da seção de acabamento em estudo.  
 Fonte: Autoria própria.

Tendo isto, dependendo da produzida na moldagem, pode haver um pico de demanda para a linha de rebarbação (0035), ocasionando uma ociosidade nas bancadas (0034) e uma saturação da capacidade do pulmão. Isto gera um problema que é a necessidade de retirar as peças do pulmão. Tendo que o processo não foi projetado para isto, então gera-se uma série de inconvenientes e desperdícios para a produção, como:

- Criação de um estoque intermediário (

- );
- Excesso de movimentações de empilhadeira em um local com pouco espaço (não foi projetado para esta operação);
- Momentos com ociosidade nas bancadas de rebarbação e/ou linha de rebarbação;
- Cruzamento no fluxo de materiais;
- Perda do FIFO dos materiais;
- Consequente atraso na entrega do produto acabado;
- Alteração dos pontos de entrada e saída de materiais nos centros de rebarbação.

As peças devem ser alimentadas pelo pulmão, mas são alimentadas por pallets de materiais que foram retirados do mesmo (Figura 7);



Figura 6. Estoque intermediário criado devido picos de demanda  
Fonte: Autoria própria.



Figura 7. Alteração do ponto de entrada e saída de matérias nos centros de trabalho.  
Fonte: Autoria própria.

### 1.3 OBJETIVO GERAL

Análise detalhada do processo identificando os pontos críticos para o sequenciamento da produção dentro da fundição, estudando-se lógicas de programação, melhorando a questão da programação entre dias e também a sequência de produção dentro do próprio dia, visando reduzir os problemas gerados na operação de acabamento.

#### 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os problemas citados serão estudados da seguinte maneira:

- Estudo das referências bibliográficas que abordem problemas semelhantes;
- Estudo de metodologias baseadas no *Lean Manufacturing* para o sequenciamento da produção;
- Estudo de lógicas de programação que permitam selecionar melhores soluções possíveis para o sequenciamento, dentro do dia e entre os dias;
- Realizar um mapeamento do fluxo de valor para mensurar os problemas gerados;
- Realizar um resumo de resultados da lógica estudada.

#### 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em cinco capítulos para abordagem do problema. No capítulo 1 é feita uma introdução do assunto, demonstrando quais os problemas que serão abordados no trabalho. O capítulo 2 faz uma revisão da literatura relevante à pesquisa. No capítulo 3 são apresentados os procedimentos metodológicos, com a abordagem realizada nos problemas citados utilizando-se das metodologias estudadas. No capítulo 4 há a apresentação dos resultados obtidos com o trabalho e no capítulo 5 são apresentadas as conclusões juntamente com a sugestão para trabalhos futuros.



## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 PROCESSO DE FUNDIÇÃO

Conforme citado no item 0 e 0, o processo de fundição possui basicamente as seguintes etapas:

- Fusão e tratamento do metal;
- Preparação dos moldes e machos (moldagem e macharia);
- Vazamento do metal no molde;
- Solidificação e resfriamento;
- Acabamento;

Cada etapa do processo e sua importância para o processo estão descritas na sequência.

A

demonstra uma fundição genérica e suas etapas. A etapa da fusão é responsável pela transformação da matéria prima bruta, podendo ser sucata ou ferro gusa e transformá-la em metal líquido na composição química e estrutura metalográfica desejada para o posterior vazamento no molde. Para o vazamento no molde, o controle da temperatura é fundamental para a produção de peças boas, caso uma peça não seja vazada na temperatura correta podem aparecer defeitos de mau preenchimento da peça, rechupe, sinterização, dentre outros (MOREIRA; LEBRÃO, 2010).

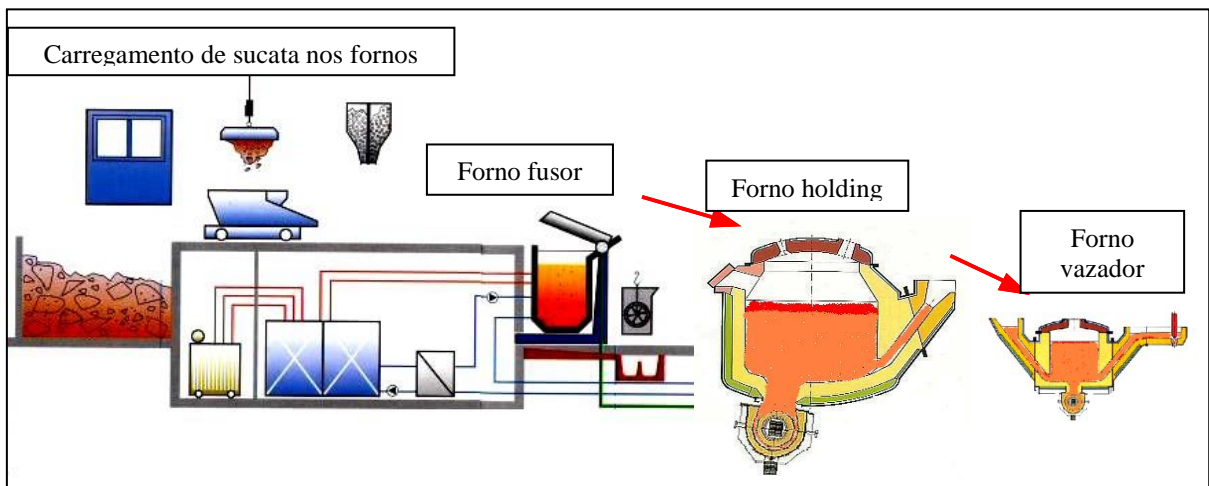


Figura 8. Representação esquemática da área da Fusão  
 Fonte: Adaptado de ALVIZE; SILVEIRA (2007).

No processo de moldagem em areia verde são utilizados como matéria prima basicamente a areia de sílica, argila e água, estes componentes são preparados em uma mistura e disponibilizados para uma máquina de moldagem que irá compactar esta mistura moldando o molde com uma cavidade no formato da peça desejada. Já o processo de macharia produz moldes em areia aglomerados com resinas, os quais são utilizados para produção de partes internas das peças (MACHADO, 2004).

Landman (2005) em seu trabalho enfatiza a complexidade que há no processo de fundição, principalmente quando pensamos em realizar um bom sequenciamento da produção. Em seu trabalho foi enfatizado a dificuldade entre sincronizar a fusão e a moldagem e estudado uma lógica para realizar um bom sequenciamento.

Como citado no item 0, o problema a ser abordado neste trabalho é a dificuldade em obtermos uma boa sequência entre moldagem e acabamento, que são processos em sequência e que estão diretamente ligados. Neste trabalho temos o estudo sobre uma fundição cativa e que possui apenas uma liga de metal, com isso o sequenciamento entre fusão e moldagem não é algo extremamente complexo e é bem gerido pelo grupo de trabalho da fábrica.

## 2.2 MAPEAMENTO DO FLUXO DE VALOR (MFV)

O fluxo de valor pode ser realizado para um fluxo de produção ou fluxo de projeto de um produto. Este fluxo de valor demonstra todas as etapas essenciais necessárias por onde o produto deve passar, podendo ser desde a matéria prima até o consumidor ou da concepção do projeto até o lançamento do mesmo (ROTHER e SHOOK, 1999).

O objetivo da análise de um fluxo de valor é observar o todo juntamente com o fluxo da informação, não apenas processos individuais, identificando fontes de desperdícios, e também facilita a interpretação e análise em conjunto das melhorias propostas (ROTHER e SHOOK, 1999).

Para Rother e Shook (1999), o mapeamento do fluxo de valor deve ser feito no chão de fábrica, acompanhando fisicamente a produção dos materiais de porta a porta, juntamente com o fluxo da informação. O início do mapeamento é com a seleção da(s) família(s) de produtos que será(ão) mapeados, seguido da seleção do líder do mapa.

Inicia-se o MFV com o estado atual, conforme exemplo na



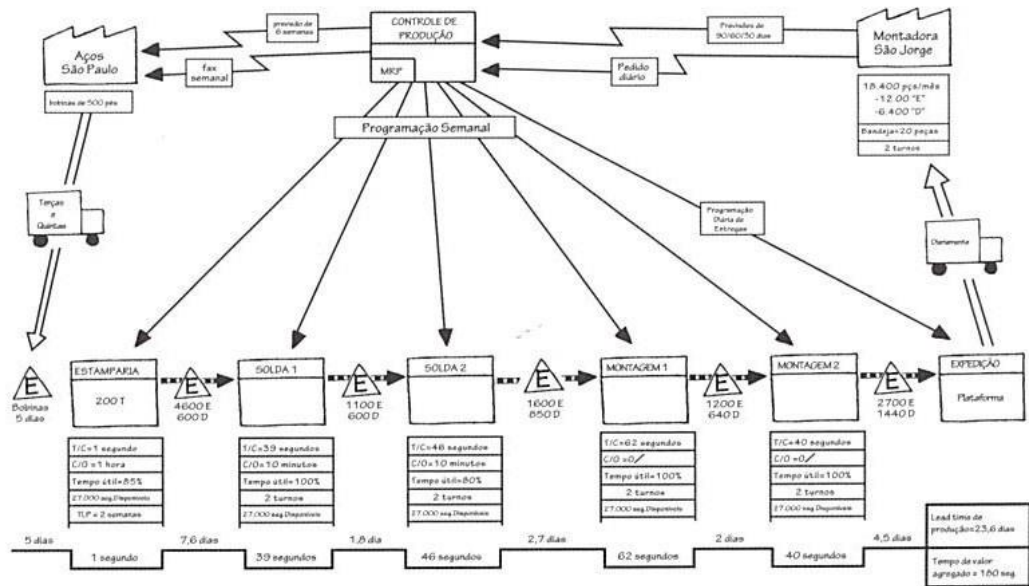


Figura 9. Exemplo de um MFV do estado Atual  
 Fonte: ROTHER; SHOOK (1999).

Após desenhado o MFV do estado atual, é proposto um estado futuro, conforme ilustrado na Figura 10.

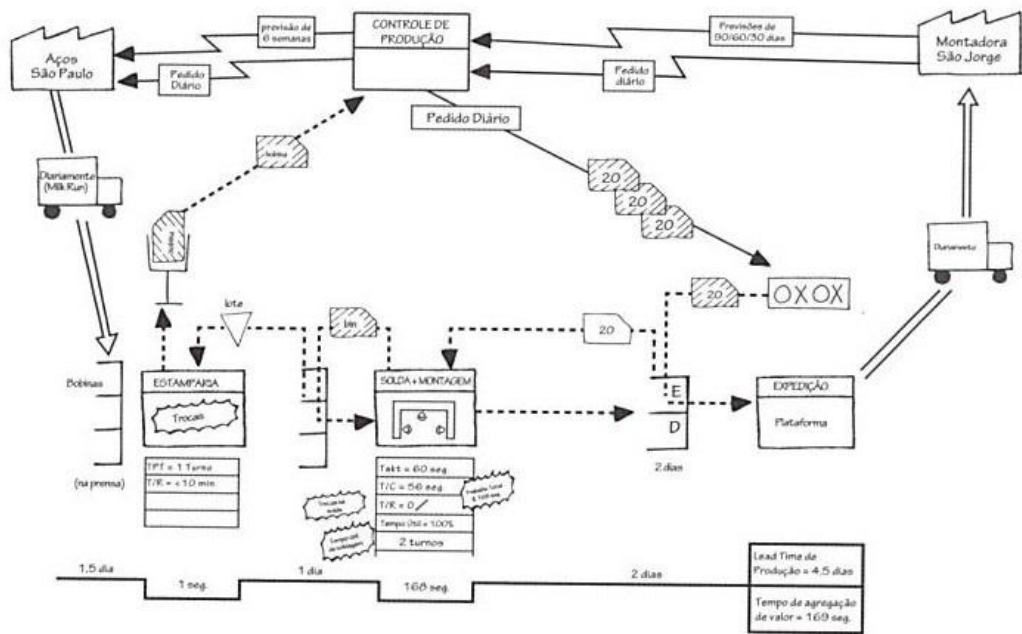


Figura 10. Exemplo de um MFV do estado Futuro  
 Fonte: ROTHER; SHOOK (1999).

Desenhado o mapa do estado atual é então desenhado o mapa do estado futuro, o qual tem como objetivo identificar e eliminar as fontes de desperdício encontradas em um curto prazo (ROTHER e SHOOK, 1999).

## 2.3 ARRANJOS FÍSICOS DE PRODUÇÃO

O arranjo físico de uma fábrica é a disposição dos recursos físicos para a produção de um determinado item. Uma vez que o arranjo físico está errado, acarreta em filas entre clientes das operações, tempos de processamentos longo, estoques de materiais, fluxos confusos e imprevisíveis. (SLACK; CHAMBERS; JOHNSON, 2002, p. 201).

Para Slack, Chambers e Johnson (2002, p. 201-213), existem quatro tipos básicos de arranjos físicos: o Posicional, Por processo, Celular e Por produto. A seleção do melhor tipo de arranjo físico depende do volume e variedade de produtos que existem para serem transformados.

**Arranjo físico por produto:** Também chamado de arranjo físico em linha, este é o tipo de arranjo em que o produto a ser transformado segue um fluxo pré-definido, onde a de atividades está na mesma dos processos (SLACK; CHAMBERS; JOHNSON, 2002, p. 228).

As vantagens deste tipo de arranjo físico são (PEINADO; GRAEML, 2007):

- Alta produtividade;
- Consumo de material e carga máquina constantes na linha (fácil balanceamento);
- Fácil controle.

Entretanto este tipo de arranjo também possui suas desvantagens (PEINADO; GRAEML, 2007):

- Alto investimento em máquinas, devido a especialidade do trabalho realizado;
- Trabalho monótono, gerando tédio nos operadores;
- Baixa flexibilidade;
- Presença de gargalos, basta uma operação parar todas as demais também para.

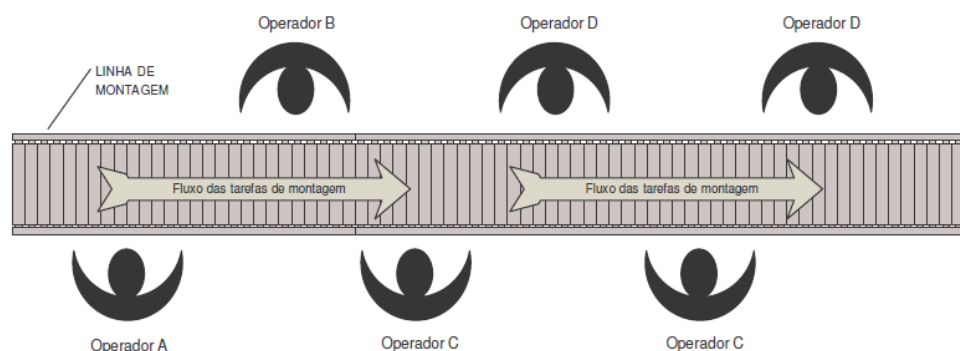


Figura 11. Exemplo *layout* por produto ou em linha  
Fonte: PEINADO; GRAEML (2007).

**Arranjo físico por processo:** É um arranjo que possui suas vantagens quando há maior diversidade de itens produzidos. Neste arranjo são posicionados recursos similares juntos um do outro, facilitando que um produto percorra um caminho diferente de outro.

As vantagens deste tipo de arranjo físico são (PEINADO; GRAEML, 2007):

- Grande flexibilidade para alterar o fluxo do processo sem necessidade de alteração do *layout*;
- Baixo nível de monotonia no trabalho;
- Grande flexibilidade para diferentes produtos de quantidades diferentes;
- *Layout* com baixo investimento.

Este tipo de arranjo também possui suas desvantagens (PEINADO; GRAEML, 2007):

- Produto percorre distâncias maiores dentro da fábrica;
- Maior dificuldade no balanceamento;
- Exigência de mão de obra mais qualificada.

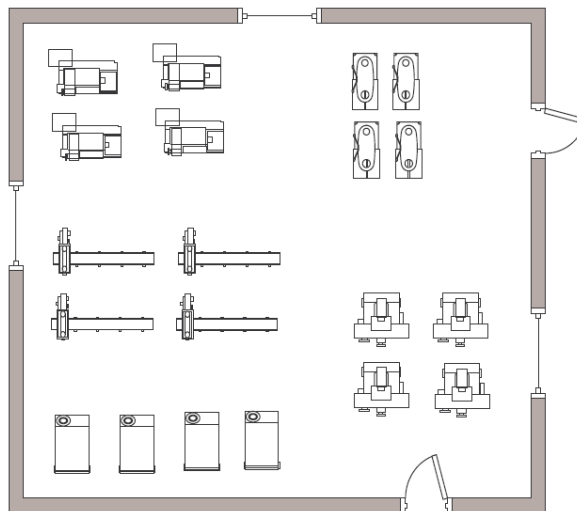


Figura 12. Exemplo *layout* por processo  
Fonte: PEINADO; GRAEML (2007).

**Arranjo físico celular:** Neste arranjo os produtos a serem transformados são selecionados para serem processados em uma parte específica, onde estão os recursos necessários realizar seu processamento, suprimindo uma necessidade específica do seu processamento. Este tipo de arranjo pode estar combinado o arranjo físico por produto.

Algumas vantagens do arranjo físico celular são (PEINADO; GRAEML, 2007):

- Os produtos percorrem uma menor distâncias para serem processados;
- Redução dos estoques em processo;

- Maior entrosamento entre os operadores da célula, conseqüente motivação.

Este tipo de arranjo também possui suas desvantagens (PEINADO; GRAEML, 2007):

- A célula é especializada para produção de um tipo de produto;
- Complexidade na elaboração de se *layout*.

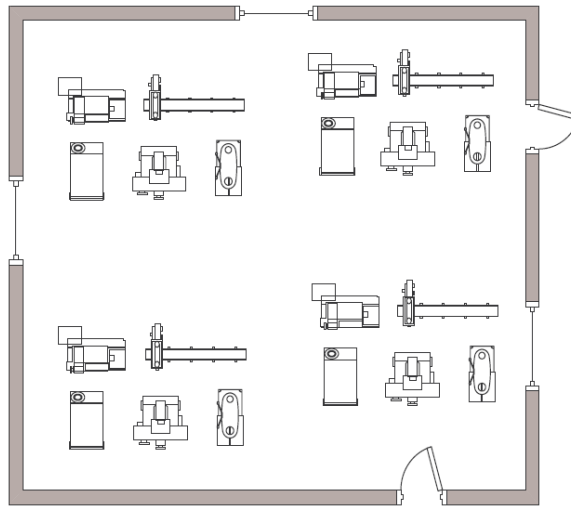


Figura 13. Exemplo *layout* celular  
Fonte: PEINADO; GRAEML (2007).

**Arranjo físico misto:** Neste tipo de arranjo são combinados tipos básicos de arranjos, por exemplo, uma célula combinada em uma linha de produção, conforme exemplo da Figura 14.

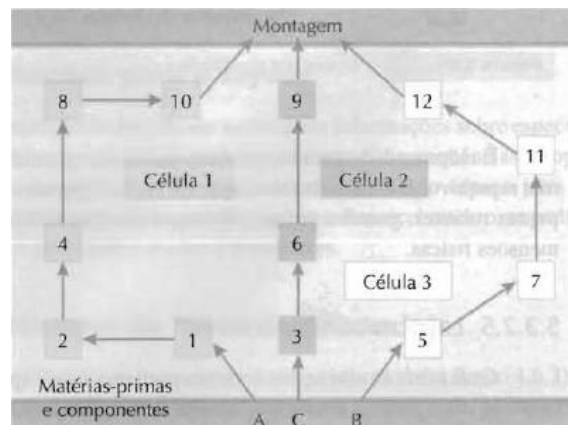


Figura 14. Exemplo de *layout* misto  
Fonte: MARTINS; LAUGENI (2005).

**Arranjo físico posicional:** Neste tipo de arranjo o produto a ser transformado está fixo, e as ferramentas que o transformam que vem até ele.

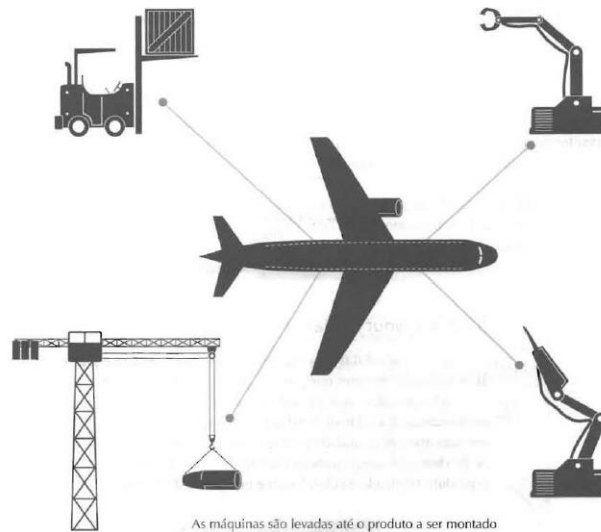


Figura 15. Exemplo *layout* posicional  
 Fonte: MARTINS; LAUGENI (2005).

### 2.3.1 Arranjo físico por produto – Balanceamento

Para o projeto de um arranjo físico por produto, diversos fatores devem ser levados em consideração, como tempo de ciclo necessário, variações no tempo das tarefas, número de estágios, arranjo físico dos estágios e também o balanceamento da linha (SLACK; CHAMBERS; JOHNSON, 2002, p. 228).

Onde temos:

Equação 1. Cálculo tempo de ciclo

$$\text{Tempo de ciclo necessário} = \frac{\text{Tempo disponível para a operação}}{\text{Quantidade a ser processada}}$$

Fonte: Slack, 2002.

Equação 2. Número de estágios

$$\text{Número de estágios} = \frac{\text{Conteúdo de trabalho}}{\text{Ciclo de tempo necessário}}$$

Fonte: Slack, 2002.

\* Conteúdo de trabalho: Tempo total de todas as atividades para execução da atividade

O tempo de ciclo necessário citado na Equação 1, também pode ser confundido com o *Takt time*, que nada mais é o cálculo de qual deve ser o tempo mínimo de fabricação para cada produto baseado na demanda do cliente. Então, a equação do *Takt time* ficaria conforme descrito na



Equação 3 (ALVAREZ E ANTUNES JR, 2001).

Equação 3. *Takt time*

$$Takt\ time = \frac{\text{Tempo de trabalho disponível por turno}}{\text{Demanda do cliente por turno}}$$

Fonte: Rother e Shook, 1999.

Em seu trabalho, Alvarez e Antunes Jr. (2001) discorrem sobre as diferenças existentes entre o *Takt time* e o tempo de ciclo, os quais são bem distintos. Basicamente o *Takt time* depende da demanda do seu cliente, ou seja, qual é o tempo mínimo necessário para atender a necessidade do cliente. Já o tempo de ciclo está mais ligado a operação, em quanto tempo o meu recurso é capaz de entregar.

Para Slack, Chambers e Johnson (2002, p. 229), a maior dificuldade para o projeto de um arranjo físico por produto é na equalização das atividades de cada estágio/recurso, o balanceamento da linha. A diferença existente entre os estágios é chamada de perda de balanceamento, referindo-se ao tempo desperdiçado entre os estágios. A Figura 16 demonstra o tempo ocioso em uma linha de produção decorrente de uma operação gargalo.

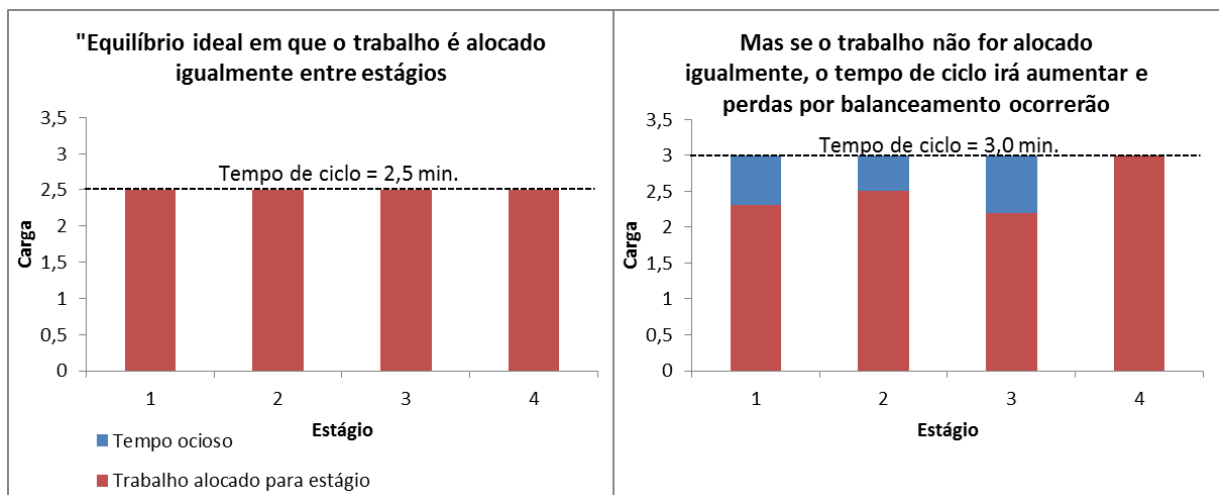


Figura 16. Destaque para o tempo ocioso entre estágios com diferença de tempos.

Fonte: Adaptado de SLACK (2002).

## 2.4 TIPOS DE DESPERDÍCIO

Ohno (1996) cita em seu trabalho a importância na eliminação dos desperdícios para que seja possível aumentar a eficiência da fábrica, ou seja, produzir o necessário com o mínimo de mão de obra necessária.

Produzir com zero desperdícios é um dos focos citados no trabalho de Ohno (1996), levando assim a aumentar verdadeiramente a eficiência. Para isso é necessário identificar os desperdícios, os quais podem estar em:

- Superprodução;

- Espera;
- Transporte;
- Processamento desnecessário;
- Estoque;
- Movimentações;
- Falta de qualidade;

Em seu livro Liker (2004) fala sobre o Sistema Toyota de produção (STP), e sobre os diferentes tipos de desperdícios existentes em um sistema de produção. No Japão, quando falam de desperdício citam a palavra *Muda*, e a eliminação deste tipo de desperdício é o foco dos trabalhos Lean.

Liker (2004) cita três tipos de desperdícios que devem ser combatidos em conjunto, sendo eles o *Muda*, *Muri* e *Mura* descritos na sequência.

- *Muda*: Está vinculado as atividades que não agregam valor. São elas: atividades que aumentam o lead time; excesso de movimentações; excesso de estoque ou qualquer tipo de espera (LIKER, 2004).

- *Muri*: Este está relacionado a sobrecarga de máquinas ou operadores. Sobrecarregar os operadores gera problemas de segurança e qualidade. Sobrecarregar as máquinas causa problemas de quebra e defeitos (LIKER, 2004).

- *Mura*: Está relacionado ao desnivelamento da produção. Este tipo de desperdício é constantemente observado em linhas de produção, devido a programação desnivelada, onde existem picos de produção que as máquinas e operadores não conseguem suprir a necessidade e momentos em que há ociosidade. Isto significa que será necessário ter os recursos para atender aos picos de produção, mesmo se a média esteja muito abaixo disto. Liker ainda cita que o *Muda* ocorre em função do *Mura* (LIKER, 2004).

## 2.5 ESTOQUES

Segundo Slack, Chambers e Johnson (2002, p. 381), estoque é o armazenamento de recursos em um sistema de transformação, e ele sempre existirá devido a diferença de ritmo entre fornecimento e demanda.

Para Slack, Chambers e Johnson (2002, p. 382-384), existem quatro diferentes tipos de estoque, estoque de proteção, de ciclo, de antecipação e de canal.

- Estoque de proteção: Existe para compensar incertezas no processo de fornecimento.
- Estoque de ciclo: Existe para suprir uma demanda variada de produtos, onde a fonte que a produz é limitada e não consegue fornecer simultaneamente toda gama de produtos.
- Estoque de antecipação: Existe para compensar uma sazonalidade, onde há uma diferença sazonal entre ritmo de produção e fornecimento. Então se produz antecipadamente para atender os momentos de maior demanda.
- Estoque de canal: Este é todo o estoque que está em transito, entre o fornecedor e cliente.

Estes tipos de estoques citados por Slack, Chambers e Johnson (2002), também são abordados por Tubino (2007), o qual cita os motivos da criação destes estoques, podendo ser para amortecer variações entre processos, absorver sazonalidades, possibilitar a implantação de lotes econômicos, reduzir *lead times*, para obtenção de vantagens de preço e também como segurança.

Os custos relacionados com os estoques são: o custo direto; custo de preparação e o custo de manutenção do estoque. Somando-se estes itens temos o custo total do estoque, e tendo este equacionamento, podemos chegar a um cálculo para o lote econômico através de interações simulando situações ou derivando-se a equação em função da quantidade (TUBINO, 2007).

Equação 4. Custo direto

$$CD = D * C$$

Fonte: Tubino, 2007.

Equação 5. Custo de preparação

$$CP = \frac{D}{Q} * A$$

Fonte: Tubino, 2007.

Equação 6. Custo de manutenção

$$CM = Q_m * C * I$$

Fonte: Tubino, 2007.

Equação 7. Custo total do estoque

$$CT = CD + CP + CM$$

Fonte: Tubino, 2007.

CD = Custo direto

CP = Custo de preparação

CM = Custo manutenção

CT = Custo total

D = Demanda do período

C = Custo unitário do item

Q = Tamanho do lote de reposição

A = Custo unitário de preparação

Q<sub>m</sub> = Estoque médio do período

I = Taxa dos encargos financeiros

## 2.6 NIVELAMENTO DA PRODUÇÃO

Ohno (1996), em seu livro cita a dificuldade em criar um nivelamento da produção, onde busca-se a redução nos picos e vales da produção, onde toda a cadeia produtiva deve estar em sincronia para que este nivelamento ocorra, e com a grande diversidade de produtos isto se torna ainda mais difícil.

Para um bom nivelamento a redução no tamanho do lote é fundamental. As linhas de produção devem ser flexíveis o bastante para produzir a variedade de produtos necessária, e também permitir uma fácil troca de produto na linha, com baixos tempos de *setup*. Isto facilitará a redução no tamanho dos lotes facilitando o nivelamento da produção (OHNO, 1996).

Niimi (2004) cita que o nivelamento da produção é um dos fundamentos do STP, denominado *Heijunka*, juntamente com o trabalho padronizado e a melhoria contínua.

Liker (2004) faz uma abordagem interessante sobre o problema do desnivelamento da produção, dando um exemplo em que determinada empresa estipulou como meta a implementação do *Lean Manufacturing* e trabalhou fortemente para eliminação dos desperdícios do tipo *Muda*, os quais são mais fáceis de serem visualizados e resolvidos, reduzindo número de colaboradores, reduzindo movimentações e organizando os postos de trabalho. Quando iniciada a operação com os novos padrões ocorrem diversos problemas devido a oscilação na demanda, forçando os operadores e as máquinas devido aos picos de produção e gerando diversos outros problemas, como quebras de máquina, operadores sobrecarregados, problemas de qualidade, atrasos na produção e desorganização. A conclusão do trabalho seria: *Lean Manufacturing* não funciona nesta empresa.

O que muitas empresas tem dificuldade em fazer é estabilizar a produção, criar um sistema com um fluxo uniforme e equilibrado. Este é o conceito de *Heijunka* criado pela Toyota,

o qual vai mais contra a intuição e visa eliminar o desperdício tipo *Mura*. Entretanto para a eliminação dos desperdícios tipo *Muda* e *Muri*, a eliminação do *Mura* é fundamental. (LIKER, 2004).

Produzir lento como uma tartaruga é muito melhor que produzir rápido como um coelho, dizia Ohno. Sistemas de produção onde os trabalhadores necessitam realizar seus trabalhos com muita rapidez, em geral irão causar fadiga nos trabalhadores além do fato que podem haver, no mesmo momento, trabalhadores sobrecarregados e outros parados com tempo livre. Este tipo de coisa pode causar desmotivação nos trabalhadores impedindo que cooperem nos esforços de melhoria (*Kaizen*) (LIKER, 2004).

### 2.6.1 HEIJUNKA

Niimi (2004) cita que o STP nasceu com a necessidade do nivelamento da produção, tendo que a oscilação entre os dias de produção poderia ser muito alta e as máquinas e a mão de obra estariam dimensionadas para atender aos picos, tendo assim momentos com tempo ocioso gerando desperdício.

*Heijunka* nada mais é que o nivelamento da produção baseado no volume e mix de produção. No sistema tradicional a distribuição da produção ocorre conforme a demanda do cliente, a qual pode oscilar muito, já no sistema *heijunka* é pego todo o volume de produção e um período e equalizado para produzir a mesma quantidade de cada item entre os dias com lotes menores (LIKER, 2004). A

demonstra um exemplo desta aplicação.

O *heijunka* direciona ao conceito de processos mais flexíveis, para que os recursos possam ser utilizados da maneira mais otimizada possível (NIIMI, 2004).

Existem quatro benefícios para na produção nivelada, sendo eles (LIKER, 2004):

- Aumento de flexibilidade do processo, reduzindo estoques;
- Redução no risco de peças produzidas não serem vendidas;
- Demanda suave para os processos posteriores e fornecedores;
- Uso balanceado das máquinas e operadores;

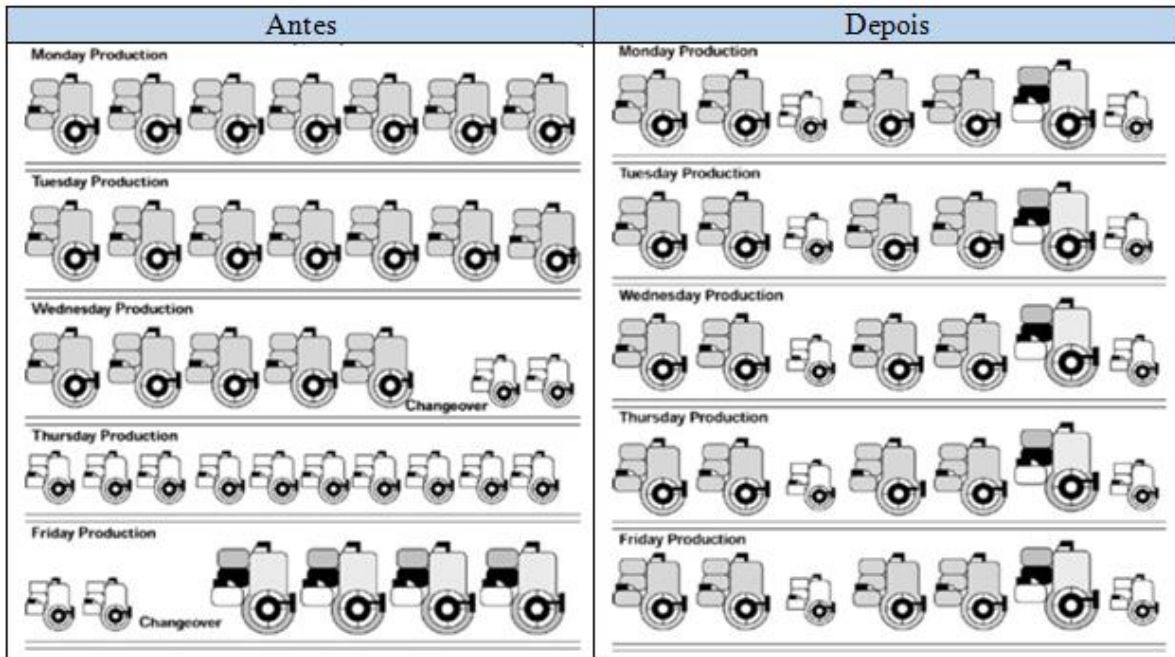


Figura 17. Exemplo da aplicação do *heijunka*.  
Fonte: Adaptado de LIKER (2004).

## 2.7 SEQUENCIAMENTO DE PRODUÇÃO

Para Tubino (2007), a metodologia para o sequenciamento da produção depende do sistema de produção utilizado, podendo ser sistemas de produção contínuos, repetitivos em lotes e sob encomenda. Basicamente são:

- Sistemas de produção contínuos: o sequenciamento deve manter o mesmo ritmo nos centros de trabalho que compõem a linha de produção, também chamado de balanceamento de linha.
- Sistemas de produção repetitivos em lotes: em geral cada lote possui roteiros de fabricação com diferentes centros de trabalho, e em cada centro de trabalho o item deve seguir a priorização do mesmo. O foco neste sistema é a taxa de ocupação dos centros de trabalho.
- Sistemas de produção sob encomenda: Neste sistema o principal foco do sequenciamento é o prazo de conclusão, o qual é o principal fator levado em conta pelo cliente na escolha de seu fornecedor.

Em seu trabalho, Landmann (2005) também estudou a importância do sequenciamento da produção dentro de uma fundição, a qual possui características mistas de sistemas de produção, tendo a fusão como um processo contínuo, a qual está diretamente ligada com o processo de moldagem que opera em lotes. Além destes também há a produção de machos e o

acabamento que operam com um processo em lotes. Isto torna a programação e sequenciamento da produção uma atividade muito complexa.

Araújo (2004) em seu trabalho também estudou o sequenciamento da produção em uma fundição, entretanto analisando-se apenas as etapas de Fusão e Moldagem, tendo que para a situação analisada era complexa entre estas etapas. Utilizou uma lógica computacional utilizando equações que definiram notas para cada situação, e tendo como função objetivo final minimizar uma função objetivo. Obteve resultados muito bons com relação a programação, redistribuindo melhor a produção entre os centros de trabalho, melhorando a eficiências nas etapas do processo e mantendo os níveis de estoque planejados.

Teixeira Junior e Benedini (2009) estudaram em seu trabalho a sincronia da programação entre as etapas do processo de fundição, visando estabilizar a carga máquina entre as etapas e possibilitar um atendimento a 100% das ordens de produção do dia. Para isso fez uso de um sistema APS (*Advanced Planning and Scheduling*), o qual é nada mais é que um *software* desenvolvido para realizar a programação da produção em sistemas complexos e com muitas restrições. A implementação deste sistema na fundição em estudo apresentou bons resultados na questão do atendimento as restrições do processo mantendo a carga máquina abaixo de 100% em todos os dias.

## 2.8 FERRAMENTAS PARA RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO

A Pesquisa Operacional traz diversas ferramentas para a resolução de problemas de otimização, e está se tornando algo cada vez mais viável na gestão de uma organização (GOLDBARG; LUNA, 2000). Diversos tipos de problemas são abordados na Pesquisa operacional, com funções lineares, não lineares e também as descontínuas.

Para a resolução de um problema de otimização deve-se fazer uso de um algoritmo, o qual conceitualmente pode ser resumido como sendo um processo formal de cálculo, o qual possui seu objetivo principal solucionar um determinado problema sem elevados custos e com rapidez (GOLDBARG; LUNA, 2000).

### 2.8.1 Algoritmo genético

Algoritmos genéticos são baseados na seleção natural e hereditariedade, ou seja, indivíduos com poucas chances de sobreviver são eliminados, restando os indivíduos mais aptos. Esta é uma ferramenta de otimização que irá resultar em uma solução muito próxima do



ponto ótimo e com uma velocidade muito maior. Devido a esta característica o mesmo é uma boa ferramenta para otimização de problemas (REZENDE, 2005).

Para a seleção dos indivíduos mais aptos, o algoritmo genético irá realizar seu critério de seleção através da escolha de cromossomos mais aptos encontrados em uma população de N cromossomos inicialmente criada. Em um problema onde a região da solução é totalmente desconhecida estes cromossomos são criados totalmente aleatoriamente, entretanto, se a região onde pode se encontrar a solução ótima é conhecida estes cromossomos podem ser determinados (REZENDE, 2005).

Segundo Lachtermacher ( 2007, p. 190) as etapas para o algoritmo genético são:

- “1. Estabelecer uma população inicial de cromossomos;*
- 2. Determinar o ajustamento de cada cromossomo;*
- 3. Gerar novos cromossomos a partir da população atual através de cruzamentos e mutações;*
- 4. Determinar a nova geração da população e retornar ao passo 2 até que uma certa condição for atingida.”*

Para qualquer problema de otimização não linear ou com funções descontínuas o algoritmo genético encontrará uma solução, desde que tenha tempo suficiente para isso. Uma dificuldade é saber qual é o tempo necessário uma vez que não sabemos qual é a solução ótima. Mesmo assim este é um bom algoritmo para resolução deste tipo de problema, uma vez que não é afetado pela complexidade da equação utilizada (LACHTERMACHER, 2007).

## 2.8.2 Solver Excel

Uma das ferramentas de otimização disponíveis é um suplemento do Microsoft Excel, o Solver. Uma das lógicas de programação existentes nesta ferramenta é para a resolução de equações não lineares e não suaves (funções descontínuas). Este tipo de resolução de problemas é muito complexo, e o algoritmo do Solver irá encontrar uma solução boa, mas poderá não ser a solução ótima do problema (FRONTLINE SYSTEMS, 2016).

O método utilizado para resolução deste tipo de problema citado no parágrafo acima é o método *Evolutionary*, o qual possui sua lógica baseada em um algoritmo genético, então, como citado anteriormente encontrará uma solução boa, podendo não ser a melhor. O algoritmo não sabe quando deve parar de testar novas soluções, ele sabe somente que encontrou uma solução melhor que uma encontrada anteriormente, então o mesmo retorna um valor para o

problema quando algumas regras do modelo não poderão mais ser respeitadas ou quando excede um tempo máximo estipulado (FRONTLINE SYSTEMS, 2016).

A diferença entre a solução ótima e a solução encontrada é algo intrínseco do método *Evolutionary* do Solver, é uma con do método. É normal rodar o problema no *software*, encontrar uma solução, e quando rodamos novamente o problema nas mesmas condições o *software* trará uma resposta diferente, por isto a recomendação de realizar mais que uma simulação. Outra recomendação é aumentar o tamanho da população e/ou a taxa de mutação, isto fará com que aumente a probabilidade de um população diversificada e tenderá a uma melhor solução (FRONTLINE SYSTEMS, 2016).

Obviamente este algoritmo trará uma boa resposta quando existir uma boa equação que defina o problema, sendo então a análise do problema e equacionamento do mesmo tão importante quanto a resolução.

## 2.9 Lógica *Fuzzy*

A lógica *Fuzzy* também é utilizada para problemas de otimização, conforme apresenta em seu trabalho, Landmann (2005), utilizou esta lógica para criar um sequenciamento de produção dentro de uma fundição, entre as operações de fusão e moldagem, a qual apresentou bons resultados.

Na lógica *Fuzzy* as variáveis são analisadas de forma linguística, como muito bonito, bonito, feio, muito feio, diferentemente dos sistemas lógicos binários, onde há a resposta sim ou não. Esta lógica irá converter os valores antes vagos para valores numéricos. Isto faz com que seja possível aplicar em problemas que há um falta de exatidão nas variáveis. (GOMIDE; GUDWIN; TANSCHKEIT, 2016).

Gomide, Gudwin e Tanscheit (2016), ainda citam que a modelagem e o controle *Fuzzy*, os quais “*são técnicas para se manusear informações qualitativas de uma maneira rigorosa*”. Esta teoria trata valores de entrada e saída agregando variáveis de processo, facilitando a tratativa de problemas complexos, com robustez e acurácia nos resultados, tornando problemas antes insolúveis agora solúveis.

Em seu trabalho, Landmann (2006), comparou a utilização de um algoritmo genético com a lógica *Fuzzy* estudada em seu trabalho em 2005. Constatou que o algoritmo genético apresentou melhores resultados em dois quesitos avaliados, minimizando o desvio padrão e picos de demanda, nivelando o melhor a taxa de consumo de metal. Concluiu assim que o algoritmo genético é mais apto a resolução do problema de programação estudado.

### 3 PROCECIMENTOS METODOLÓGICOS

#### 3.1 REVISÃO DOS OBJETIVOS

Como objetivos propostos estavam o estudo de uma forma de sequenciar a produção dentro da fundição visando minimizar a oscilação de carga máquina em todas as etapas do processo. Isto deveria abordar o sequenciamento das ordens entre os dias de produção e também dentro do próprio dia.

#### 3.2 ETAPAS DO ESTUDO

Para atingir os objetivos propostos no início deste trabalho foram seguidas as seguintes etapas:

- Entendimento do problema com suas causas negativas para o processo;
- Estudo da literatura visando abordar algumas técnicas para solução do problema e conhecimentos técnicos necessários para entendimento dos impactos do problema;
- Elaborado uma MFV com os estados, atual, futuro 1 e futuro 2;
- Elaborado duas técnicas para o sequenciamento, uma para o sequenciamento entre dias de produção e outra para o sequenciamento dentro do próprio dia;
- Realizado simulações com dados reais e quantificado os ganhos propostos (considerando a amostragem realizada);
- Elaborado uma conclusão com sugestões de trabalhos futuros baseados nos resultados obtidos.

#### 3.3 MAPEAMENTO DO FLUXO DE VALOR (MFV)

No MFV são mapeadas todas as atividades que agregam valor para o produto final, isto facilita a identificação de desperdícios, gera uma visão do todo em uma linguagem comum (ROTHER; SHOOK, 1999).

Seguindo-se o conceito do MFV dado por Rother e Shook (1999), foi realizado um mapeamento do departamento em estudo, visando identificar as fontes de desperdício. Este mapeamento está demonstrado na



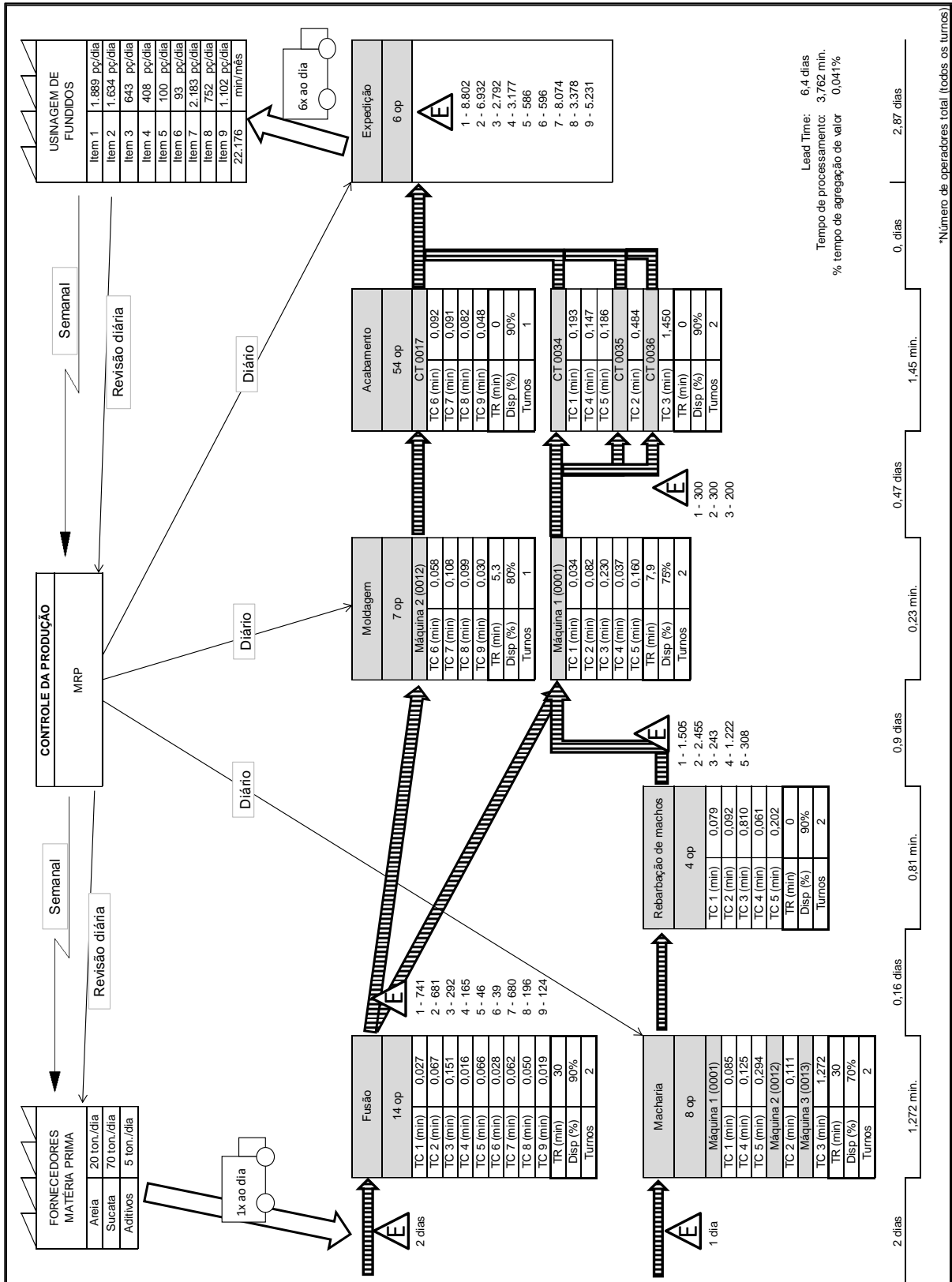


Figura 18. Mapeamento do Fluxo de Valor do departamento em estudo – Estado Atual  
 Fonte: Autoria própria.

Através deste mapeamento fica evidente como é gerada a programação da produção e onde são gerados os problemas, criando-se um estoque intermediário entre as operações de

moldagem e acabamento (foco do estudo). Este estoque intermediário dificulta a gestão do acabamento, gerando excesso de movimentações de peças, perda da sequência correta (FIFO), mistura de peças e conseqüente atraso na entrega das ordens de produção.

### 3.4 TÉCNICAS PARA SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO

Devido ao problema identificado, foram realizadas diferentes análises para eliminação deste desperdício, com técnicas de sequenciamento visando eliminar os problemas gerados na programação entre dias e dentro do próprio dia também.

Conforme citado no item 0, há um problema gerado devido a programação ocorrer apenas na operação de moldagem, que são os picos e vales demonstrados no Gráfico 3, onde apresenta dias com excesso de programação e dias com ociosidade. Estes picos também podem ser gerados dentro do próprio dia, os quais podem gerar uma saturação muito rápida do pulmão existente para atender estas flutuações (

).

Este problema é gerado devido ao desnivelamento da produção, desperdício do tipo *Mura*, o qual gerará os desperdícios do tipo *Muda* e *Muri*, conforme citado por Liker (2004). No trabalho em questão, os desperdícios criados em con ao *Mura* estão citados nos itens 1 e **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

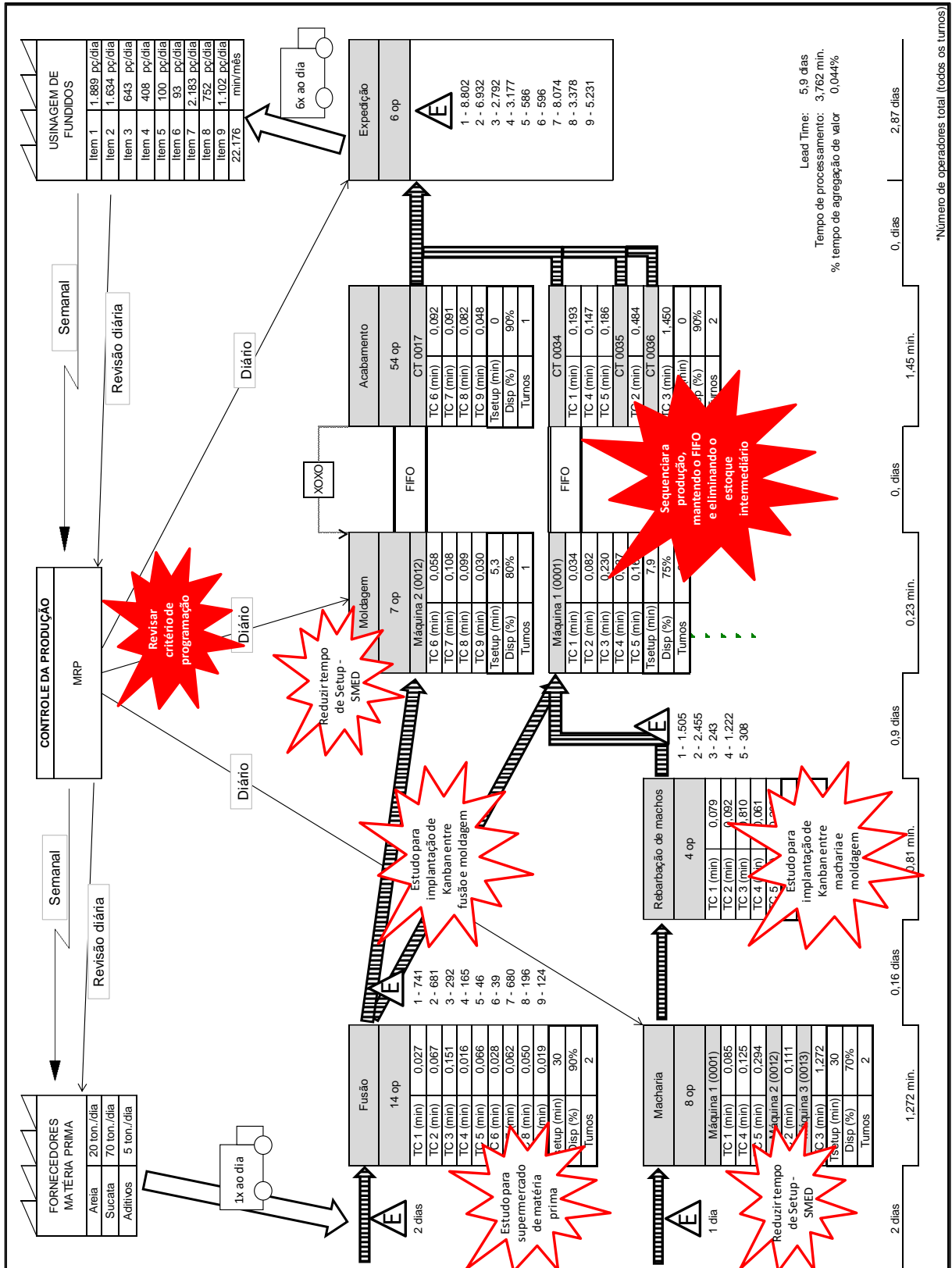
Dentre as lógicas de sequenciamento estudadas o *Heijunka* foi o que apresentou maior aplicabilidade para solucionar os problemas explanados. Entretanto, conforme citado, este método irá ocasionar maior número de ordens, ou seja, quebrará as ordens já programadas e as dividirá ao longo do período. Isto ocasionaria um maior número de *setups* nas operações de moldagem e macharia, impactando em menor disponibilidade da máquina. Tendo isto, os problemas foram abordados visando manter o mesmo número de ordens já programadas, apenas redistribuindo-as ao longo do período em análise.

Sendo assim, foi realizado um MFV do estado futuro 1 (

) com os trabalhos necessários para eliminação dos problemas em análise e quais os próximos passos para melhorar o fluxo como um todo dentro da fundição, visando poder, no futuro, aplicar o *Heijunka* em sua integridade. A



demonstra o estado futuro 2, visando melhorar o fluxo em toda a fundição.





, existem vários trabalhos necessários para atingir o estado futuro. Neste trabalho estão sendo abordados os problemas gerados entre as operações de Moldagem e Acabamento, destacados em fundo vermelho, os quais estão sendo abordadas suas tratativas na Figura 19.

### 3.4.1 Sequenciamento dentro do dia

Para a resolução do problema do sequenciamento dentro do dia, foi criada uma lógica dentro do *software* Excel da Microsoft, utilizando-se da ferramenta de otimização Solver, o qual possui ferramenta para otimização de problemas de programação linear e também não lineares, o qual era o caso do estudo.

A lógica criada baseia-se no princípio do *Heijunka*, entretanto a mesma não irá dividir ordens, ela irá somente redistribuir ao longo do dia visando reduzir os problemas gerados na operação de acabamento.

Conforme citado no item 2.8.2, o Solver utiliza-se de um algoritmo genético, o qual encontra uma solução muito próxima do ponto ótimo. Para isso foi criada uma equação, definindo assim uma função objetivo. Esta equação leva em consideração os seguintes aspectos:

- Variação de temperatura entre peças;
- Tempo de *setup* entre peças;
- Agrupamento de peças semelhantes (utilizam o mesmo macho);
- Pico de fila (em tempo) gerado no acabamento;
- Fila (em tempo) no final do dia para o acabamento;
- Restrição para não agrupar itens semelhantes que podem ser misturados no acabamento;
- Data de produção;
- Presença da quantidade de machos necessária para a ordem;
- Em algumas situações também pode ser considerado a taxa de consumo de metal (esporadicamente);

A equação para a função objetivo está descrita na

$$F = \sum_{k=1}^6 P_k$$

Equação 8. Equação da função objetivo (sequenciamento dentro do dia).

## Variáveis da

∴

F = Função objetivo

P = Valor da penalização

k = Número da penalização

Equação 9. Equação de penalização por tempo de *setup*

$$P_1 = W_1 * \sum S_{7,5}$$

Equação 10. Equação para penalização por fila no fim do dia no acabamento

$$P_4 = W_4 * \sum_{j=1}^3 \sum (Tm2)_j$$

Equação 11. Equação para penalização por variações de temperatura no forno

$$P_2 = W_2 * \sum_{i=10}^{100} \Delta t_i^{x_i}$$

Equação 12. Equação para penalização por tempo de *setup* na moldagem

$$P_5 = W_5 * \sum_{z=1}^n T_{setupDisa}$$

Equação 13. Equação para penalização por picos de fila no acabamento

$$P_3 = W_3 * \sum_{j=1}^3 t_j P S_j$$

Equação 14. Equação para penalização por desagrupamentos na moldagem

$$P_6 = W_6 * \sum N_{fam}$$

- Variáveis das equações 9 a 14:

P<sub>1</sub> = Penalização por *setup* completo na moldagem (máquina de moldar + célula robotizada)

P<sub>2</sub> = Penalização por variações de temperatura no forno

P<sub>3</sub> = Penalização por picos de fila no acabamento

P<sub>4</sub> = Penalização por fim do dia com fila no acabamento

P<sub>5</sub> = Penalização por tempo de *setup* na moldagem

P<sub>6</sub> = Penalização por desagrupamentos na moldagem

W<sub>1</sub> = Peso utilizado para P<sub>1</sub>

W<sub>2</sub> = Peso utilizado para P<sub>2</sub>

W<sub>3</sub> = Peso utilizado para P<sub>3</sub>

W<sub>4</sub> = Peso utilizado para P<sub>4</sub>

W<sub>5</sub> = Peso utilizado para P<sub>5</sub>

W<sub>6</sub> = Peso utilizado para P<sub>6</sub>

i = Variação de temperatura entre peça atual e próximo item (vide Tabela 1)

x = Expoente que varia conforme a variação da temperatura (vide Tabela 1)

j = Linha de rebarbação (1 = 01260034; 2 = 01260035; 3 = 01260036)

$z$  = Número da ordem na moldagem

$S_{7,5}$  = *Setup* realizado com tempo de 7,5 min. (completo)

$t$  = Fila máxima no acabamento para o dia (em tempo)

PS = Peso para a linha

$T_{m2}$  = Tempo de fila no final do turno programado

$T_{setupDisa}$  = Tempo de *setup* na moldagem para cada ordem

$N_{fam}$  = Número de vezes que uma família de itens semelhantes foi desagrupada na moldagem

(1)	(2)	(1)	(2)
0		10	
0		20	
0	1	30	
0	4	40	
00	7	100	

Tabela 1. Expoentes utilizados na Equação 11.

<sup>1</sup> Variação de temperatura entre item atual e próximo a ser produzido

<sup>2</sup> Expoente “x” para Equação 11.

\* Devido a maior facilidade em baixar a temperatura no forno, os expoentes para variações negativas são muito menores.

A lógica do *software* é baseada em um algoritmo genético, ou seja, irá encontrar uma solução próxima do ponto ótimo. Então visando aumentar as alternativas e também as chances de encontrar uma melhor solução, foi criada uma lógica na mesma planilha que realiza o sequenciamento cinco vezes, e disponibiliza a informação para o operador, facilitando a escolha.

Operacionalmente, a planilha será comandada pelo próprio preparador da fábrica, o qual será responsável por consultar o relatório de produção do dia, salvar na planilha, realizar as considerações necessárias das condições do dia (por exemplo: pouco metal disponível), e então aguardar a mesma fornecer as cinco opções das melhores sequências realizadas, conforme ilustrado na Figura 21.

O operador irá utilizar seu critério para selecionar entre os resultados disponíveis, de agrupamento de peças semelhantes, tempo de fila no acabamento, variações na temperatura de

vazamento, tempo de *setup* na moldagem, número de desagrupamentos de ordens e o valor da função objetivo.

Desta forma é possível verificar qual é a melhor condição do dia para toda a fábrica, tanto a operação de moldagem, quanto as demais, como vazamento e acabamento.

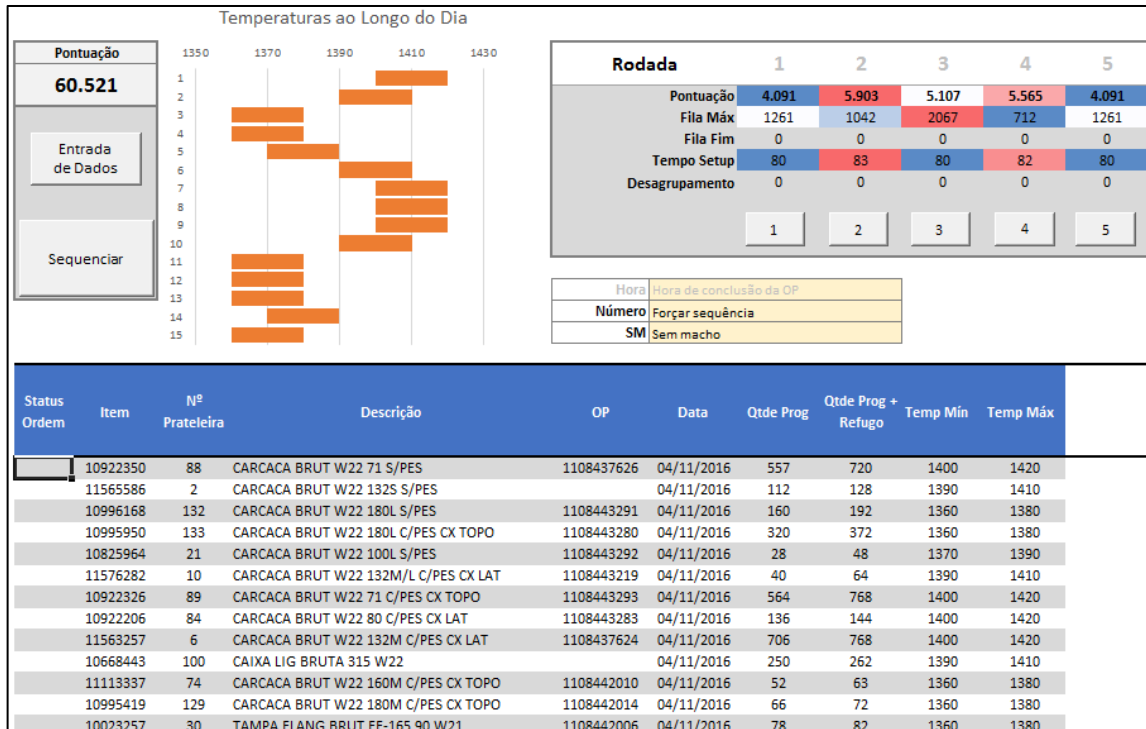


Figura 21. *Layout* da planilha utilizada e informações disponíveis para o operador  
Fonte: Autoria própria.

### 3.4.2 Sequenciamento entre dias

Para o sequenciamento entre dias foi elaborada uma lógica de sequenciamento também utilizando a ferramenta de otimização Solver do Microsoft Excel, o qual, conforme citado anteriormente utiliza-se de um algoritmo genético, o qual encontra uma solução muito próxima do ponto ótimo. Para isso foi criada uma equação, definindo assim uma função objetivo, conforme descrito na Equação 15.

Esta equação leva em consideração os seguintes aspectos:

- Desvio padrão na carga máquina diária;
- Possibilidade de troca de ordens entre dias dentro da mesma semana, sem a quebra das mesmas;

Foi limitado a análise de troca das ordens apenas dentro da semana devido a complexidade de resolução do problema pelo *software*. Neste equacionamento cada ordem representa uma variável, e na semana (para uma linha de moldagem) temos em média 150 ordens, isto daria  $5,7 * 10^{262}$  possibilidades diferentes. O *software* é limitado em 199 variáveis. Devido a esta quantidade de possibilidades o algoritmo genético se aplica muito bem para a resolução do problema.

A lógica criada baseia-se no princípio do *Heijunka*, entretanto a mesma não irá dividir ordens, ela irá somente redistribuir ao longo do dia visando reduzir os problemas gerados na operação de acabamento.

Equação 15. Equação da função objetivo (sequenciamento entre dias).

$$F = \sum_{k=1}^6 (DP_k * P_k) + \sum_{j=1}^n D_j$$

#### Variáveis da equação:

F = Função objetivo

DP = Desvio padrão em horas programadas por centro de trabalho

P = Peso para o desvio padrão de cada centro de trabalho

k = Número do centro de trabalho

D = Valor penalização para a data da ordem (Tabela 2)

n = Número da ordem

Data da ordem	Penalizacao
Ordem mantida no dia	0
Ordem adiantada	10
Ordem atrasada	100

Tabela 2. Valor de penalização para cada data de ordem modificada.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 22 demonstra uma interface criada para realizar a análise do sequenciamento entre dias, onde é possível acrescentar o relatório de produção da semana, então analisa-se a carga máquina diária por centro de trabalho, desde a macharia, moldagem até o acabamento, onde é possível comparar a carga máquina entre a programação gerada pelo SAP e a nova



programação gerada pelo *software*, e também o número de ordens que foram atrasadas, adiantadas ou se mantiveram no dia. O *software* realiza três simulações e seleciona-se a mais viável dentre as três.

Na Figura 22 é possível verificar como a carga máquina ficou bem mais nivelada, onde foi apenas adiantado 21 ordens da semana (20%). Este é um exemplo real da programação realizada pelo PCP comparada com a mesma realizada pelo *software*.

Data	
1º dia programação	01.09.2016
2º dia programação	05.09.2016
3º dia programação	06.09.2016
4º dia programação	08.09.2016
5º dia programação	09.09.2016

Executar 3 simulações

Nota final programação	532
------------------------	-----

Resumo das ordens						
Atrasadas	0					
Adiantadas	21					
No dia	102					

Relatório carga máquina - PREVISÃO SAP						
DATA	01.09.2016	05.09.2016	06.09.2016	08.09.2016	09.09.2016	
Macharia	1260012	0%	50%	52%	85%	99%
	1260001	17%	24%	75%	105%	134%
	1260013	0%	68%	80%	87%	96%
Moldagem	1260004	9%	47%	81%	85%	96%
Acabamento	1260034	16%	26%	49%	69%	110%
	1260035	3%	73%	110%	74%	66%
	1260036	0%	42%	39%	77%	92%

SAP						
Ordem	Material	Texto breve material	Qtd.oper.	Últ data fim execução	Nova Data convertida	
1107997058	10922602	CARCACA BR	176	05.09.2016	05.09.2016	
1107997281	11112580	CARCACA BR	140	05.09.2016	05.09.2016	
1108009825	10835817	CARCACA BR	390	01.09.2016	01.09.2016	
1108009832	11112536	CARCACA BR	210	05.09.2016	05.09.2016	
1108009834	10868963	CARCACA BR	293	01.09.2016	01.09.2016	
1108010025	11563561	CARCACA BR	500	05.09.2016	05.09.2016	
1108010028	11565586	CARCACA BR	290	05.09.2016	05.09.2016	
1108013733	11563561	CARCACA BR	600	06.09.2016	01.09.2016	
1108017619	11112672	CARCACA BR	105	06.09.2016	01.09.2016	
1108017660	11569890	CARCACA BR	632	06.09.2016	06.09.2016	
1108017671	10685746	TAMPA DIA	34	01.09.2016	01.09.2016	

Relatório carga máquina - NOVA PROGRAMAÇÃO						
DATA	01.09.2016	05.09.2016	06.09.2016	08.09.2016	09.09.2016	
Macharia	1260012	55%	57%	53%	57%	65%
	1260001	72%	69%	69%	74%	72%
	1260013	66%	68%	69%	59%	70%
Moldagem	1260004	64%	62%	67%	64%	61%
Acabamento	1260034	49%	47%	51%	58%	67%
	1260035	74%	62%	80%	65%	46%
	1260036	40%	55%	41%	48%	66%

Figura 22. Interface criada para analisar o sequenciamento entre dias  
Fonte: Autoria própria.

As linhas do acabamento 0035 e 0036 possuem peças que são intercambiáveis entre si, então o *software* analise a variação do desvio padrão da soma das duas.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE RESULTADOS

### 4.1 SEQUENCIAMENTO DENTRO DO DIA

Os resultados deste sequenciador das ordens do dia são possíveis ser verificados nos gráficos que estão descritos na sequência, onde observamos a redução na variação de temperatura entre ordens e o número de peças acumuladas em cada linha de rebarbação no acabamento.

No Gráfico 4 é possível verificar a variação de temperatura na operação de vazamento, onde há uma sequência realizada pelo método anterior comparada com o novo método (sequenciador). Verifica-se que há uma estabilidade muito maior ao longo do dia, com variações mais suaves, menores e em menor quantidade.

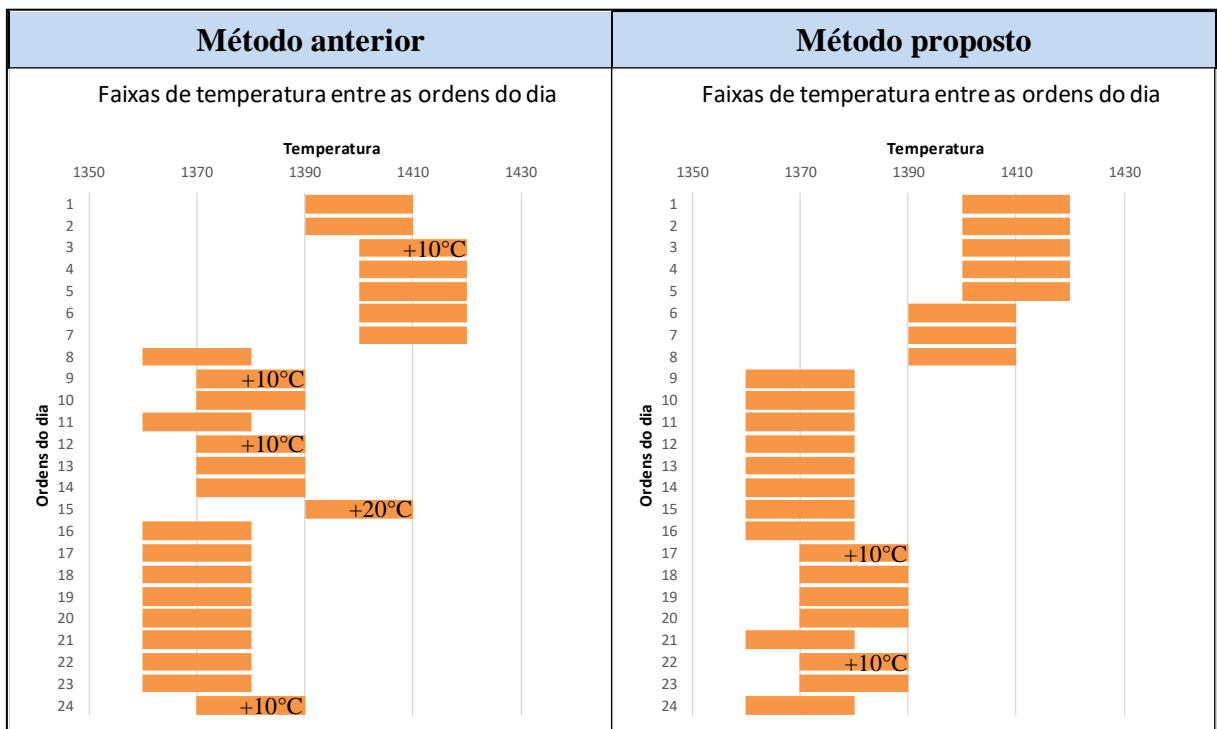


Gráfico 4. Variações de temperatura de vazamento ao longo do dia (Sequenciador x Critérios anteriores).  
Fonte: Autoria própria.

Destaque para as elevações de temperatura, as quais possuem maior impacto negativo para a produção do que a redução de temperatura.

Com uma menor variação de temperatura ao longo do dia, e as mesmas sendo mais suaves temos diversos ganhos operacionais e financeiros na operação de vazamento, como:

- Eliminação das paradas da moldagem devido a restrição de temperatura no forno;
- Menor consumo de energia elétrica para reaquecer o metal (destaque no Gráfico 4 as elevações de temperatura).

No Gráfico 5 é possível verificarmos a redução no número de peças acumuladas em cada linha de rebarbação do acabamento, tanto peças acumuladas em determinados momentos como também as peças acumuladas no final do dia devido a ociosidade presente no início do dia. Neste comparamos a situação anterior e após implementação do sequenciador.

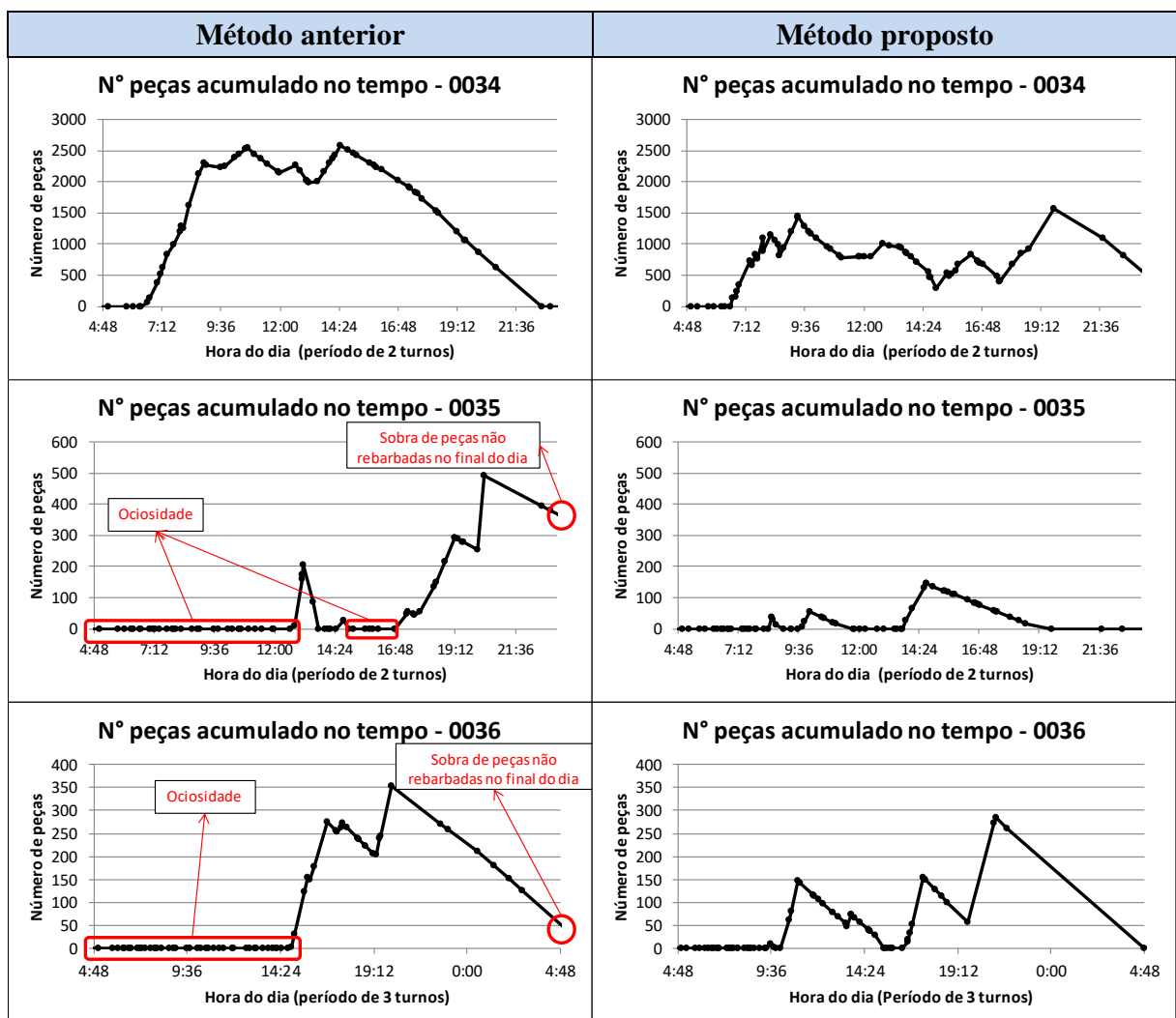


Gráfico 5. Número de peças acumuladas no acabamento (Sequenciador x Critérios anteriores).

Fonte: Autoria própria.

A lógica do algoritmo é para distribuir a carga máquina entre as linhas de moldagem, então verificamos que os picos diminuem de tamanho e se distribuem ao longo do dia. Com esta melhor distribuição de peças no acabamento, temos como ganhos:

- Nivelamento da produção ao longo do dia nas linhas de rebarbação;
- Melhor aproveitamento da mão de obra (redução dos tempos ociosos);
- Redução dos momentos com saturação de peças no pulmão do acabamento e consequente necessidade de retirada de peças do mesmo (

- );
- Redução dos picos de peças no acabamento. Para reduzirmos ainda mais estes picos seria necessário quebrarmos algumas ordens, sendo este o foco do *Heijunka*, entretanto isto será aplicado para o estado futuro 2, conforme demonstrado na

- .

## 4.2 SEQUENCIAMENTO ENTRE DIAS

Os resultados deste sequenciador das ordens da semana são possíveis ser verificados nos gráficos que estão descritos na sequência, onde observamos a redução no desvio padrão da carga máquina entre os dias e também a redução do número de picos de programação em alguns dias, os quais teoricamente a demanda não seria atendida. Foi realizada a análise para toda a cadeia, ou seja, desde a primeira operação de macharia até a operação de acabamento, tendo que não podemos produzir algo no acabamento sem que já tenha sido produzida nos processos anteriores.

Na

é possível compararmos uma programação realizada pelo PCP e outra realizada pelo *software*, e podem ser constatados alguns fatos, como:

- Menor número de dias com carga máquina superior a 100% (redução de 48% na média para todos os centros de trabalho e para o período analisado);
- Menor desvio padrão na carga máquina da semana, em cada centro de trabalho;
- Eliminação dos picos de carga máquina no acabamento (foco do estudo);

Também é possível verificar pontos relevantes do método desenvolvido, como:

- O *software* evita ao máximo atrasar ordens devido ao peso estabelecido, isto fica evidente nos pontos destacados na

- com o número 1. Verifica-se que o(s) primeiro(s) que já estavam com carga máquina acima de 100% permaneceram acima após o sequenciamento. Para reduzir esta carga máquina sem afetar o atendimento deveríamos quebrar algumas ordens destes dias, conforme é previsto pelo *Heijunka*. Isto será desenvolvido na implantação do Estado Futuro 2 demonstrado na Figura 20.

- Na semana 4 houve uma anomalia, com a programação de dois dias acima de três turnos para o centro de trabalho 0013 da Macharia. O *software* nivelou esta demanda para os dias da semana, distribuindo o problema igualmente entre os dias.

- Na semana 7, para o centro de trabalho 0013 da Macharia ainda houve um dia acima de 100% mesmo no meio da semana (número 3 destacados na

- ). Isto ocorreu devido a alta carga máquina da semana e foi inevitável, para melhorar seria necessário quebrar ordens.

		Carga máquina - PCP							Carga máquina - Revisado										
		Macharia			Mold.	Acabamento					Macharia			Mold.	Acabamento				
		Data	0012	0001	0013	0004	0034	0035	0036	Data	0012	0001	0013	0004	0034	0035	0036		
Semana 1	01.09.2016	0%	17%	0%	9%	16%	3%	0%	01.09.2016	55%	72%	66%	64%	49%	74%	40%			
	05.09.2016	50%	24%	68%	47%	26%	73%	42%	05.09.2016	57%	69%	68%	62%	47%	62%	55%			
	06.09.2016	52%	75%	80%	81%	49%	110%	39%	06.09.2016	53%	69%	69%	67%	51%	80%	41%			
	08.09.2016	85%	105%	87%	85%	69%	74%	77%	08.09.2016	57%	74%	59%	64%	58%	65%	48%			
	09.09.2016	99%	134%	96%	96%	110%	66%	92%	09.09.2016	65%	72%	70%	61%	67%	46%	66%			
Semana 2	12.09.2016	65%	95%	99%	73%	78%	30%	83%	12.09.2016	65%	95%	99%	73%	78%	30%	83%			
	13.09.2016	50%	92%	89%	77%	73%	8%	84%	13.09.2016	64%	92%	89%	80%	73%	8%	92%			
	14.09.2016	92%	88%	100%	78%	89%	35%	96%	14.09.2016	78%	93%	100%	77%	91%	35%	88%			
	15.09.2016	51%	98%	98%	84%	86%	38%	73%	15.09.2016	51%	98%	98%	84%	86%	38%	73%			
	16.09.2016	36%	98%	100%	67%	70%	6%	86%	16.09.2016	36%	93%	100%	66%	69%	6%	86%			
Semana 3	19.09.2016	119%	72%	82%	82%	58%	77%	82%	19.09.2016	119%	89%	97%	91%	73%	77%	91%			
	20.09.2016	103%	93%	107%	94%	67%	45%	84%	20.09.2016	103%	86%	92%	88%	60%	45%	75%			
	21.09.2016	28%	81%	99%	69%	61%	25%	51%	21.09.2016	28%	87%	99%	74%	77%	25%	51%			
	22.09.2016	44%	101%	89%	79%	106%	20%	69%	22.09.2016	44%	85%	80%	72%	83%	20%	69%			
Semana 4	26.09.2016	28%	85%	86%	61%	65%	6%	69%	26.09.2016	53%	85%	122%	76%	65%	23%	92%			
	27.09.2016	56%	82%	98%	63%	70%	20%	72%	27.09.2016	56%	82%	119%	68%	70%	21%	81%			
	28.09.2016	60%	59%	148%	74%	33%	68%	79%	28.09.2016	51%	59%	107%	62%	33%	53%	62%			
	29.09.2016	88%	43%	83%	56%	26%	18%	81%	29.09.2016	71%	47%	113%	57%	27%	15%	89%			
	30.09.2016	25%	44%	182%	64%	30%	35%	93%	30.09.2016	25%	40%	136%	55%	30%	35%	68%			
Semana 5	03.10.2016	51%	119%	92%	73%	72%	45%	59%	03.10.2016	64%	119%	82%	85%	75%	49%	65%			
	04.10.2016	53%	97%	70%	81%	85%	22%	59%	04.10.2016	72%	97%	84%	87%	82%	46%	65%			
	05.10.2016	87%	98%	83%	79%	76%	51%	77%	05.10.2016	75%	98%	83%	72%	76%	33%	78%			
	06.10.2016	92%	58%	101%	69%	52%	52%	96%	06.10.2016	72%	58%	87%	58%	52%	42%	82%			
Semana 6	10.10.2016	43%	50%	95%	57%	49%	15%	64%	10.10.2016	74%	67%	95%	73%	59%	21%	82%			
	11.10.2016	75%	81%	63%	68%	37%	38%	68%	11.10.2016	72%	82%	88%	73%	43%	42%	76%			
	13.10.2016	77%	62%	79%	78%	59%	67%	75%	13.10.2016	71%	69%	79%	74%	59%	57%	75%			
	14.10.2016	94%	105%	100%	74%	80%	27%	99%	14.10.2016	72%	79%	74%	58%	63%	27%	71%			
Semana 7	17.10.2016	96%	81%	83%	87%	68%	86%	73%	17.10.2016	96%	89%	104%	93%	72%	86%	82%			
	18.10.2016	64%	86%	96%	86%	78%	47%	81%	18.10.2016	69%	86%	96%	88%	78%	52%	81%			
	19.10.2016	59%	98%	104%	94%	103%	83%	64%	19.10.2016	59%	91%	97%	91%	99%	83%	62%			
	20.10.2016	92%	82%	113%	86%	71%	57%	102%	20.10.2016	87%	82%	100%	81%	71%	51%	96%			
Semana 8	24.10.2016	56%	77%	84%	66%	57%	42%	64%	24.10.2016	66%	77%	84%	71%	57%	50%	64%			
	25.10.2016	71%	65%	72%	61%	67%	43%	56%	25.10.2016	71%	81%	72%	69%	74%	49%	56%			
	26.10.2016	82%	97%	94%	68%	63%	37%	91%	26.10.2016	76%	91%	94%	64%	59%	33%	91%			
	27.10.2016	73%	90%	96%	81%	68%	57%	78%	27.10.2016	68%	80%	96%	71%	65%	48%	78%			
	28.10.2016	55%	68%	79%	54%	45%	43%	56%	28.10.2016	55%	68%	79%	54%	45%	43%	56%			

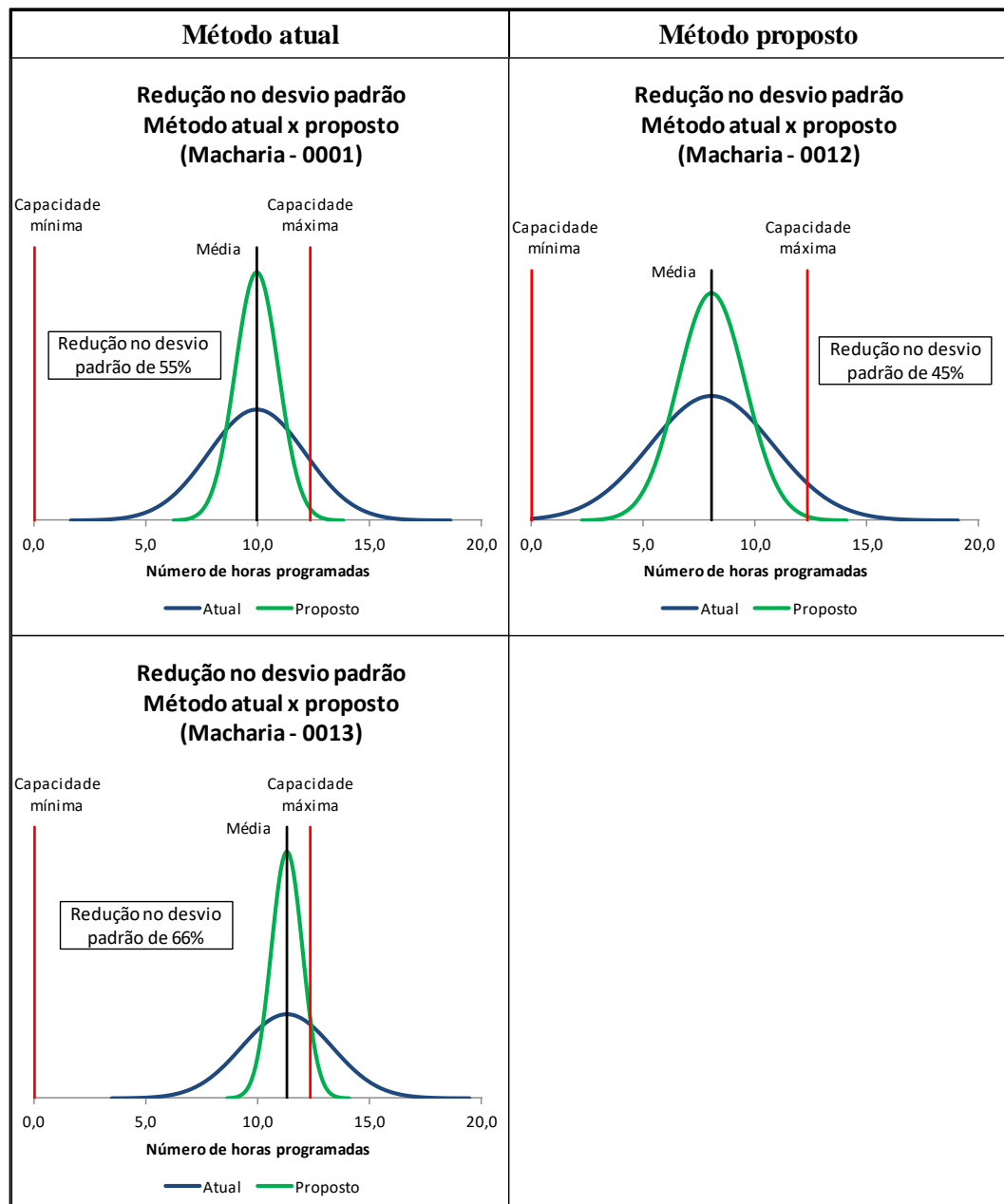
Tabela 3. Tabela comparativa da carga máquina entre os dias das semanas analisadas (PCP x Software).  
Fonte: Autoria própria.

Outro resultado positivo deste nivelamento da programação está no desvio padrão entre dias da semana, o qual foi possível reduzir em média 39%, mesmo considerando todos os centros de trabalho envolvidos para a produção dos itens. Nos **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e Gráficos 7 fica bem evidenciado esta redução.

Conforme citado anteriormente, para melhorar e reduzir ainda mais este desvio padrão entre os dias de programação seria necessário quebrar algumas ordens e também aumentar o horizonte de uma semana. Isto será analisado no estado futuro 2 demonstrado na

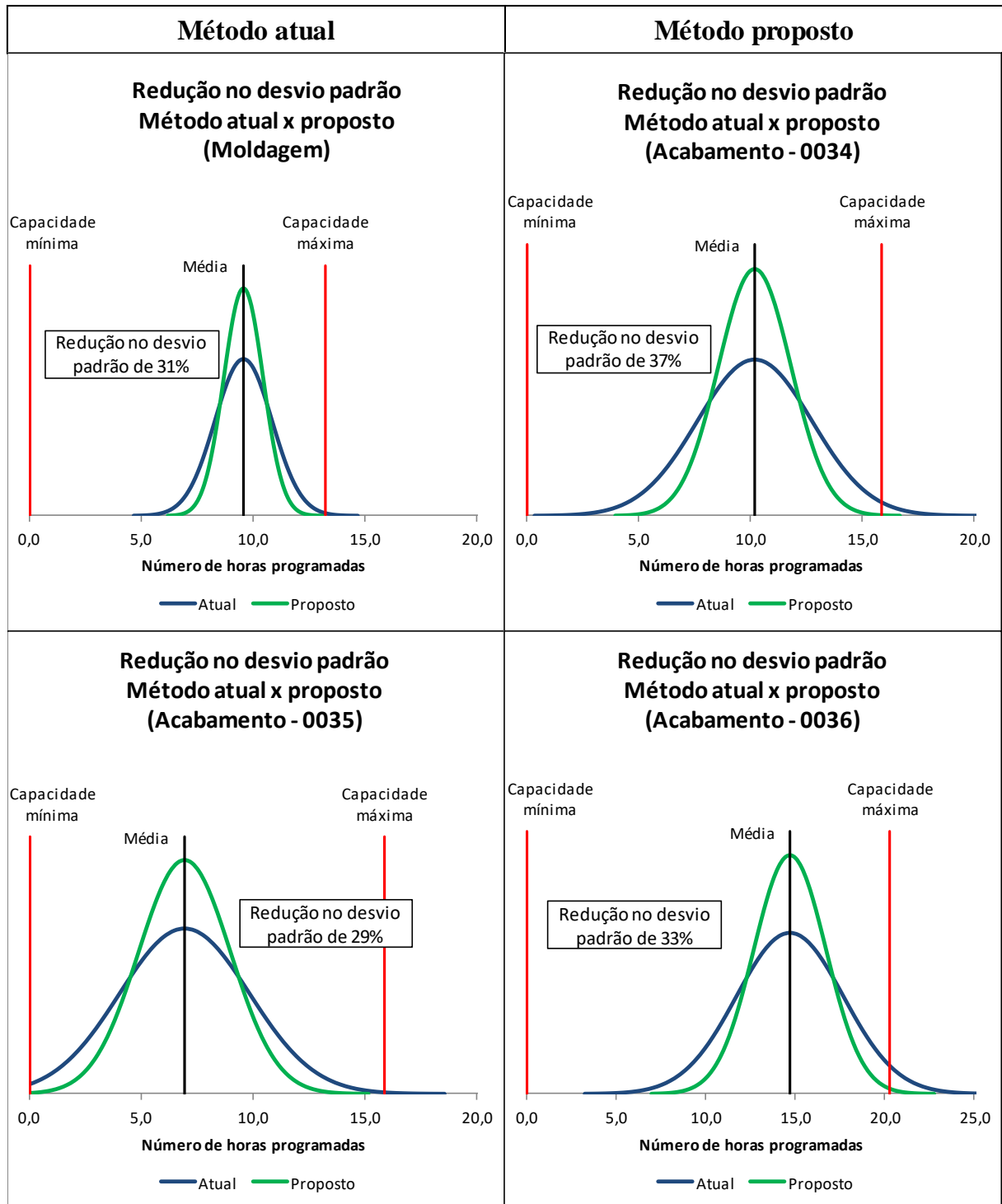


, que estará na sugestão para trabalhos futuros.



Gráficos 6. Gráficos comparativos entre o desvio padrão entre o método atual (PCP) e o proposto (*software*) – MACHARIA.

Fonte: Autoria própria.



Gráficos 7. Gráficos comparativos entre o desvio padrão entre o método atual (PCP) e o proposto (*software*) – MOLDAGEM e ACABAMENTO.

Fonte: Autoria própria.

Através da análise do desvio padrão apresentado nos **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e Gráficos 7 fica mais evidente o excesso de capacidade do acabamento, e com a redução deste desvio poderá ser possível a redução da capacidade do mesmo, aproximando carga máquina média da capacidade máxima.

A redução da capacidade do acabamento é basicamente reduzir o número de colaboradores para a operação, o que irá impactar diretamente no custo do produto. O número de colaboradores que seria possível reduzir está calculado no item 4.2.1.

Um ponto negativo deste sequenciamento entre dias é o fato de adiantarmos algumas ordens para podermos nivelar a produção. Isto implicará em um aumento de estoque dentro da semana. Para esta situação em estudo foram adiantadas 10,3% das ordens, variando de 1 a 4 dias, isto impactaria em um aumento médio no estoque de aproximadamente R\$ 290.000,00, representado R\$ 40.000,00 ao ano de custo, considerando 14% a taxa de perda de oportunidade.

Entretanto pelo fato de não quebrarmos ordens, evitamos um custo de *setup* nas etapas anteriores, como Moldagem e Macharia. Na

apresentamos o MFV do estado futuro 1, onde prevemos trabalhos para redução do tempo de *setup* nestas operações, facilitando assim a próxima etapa do estudo que será a análise da quebra de ordens visando um melhor nivelamento entre as etapas produtivas, citado no item 0.

#### 4.2.1 Avaliação na redução de mão de obra do acabamento após implantação do sequenciamento

Para avaliação da mão de obra do Acabamento realizamos a análise individual por centro de trabalho, onde respeitam-se as condições citadas no item 1, e também é realizado um balanceamento da linha para todos os itens que são trabalhados.

O centro de trabalho 0034 possui duas etapas de trabalho, chamadas de “Rebolo” e “Martetele”, com 44 itens diferentes.

O centro de trabalho 0035 possui seis etapas de trabalho, chamadas de “Posicionar”, “Rebolo”, “Martetele 1”, “Martetele 2”, “Massa” e “Pendurar peças”, com 41 itens diferentes.

O centro e trabalho 0036 é um centro automatizado com um robô de rebarbação, onde possuímos três etapas, chamadas de “Posicionar”, “Rebolo” (esta é a operação do robô) e “Martetele”. Após a última operação as peças são direcionadas para o mesmo posto de trabalho de “Pendurar peças” do centro 0035. Este centro de trabalho possui 20 itens diferentes.

Obs.: Todos os itens rebarbados no centro de trabalho 0036 são possíveis de serem rebarbados no centro 0035, então considera-se que não há nenhum dia em que o centro 0035 fica acima de 100% de carga máquina. O número de horas disponíveis de cada centro de trabalho está descrito na

Para realizar este balanceamento foram considerados todos os itens produzidos em cada linha, calculado o balanceamento para cada item considerando o número de operadores fixos em cada posto de trabalho e realizado uma média ponderada para cada item analisado (demanda, sobre capacidade, desbalanceamento e ineficiência operacional).

O Gráfico 8 demonstra o balanceamento das linhas de rebarbação para a situação atual. Verificamos que:

- Para o centro 0034 temos um bom balanceamento da linha e alta sobre capacidade (aprox. 35%).
- Para o centro 0035 temos bom balanceamento para as 4 primeiras operações, com um desbalanceamento relativamente elevado para as duas últimas e uma sobre capacidade extremamente elevada (aprox. 50%);
- Para o centro 0036 temos como gargalo em todos os itens o robô de rebarbação e com um grande desbalanceamento entre as demais operações. Este centro possui baixa sobre capacidade, isto ocorre devido ao fato de que quando ocorre um excesso de demanda para o mesmo as peças são direcionadas para o centro 0035.

Esta alta sobre capacidade verificada em cada centro de trabalho ocorre devido a necessidade de super dimensionar a capacidade de cada centro para atender aos picos de demanda que ocorrem entre os dias de programação (Gráfico 3).

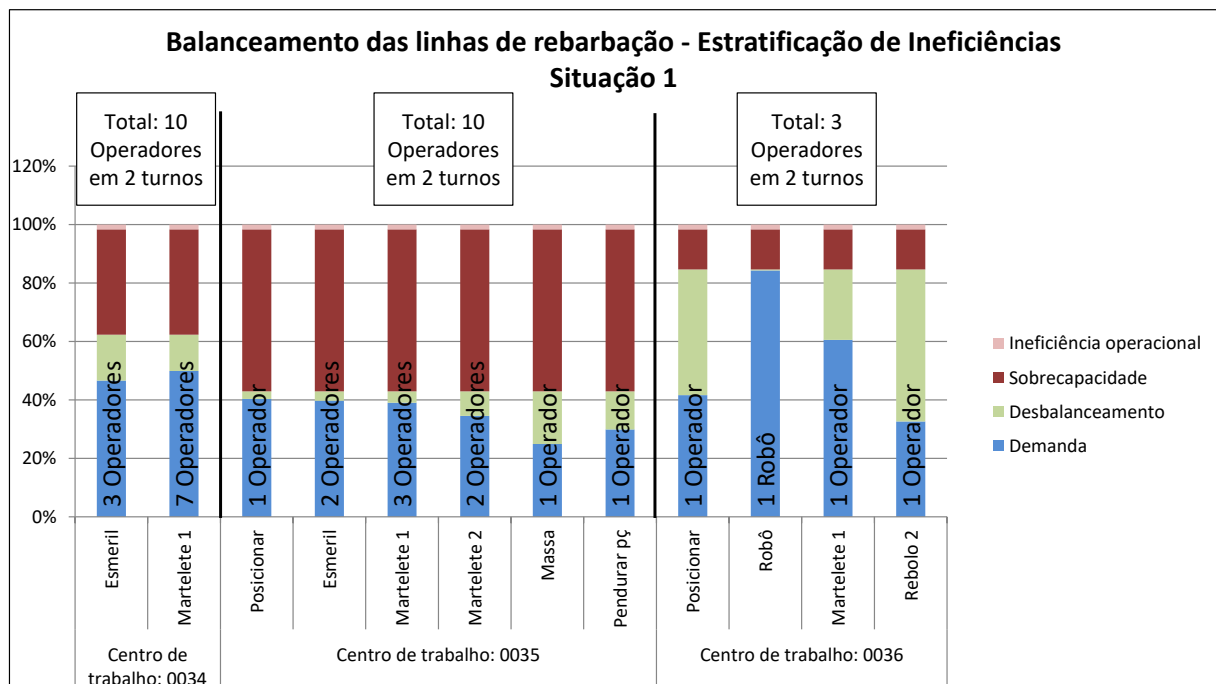


Gráfico 8. Balanceamento das linhas de rebarbação – Situação atual.

Fonte: Autoria própria.

Com a redução do desvio padrão na programação poderemos reduzir a capacidade de cada centro, reduzindo assim a sobre capacidade. Realizando-se um rebalanceamento das linhas visando a carga máquina média permanecer abaixo de 90% teríamos um novo cenário, demonstrado no Gráfico 9.

Com a nova distribuição de operadores teríamos um maior desbalanceamento de cada linha, verificado no Gráfico 9, para reduzir este desbalanceamento será necessário reestruturar o centro de trabalho visando a realocação de atividades entre cada operação visando reduzir este desperdício.

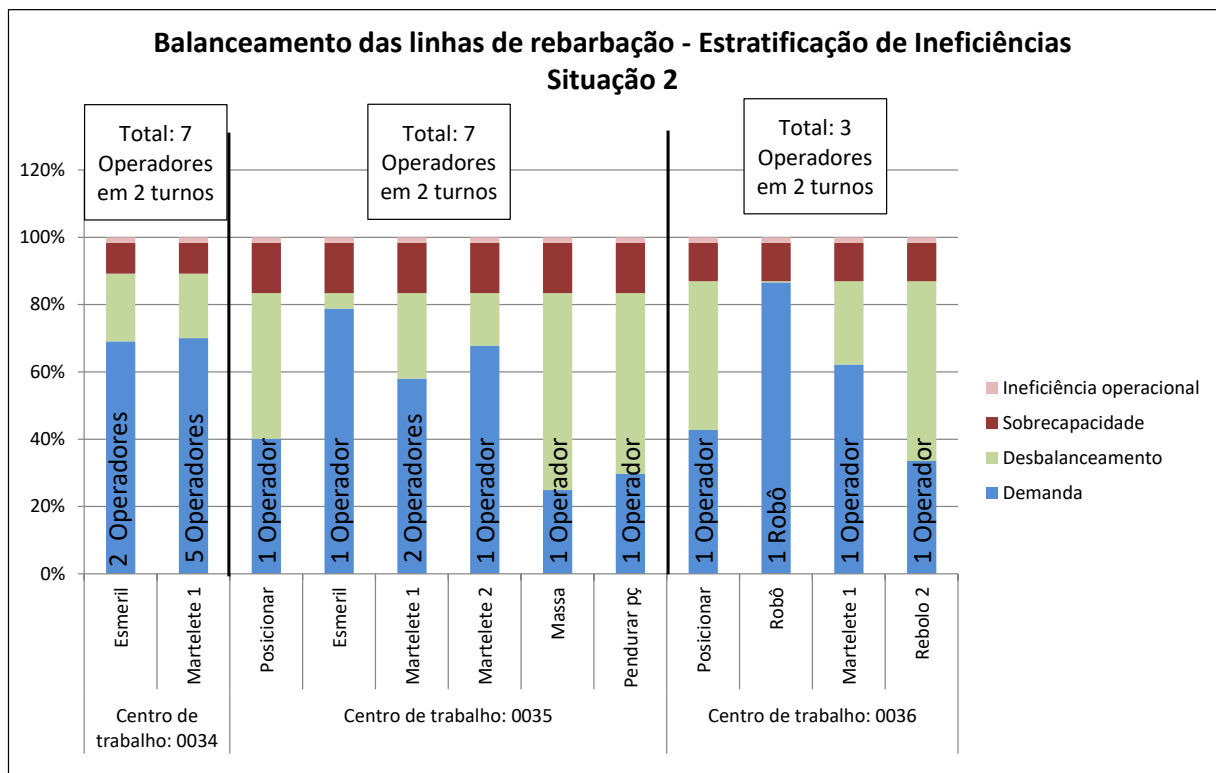


Gráfico 9. Balanceamento das linhas de rebarbação – Situação proposta.  
Fonte: Autoria própria.

Verifica-se, comparando-se o Gráfico 8 com o Gráfico 9, que seria possível reduzirmos de 46 para 34 colaboradores nestes centros de trabalho (26%) o que representa um impacto direto no custo de fabricação do produto.

Obs.1: Não está considerada a redistribuição de atividades, isto causaria um impacto positivo ainda maior.

Obs.2: Para possibilitar o cenário do Gráfico 9 seria necessário reduzir o desvio padrão da carga máquina entre dias para abaixo de 5%.

### 4.3 RESUMO DOS GANHOS POTENCIAIS DO TRABALHO

A realização do sequenciamento entre dias e dentro do próprio dia gerou um potencial grande na redução dos desperdícios existentes. O resumo dos ganhos está descrito na Tabela 4. Não foram mensurados financeiramente os ganhos devido ao sigilo da informação da empresa.

Problema abordado	Local	Descrição do impacto
<b>Problema 1: Sequenciamento dentro do dia</b>	Forno vazador ✓	Menor número de vezes que necessita elevar a temperatura Variações mais suaves na temperatura, conseqüente eliminação das paradas na moldagem devido a necessidade de aguardar o forno ajustar a temperatura
	Acabamento ✓	Menor acúmulo de peças no acabamento e conseqüente necessidade de retirada das mesmas no fluxo normal (pulmão) e manutenção do FIFO
		Nivelamento da produção dentro do dia
		Redução do número de horas com ociosidade
<b>Problema 2: Sequenciamento entre dias</b>	Macharia ✓	- Redução do número de dias com carga máquina acima de 100%; - Redução no desvio padrão na carga máquina entre dias;
	Moldagem ✓	
	Acabamento ✓	Eliminação dos dias com carga máquina acima de 100%
Acabamento ✓	Redução no número de colaboradores necessários para a mesma produção	
	Geral ✗	Aumento do custo de estoque

Tabela 4. Resumo dos ganhos do trabalho.

Fonte: Autoria própria.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### Objetivos propostos x resultados obtidos

- Estudo das referências bibliográficas que abordem problemas semelhantes e estudo de metodologias baseadas no *Lean Manufacturing* para o sequenciamento da produção:
  - Foi realizada a pesquisa com o foco em quais ferramentas melhor se enquadram para a solução dos problemas citados e como outros pesquisadores já trataram problemas semelhantes. O nivelamento da produção nasceu com o STP, conhecido por Heijunka (NIIMI, 2004), entretanto para aplicarmos na plenitude a ferramenta do *Heijunka*, por exemplo, devemos preparar as áreas para que seja possível sua implementação sem que cause maiores perdas.
- Estudo de lógicas de programação que permitam selecionar melhores soluções possíveis para o sequenciamento, dentro do dia e entre os dias:
  - Foi estudado como outros pesquisadores trabalharam sobre problemas semelhantes, e verificou-se que a melhor lógica para a solução de um problema complexo, como o abordado, é a utilização de algoritmo genético, onde existem comparativos de resultados com diferentes lógicas utilizadas para solução do mesmo problema mostrando que o algoritmo genético é o mais viável considerando-se tempo para encontrar a solução e a qualidade da mesma.
- Realizar um mapeamento do fluxo de valor para mensurar os problemas gerados:
  - O MFV foi realizado e também foi proposto dois cenários futuros, visando possibilitar a implantação o *Heijunka* no futuro e então caminhar rumo a uma produção mais enxuta sem os desperdícios criados pelo desnivelamento da produção.
- Realizar um resumo de resultados da lógica estudada.
  - Realizado resumo dos ganhos na Tabela 4.

### ✓ Conclusões

Existem diversos processos de fundição, cada um com suas restrições, restrições estas que devem ser obedecidas para garantirmos a qualidade das peças fundidas. Devido a este grande número de restrições no processo a programação da produção se torna complexa, a qual em geral é definida de forma macro pelo PCP (visão apenas de uma operação gargalo) e a produção é definida pelo grupo de trabalho do chão de fábrica. Entretanto, devido a



complexidade dos processos envolvidos é difícil obtermos uma condição ótima de sequenciamento.

Neste trabalho foi desenvolvido um método de sequenciamento da produção utilizando-se de uma ferramenta do *software* Microsoft Excel, o Solver, o qual é baseado em um algoritmo genético para encontrar uma solução próxima do ponto ótimo. Foi aplicada para otimizar a programação entre os dias (atualmente realizada pelo PCP) e também o sequenciamento das ordens do dia. Esta ferramenta apresentou como benefícios:

- Programação entre dias:

Nivelamento da carga máquina na cadeia produtiva entre os dias, reduzindo o desvio padrão da carga máquina, podendo assim reduzir os desperdícios de excesso na capacidade das últimas etapas do processo.

- Sequenciamento do dia:

A lógica criada para o sequenciamento entre dias obedeceu todos os critérios existentes na operação crítica da fábrica (Moldagem) ainda otimizando os recursos da cadeia, mantendo uma temperatura de vazamento sem variações bruscas e ainda nivelando a fila nas linhas de rebarbação.

Tanto a programação entre dias quanto o sequenciamento do dia apresentaram bons resultados mantendo o número de ordens existentes (criadas pelo PCP), entretanto os desperdícios ainda se mantiveram, mas em menor tamanho. Para direcionar para a eliminação por completo destes desperdícios seria necessário quebrar as ordens, aumentando o número de preparações, possibilitando assim o nivelamento da carga máquina entre todas as etapas do processo.

Quanto maior o número de restrições do processo, mais complexo é encontrar uma solução ótima para a programação e sequenciamento, mais difícil é encontrar uma solução que satisfaça a todos, e sempre haverá alguma restrição do processo que deverá ser penalizada para que tenhamos um bom resultado. No item 0 temos uma sugestão para trabalhos futuros, visando utilizar uma quantificação monetária para cada restrição não atendida, facilitando a escolha do que será penalizado.

Uma forma de minimizar a quantidade de restrições para otimização da programação e sequenciamento é termos apenas um conceito de linha de rebarbação, onde a mesma pode ser flexível o bastante para produzir qualquer tipo de produto, esta é a base do STP, a flexibilidade. Com isso reduziríamos significativamente as restrições facilitando a programação e redução dos desperdícios citados no trabalho.

Como citado no item 0, o problema de sequenciamento não deve ser analisado apenas entre dias, mas também dentro do próprio dia e é tão importante quanto, para evitarmos a saturação de peças no pulmão existente. De nada adiantaria realizarmos o sequenciamento entre dias sem favorecermos a condição para o acabamento dentro do próprio dia.

### **Próximos passos**

Criar um valor monetário para cada restrição. A lógica criada utilizou o critério para minimização de uma nota determinada pelo corpo técnico, entretanto, para realmente otimizar o processo, deveria ser criado um valor monetário para cada situação, e assim então minimizar o custo total das operações.

Continuar as etapas definidas no MFV, futuro 1 e futuro 2, visando reduzir os impactos da quebra de ordens na moldagem e macharia.

Realizar estudo do impacto da quebra de ordens na operação de moldagem, visando reduzir o desvio padrão na programação do acabamento para abaixo de 5%, viabilizando o ganho contabilizado no item 4.2.1.

Após reduzido o desvio padrão na carga máquina do acabamento para 5%, realizar um novo balanceamento das linhas de rebarbação, redistribuindo atividades e melhorando o balanceamento das linhas.

Realizar um estudo para implementação de um sistema de APS (*Advanced Planning and Scheduling*), o qual é um sistema desenvolvido para otimização da programação e sequenciamento da produção em situações complexas, como é o caso do estudo.

## REFERÊNCIAS

ALVAREZ, Roberto dos Reis; ANTUNES JUNIOR, José Antonio Valle. Takt-time: conceitos e contextualização dentro do sistema Toyota de produção. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 8, n. 1, p.1-18, abr. 2001.

ALVIZE, Amarildo; SILVEIRA, Rafael Dala Brida da – **Metodologia de gerenciamento do projeto de uma fundição de ferro cinzento**. Monografia – Especialização Engenharia de Fundição – Instituto Superior Tupy . Joinville, 2007.

AMERICAN FOUNDRY SOCIETY (Eua). **Introduction to gray cast iron processing**. Schaumburg: American Foundry Society, 2013. 97 p.

ARAUJO, Silvio Alexandre de; ARENALES, Marcos Nereu. **Planejamento e programação da produção numa fundição cativa automatizada de grande porte**. Inv. Op., Lisboa, v. 24, n. 2, p. 197-210, dez. 2004.

DESENHO ESQUEMÁTICO DE UMA FUNDIÇÃO. Disponível em: <<http://www.kriergroup.co.za/forge-and-foundry/complete-foundry/>>. Acesso em: 17 nov. 2016

FURMANS, K. (2005). Models of Heijunka-levelled Kanban-Systems. In: C.T. Papadopoulos (Ed.): 5TH International Conference on Analysis of Manufacturing Systems – Production and Management, Zakynthos Island: Greece, p243 – 248.

INSTITUTE FOR PROSPECTIVE TECHNOLOGICAL STUDIES. **Integrated pollution prevention and control**: draft reference document on best available techniques in the smitheries and foundries industry. Seville: European Ippc Bureau, 2004

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear**: modelos e algoritmos. 5. ed. Rio de Janeiro: Editora Campus Ltda, 2000. 648 p.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R.; TANSCHKEIT, R. **Conceitos fundamentais da teoria de conjuntos fuzzy, lógica fuzzy e aplicações**. Disponível em: <<ftp://calhau.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/gudwin/publications/ifsa95.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2016.

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa operacional**: na tomada de decisões. 4. ed. Rio de Janeiro: Editora Campus Ltda, 2007. 226 p.

LANDMANN, R. **Um modelo heurístico para a programação da produção em fundições com utilização da lógica Fuzzi**. 2005. 207 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia da Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

LANDMANN, R. et al. Programação da produção em empresas metalúrgicas com utilização de algoritmo genético. **XXVI ENEGEP**, Fortaleza, out. 2006.

LIKER, J. K. **Toyota Way: 14 management principles from the world's greatest manufacturer**. New York: Mcgraw-hill Education, 2004. 366 p.

MACHADO, I. **Processos de fundição e sinterização (metalurgia do pó)**. Introdução à Manufatura Mecânica – PMR. 2004. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/Processos%20de%20Fundição%20e%20Sinterização.pdf>>. Acessado em: 22/11/2016.

MARTINS, P. G.; LAUGENI, F. P. **Administração da produção**. 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2005. 575 p.

MOREIRA, M.; LEBRÃO, S. M. G. **Ferros fundidos**. Disponível em: <<http://www.dalmolim.com.br/educacao/materiais/bibliomat/fofo.pdf>>. Acessado em: 22/11/2016.

NIIMI, A. (2004). **Sobre o nivelamento (heijunka)**. Disponível em: <[http://www.lean.org.br/comunidade/artigos/pdf/artigo\\_109.pdf](http://www.lean.org.br/comunidade/artigos/pdf/artigo_109.pdf)>. Acesso em 15 out. 2016.

OHNO, T. **O sistema Toyota de produção** – além da produção em larga escala. Bookman, Porto Alegre: Bookman, 1996. 139 p.

PEINADO, J.; GRAEML, A. R. **Administração da produção: operações industriais e de serviços**. Curitiba: Unicemp, 2007. 748 p.

REZENDE, S. O. **Sistemas Inteligentes: fundamentos e aplicações**. Barueri: Editora Manole Ltda., 2005. 527 p.

RIGNEL, D. G. de S.; CHENCI, Gabriel Pupin; LUCAS, Carlos Alberto. Uma introdução a lógica Fuzzi. **Revista Eletrônica de Sistemas de Informação e Gestão Tecnológica**, Franca, v. 1, n. 1, p.17-28, out. 2011.

ROTHER, M.; SHOOK, J. **Aprendendo a enxergar**: mapeando o fluxo de valor para agregar valor e eliminar o desperdício. São Paulo: Lean Institute Brasil, 1999. 102 p.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSON, R. **Administração da produção**. 2. ed. São Paulo: Editora Atlas S.a., 2002. 733 p.

SYSTEMS, F. **Excel solver – evolutionary solving method stopping conditions**. Disponível em: <<http://www.solver.com/excel-solver-evolutionary-solving-method-stopping-conditions>>. Acesso em: 14 out. 2016.

\_\_\_\_\_. **Excel solver – limitations on non-smooth optimization**. Disponível em: <<http://www.solver.com/excel-solver-limitations-non-smooth-optimization>>. Acesso em: 14 out. 2016.

TEIXEIRA JUNIOR, R. F.; BENEDINI, L. Aplicação de um sistema de planejamento e programação avançados (APS) em fundições dirigidas ao mercado. **Enegep**, Salvador, out. 2009. Anual.

TUBINO, D. F. **Planejamento e controle da produção**: teoria e prática. São Paulo: Editora Atlas S.a., 2007. 190 p.