

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO**

**UMA ABORDAGEM HEURÍSTICA PARA O
PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO
EM FUNDIÇÕES – ESTUDO DE CASO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Edson Inácio Wobeto

Santa Maria, RS, Brasil

2008

FOLHA DE FICHA CATALOGRÁFICA /DADOS DE PROPRIEDADE INTELECTUAL

© 2008

Todos os direitos autorais reservados a Edson Inácio Wobeto. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser com autorização por escrito do autor.
Endereço: Av. Frederico Linck, 784, ap 24, Bairro Rio Branco, Novo Hamburgo, RS, 93336-001

Fone (0xx)51 3273-9780, Cel (0xx)51 9901-8959; email: edsonwobeto@gmail.com

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**UMA ABORDAGEM HEURÍSTICA PARA O
PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO
EM FUNDIÇÕES – ESTUDO DE CASO**

elaborada por
Edson Inácio Wobeto

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia de Produção

COMISSÃO EXAMINADORA:

**FELIPE MARTINS MÜLLER, Dr.
(Presidente/Orientador)**

**OLINTO CÉSAR BASSI DE ARAUJO, Dr.
(UFSM - POLITECNICO)**

**HAROLDO GAMBINI SANTOS, Dr.
(UFRJ)**

Santa Maria, 30 de junho de 2008.

DEDICATÓRIA

A todos que acreditaram em mim.

A todos que me apoiaram.

Em especial a minha esposa Carla e
meus filhos William e Murilo.

AGRADECIMENTOS

A *Deus*, por ter me dada força para superar as longas jornadas de estudo e trabalho, e por ter guiado meus passos.

Ao *Prof. Dr. Felipe Martins Muller*, pela oportunidade dada e pelos conhecimentos transmitidos.

Ao *Dr. Olinto Araújo*, pela paciência e ensinamentos que direcionaram a elaboração desse trabalho.

Ao *Sr. Alberto Duailibe* e ao *Sr. Leandrus Ribas dos Santos* pelo apoio e amizade que garantiram a realização do trabalho.

Ao *Sr. Paulo e Dejamir*, entre outros que forneceram os conhecimentos e informações necessárias para a realização do estudo de caso.

A todos amigos que fiz durante a realização do mestrado, pelas horas de estudo compartilhadas e pelo apoio mútuo.

Novamente aos *meus filhos e esposa*, pelo apoio e compreensão com minha ausência.

Aos meus *pais e irmãos e demais familiares* que auxiliaram nos momentos difíceis.

A todos que de uma forma direta ou indireta contribuíram para a realização desse trabalho.

EPÍGRAFE

Viva a Vida, pois ela é bela.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
Universidade Federal de Santa Maria

UMA ABORDAGEM HEURÍSTICA PARA O PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO EM FUNDIÇÕES – ESTUDO DE CASO

AUTOR: EDSON INÁCIO WOBETO
ORIENTADOR: FELIPE MARTINS MÜLLER
DATA E LOCAL DA DEFESA: SANTA MARIA, 30 DE JUNHO DE 2008.

O presente trabalho tem por objetivo propor métodos de otimização da produção para uma fundição de mercado de médio porte. Dada as peculiaridades da empresa utilizada como estudo de caso, diferentemente de outros trabalhos nesta área, a presente pesquisa enfoca a programação da produção baseada na programação das máquinas da macharia e da moldagem. A programação dos fornos não representa gargalo no processo produtivo em estudo, no entanto, a capacidade dos mesmos é levada em conta no momento da confecção dos métodos de otimização. O modelo proposto considera a programação de tarefas em máquinas paralelas com famílias de *setup* dependente da seqüência. Para resolver o problema assim definido é utilizada uma meta-heurística GRASP. Os resultados computacionais demonstram que é possível melhorar significativamente o procedimento de programação da produção utilizado atualmente na fundição estudo de caso.

Palavras Chaves: sequenciamento da produção; máquinas paralelas; GRASP

ABSTRACT

The main objective of this work is to propose optimization methods of the production to a medium size market foundry industry. Taking into consideration the peculiarities of the enterprise used as case study, on the contrary of many other works in this area, the present research is focused in the production programming which is based in the *“macharia”* (*it is a mold made of sand which serves to give shape to the final piece*) and molding machines programming. The kilns programming do not represent a delay in the productive process which has been studied, however, their capacity is taken into consideration during the production of the optimization methods. The proposed model considers the programming of tasks in parallel machines with families set up dependent of the sequence. In order to solve the problem it is used a “meta-heurística” GRASP. The computing results show that it is significantly possible to improve the procedure of the production programming nowadays used in the foundry industry case study.

Keywords: scheduling; parallel machines; GRASP

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Composição química de uma peça.....	51
TABELA 2 – Ordens de Produção.....	75
TABELA 3 – Tarefas a serem produzidas pela Macharia.....	78
TABELA 4 – Ordenação das tarefas a serem inseridas na LRC	78
TABELA 5 – Passo 1 do Algoritmo 0/1-INTERCHANGE.....	80
TABELA 6 – Passo 2 do Algoritmo 0/1-INTERCHANGE.....	80
TABELA 7 – Tempo de produção após o término da iteração	82
TABELA 8 – Tarefas Ordenadas – Cura Fria.....	83
TABELA 9 – Resultados da fase construtiva – Cura Fria.....	85
TABELA 10 – Resultados da fase de busca local – Cura Fria	85
TABELA 11 – Ordens de Produção da Moldagem	85
TABELA 12 – Lista de candidatos ordenados pela data de entrega	87
TABELA 13 – Testes dos parâmetros do GRASP.....	88
TABELA 14 – Sequenciamento da produção - Caixa Quente.....	90
TABELA 15 – Sequenciamento da produção – Cura Fria.....	90
TABELA 16 – Sequenciamento da produção para a Moldagem	91

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Processo produtivo de uma fundição.....	16
FIGURA 2 - Compactação de Areia na caixa de moldar.....	18
FIGURA 3 - Preparação da caixa de moldar.....	18
FIGURA 4 - Sistema de Entrada do metal e alimentação do molde.....	19
FIGURA 5 - Vista transversal de um molde de fundição ..	20
FIGURA 6 - Processo produtivo da Fundição estudada.....	38
FIGURA 7 - Tela do Sistema ERP.....	42
FIGURA 8 - Ordem de Produção para Macharia.....	44
FIGURA 9 - Ordem de Produção da Moldagem.....	49
FIGURA 10 - Linha de produção em processo de vazamento.....	50
FIGURA 11 - Painel de vazamento.....	54
FIGURA 12 - Máquina de Desmoldagem.....	55
FIGURA 13 - Processo produtivo da macharia.....	57
FIGURA 14 - Fluxograma de produção do processo de cura fria.....	60
FIGURA 15 - Processo produtivo Caixa Quente.....	62
FIGURA 16 - Processo produtivo Moldagem.....	64
FIGURA 17 - Representação gráfica da solução encontrada pelo CPLEX.....	73
FIGURA 18 - Pseudocódigo GRASP.....	74
FIGURA 19 - Pseudocódigo do algoritmo construtivo.....	76
FIGURA 20 - Pseudocódigo do Algoritmo 0/1-INTERCHANGE.....	77
FIGURA 21 - Gráfico de Gantt com sequenciamento das tarefas.....	79
FIGURA 22 - Resultado da programação das máquinas.....	82

SUMÁRIO

RESUMO	7
LISTA DE TABELAS	9
LISTA DE FIGURAS	10
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Processo Produtivo das Fundições	16
1.2 Estrutura do Trabalho	22
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1 PCP	24
2.2 Programação da Produção	28
2.3 Sequenciamento da Produção	29
2.4 Problemas de sequenciamento em Máquinas Paralelas Idênticas.....	34
2.5 Trabalhos Específicos no Setor de Fundições.....	35
3 ESTUDO DE CASO	38
3.1 Descrição do Processo Produtivo	38
3.1.1 Departamento Comercial.....	39
3.1.2 PCP	39
3.1.3 Modelaria.....	43
3.1.4 Macharia.....	43
3.1.5 Moldagem.....	48
3.1.6 Fusão	50
3.1.7 Vazamento	53
3.1.8 Desmoldagem	54
3.1.9 Quebra de canal.....	55
3.1.10 Demais Processos	55
3.2 Descrição do Problema	56
3.2.1 Primeiro Estágio - Macharia	56
3.2.2 Segundo Estágio - Moldagem	63
3.3 Objetivo do Trabalho	67
3.4 Metodologia Utilizada	67
3.5 GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure)	68
3.6 EDD (Earliest Due Date)	69

4 DESENVOLVIMENTO DA HEURÍSTICA	70
4.1 Modelo Matemático	70
4.2 Implementação do GRASP	74
4.3 Implementação do GRASP na Macharia	77
4.3.1 Implementação do GRASP na Macharia - Caixa Quente.....	78
4.3.2 Implementação do GRASP na Macharia – Cura Fria.....	83
4.4 Implementação do GRASP na Moldagem	85
5 RESULTADOS COMPUTACIONAIS	88
6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	92
BIBLIOGRAFIA	93
ANEXO A	96
ANEXO B	98

1 INTRODUÇÃO

As fundições pertencem ao ramo da indústria de manufatura e estão presentes em todas as regiões do Brasil. O processo de dar formas aos metais através da fundição é milenar, onde resumidamente, os metais são submetidos a uma temperatura crescente, passando do estado de sólido para líquido. Segundo Campos e Davies (1978), a formação da peça se dá através da solidificação de metais líquidos, que são derramados na cavidade de um molde com o formato desejado.

Quanto à produção, existem dois tipos de fundições, que são conhecidas como fundições cativas e fundições de mercado. As fundições cativas são as mais encontradas no Brasil, segundo fontes da Associação Brasileira de Fundição (ABIFA). Elas são parte de uma empresa ou de um grupo de empresas, ou até mesmo podem ser consideradas como um departamento destas, cujo destino de sua produção é para o consumo próprio. Seus produtos são feitos em série e em grande quantidade. As fundições de mercado produzem exclusivamente para terceiros, tendo assim vários clientes e uma alta variedade de produtos. Esta variedade de produtos, bem como, a necessidade de atender vários clientes com diferentes prioridades tornam o processo de produção mais complexo do que nas fundições cativas.

Os relatórios da ABIFA mostram que, em abril de 2008 o setor empregava mais de 60.500 pessoas, e produziu 298.485 toneladas/mês, tendo um crescimento acumulado nos últimos doze meses acima de 8 % e de 12,48% nos últimos trinta e seis meses.

Como pode ser verificado, existe um crescente aumento da demanda por produtos fundidos nos últimos anos, e um dos motivos para isso é o bom momento vivenciado pela economia nacional, principalmente das áreas automotivas e agrícolas, que são os principais clientes das fundições.

O aumento da demanda bem como, a competitividade a nível mundial, estimula as fundições a tornarem seus processos produtivos mais eficientes, de forma a racionalizar e otimizar o uso dos mesmos, objetivando o aumento de produtividade com redução de custos e a entrega de produtos de qualidade, no prazo certo.

Segundo Araújo (2003) “o gerenciamento da produção é responsável pela coordenação de todas as atividades do processo produtivo, desde a aquisição das matérias-primas até a entrega dos produtos”, cabendo o setor de Planejamento e Controle da Produção (PCP) um papel fundamental no que tange a programação da produção, de forma a tornar os processos produtivos mais eficientes.

Existem várias técnicas utilizadas na programação da produção, sendo que grande parte delas estão inseridas nos sistemas informatizados, que auxiliam no gerenciamento da produção. Dentre elas, as mais tradicionais são: MRP II (Manufacturing Resource Planning), OPT (Optimized Production Technology) e JIT (Just-In-Time).

Por parte das fundições, existe a necessidade de investimentos em sistemas informatizados de gestão da produção, que auxiliem no planejamento da programação da produção. Necessidade essa evidenciada por Fernandes e Leite (2002), que fizeram uma pesquisa em 30 fundições de mercado, pertencentes aos cinco principais pólos do interior do estado de São Paulo. O motivo dessa necessidade é o crescimento das fundições de mercado nos últimos anos, sendo que prática gerencial baseada apenas no bom senso e na experiência do administrador de processos não tem sido suficiente para garantir um bom planejamento da produção.

A maioria das fundições de mercado, de médio e grande porte, possuem sistemas informatizados que auxiliam no planejamento da produção e na tomada de decisão, mas em geral são sistemas de gestão ERP/MRP, que tem por finalidade gerenciar a aquisição de mercadorias e o estoque, gerar o planejamento mestre da produção. Segundo Landmann (2005), o sistema produtivo das fundições é orientado para processos, onde os cálculos utilizados pela lógica MRP (Materials Requirements Planning) não se adequam devidamente. Com isso, o planejamento fino que é gerado com base no planejamento mestre, em geral é falho para o planejamento da produção em fundições, restando para ao programador da produção fazer os ajustes necessários. Estes sistemas são desenvolvidos para serem aplicados em diversos tipos de empresas, com diferentes ambientes produtivos, possuindo assim um certo grau de generalizações, não sendo muitas vezes eficaz para tratar as características específicas de determinados problemas das empresas. O estudo de caso evidenciará este fato, bem como as dificuldades

que o programador da produção tem ao fazer os ajustes necessários no planejamento da produção.

Pelas particularidades do sistema de produção das fundições, explicado posteriormente, onde a etapa da fusão possui características de um sistema de produção contínua, sendo que o mesmo tem a necessidade de uma sincronia com a etapa da moldagem, que opera em lotes e que por seguinte requer que a produção dos machos sejam feitos antecipadamente pela macharia, que também opera em lotes, o processo programação da produção é uma tarefa extremamente difícil.

Para a resolução do problema da produção, mais especificamente para o problema do sequenciamento da produção envolvendo as etapas da moldagem e da macharia, o presente trabalho tem por objetivo modelar e propor métodos de solução para a programação de produção em uma fundição de mercado, sendo este considerado como um problema de flow shop multi-estágio, que será decomposto em dois problemas de máquinas paralelas. A formulação do problema se dá através de um estudo de caso, bem como os resultados encontrados são comparados com o planejamento da produção da empresa estudada.

Existem diversos tipos de problemas de programação da produção, sendo que os principais tipos referenciados pelos pesquisadores, como Baker (1974), são: o problema de máquinas paralelas, o problema de *job shop*, o problema de *flow shop* e o problema de uma máquina. O enfoque do trabalho será em máquinas paralelas com famílias de setup.

Um ambiente é caracterizado como sendo de Máquinas Paralelas quando existe mais de uma máquina disponível para execução de uma dada tarefa, podendo ser essas máquinas idênticas ou não, sendo que o objetivo é encontrar uma alocação de todas as tarefas nas máquinas existentes que otimize um determinado critério. No caso desse trabalho o critério será o de minimizar o atraso total juntamente com a minimização do *makespan* (tempo máximo de finalização).

Já flow shop com máquinas múltiplas, segundo Fuchigami (2005), as tarefas são processadas em múltiplos estágios e em cada um deles há máquinas paralelas. As tarefas são processadas por apenas uma máquina em cada estágio.

O problema de sequenciamento da produção (scheduling) é definido como um problema de programação da produção que consiste em: dado um planejamento preestabelecido, sequenciar determinadas tarefas em uma ou várias máquinas, de forma a otimizar uma função objetivo (por exemplo, minimizar o tempo de processamento). As decisões tomadas aqui são de curto prazo ou, ainda, de nível operacional (ARAÚJO, 2003).

Para Müller (1993), pode-se definir a área de sequenciamento como sendo “a área de pesquisa que busca a alocação ótima de recursos, no decorrer do tempo, a um conjunto de tarefas ou atividades”, ou seja, o sequenciamento revela quando e a onde as tarefas vão ser executadas. A maioria dos problemas de sequenciamento são matematicamente de difícil resolução, pois a explosão combinatória decorrente da necessidade de se examinar as várias alternativas de sequenciamento existentes nestes problemas, tornar a tarefa de obter uma solução ótima ou o mais próximo dela extremamente custosa. Devido a isso, o trabalho irá utilizar a modelagem matemática para mapear a função objetivo e as suas restrições, facilitando assim o entendimento do mesmo e após irá utilizar métodos que fornecem soluções de boa qualidade para propósitos práticos. Esses métodos são chamados de heurísticas e de meta-heurísticas.

1.1 Processo Produtivo das Fundições

O processo produtivo de uma fundição de mercado, em geral, possui a composição abaixo descrita e pode ser visualizado na **Figura 1**.

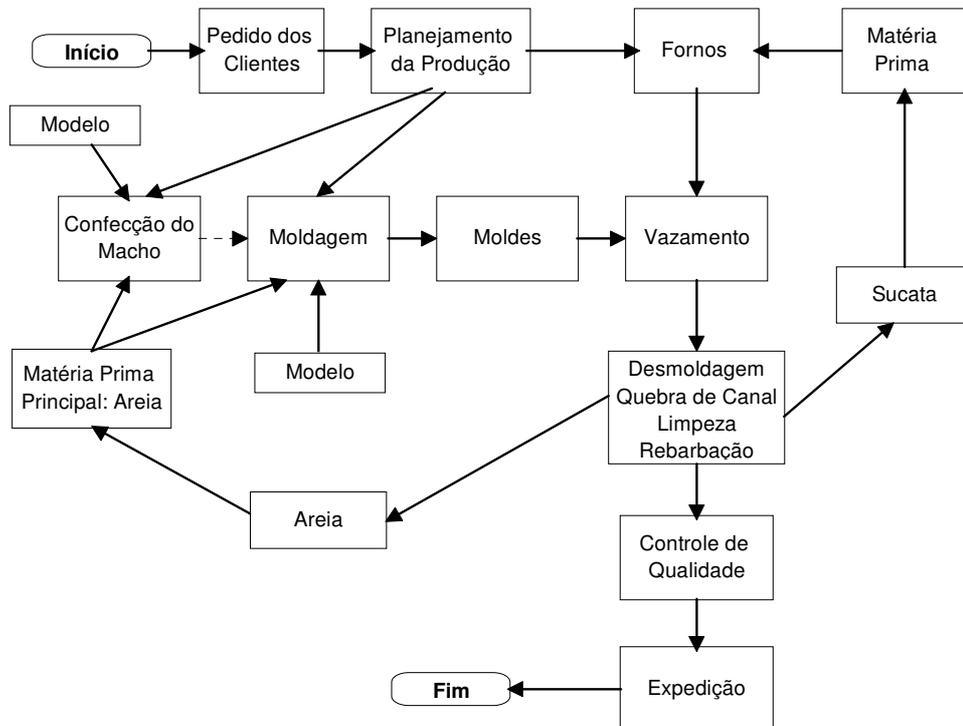


Figura 1: Processo produtivo de uma fundição
Fonte: Adaptação de Araújo e Arenales (2003)

O setor responsável pelo planejamento da produção recebe os pedidos dos clientes, gera as ordens de produção para: setor responsável pela confecção do macho, setor responsável pela moldagem das peças e para o setor responsável pela fusão.

Cada peça precisa ter um modelo, que pode ser confeccionado em madeira, metal ou outros materiais. A partir da confecção do modelo é possível de se fazer o molde. Existem vários processos de confecção de um molde, os mais conhecidos são: moldagem em areia e molde permanente. Na moldagem em areia, processo utilizado pela fundição no estudo de caso apresentado neste trabalho, constrói-se um molde para cada peça a ser fundida e, subsequente, ele é rompido para que possa ser removido o fundido. O molde permanente é utilizado na fundição sob pressão, onde o mesmo será utilizado, repetidas vezes, na produção de uma determinada peça. Após a produção, a peça será removida com cuidado, sem danificar o molde.

A confecção do molde é feita através da compactação de areia em torno do modelo. Esta compactação é feita nas máquinas de moldagem (**Figura 2**) e dentro de uma caixa de moldar, como pode ser visto na **Figura 3**. Em geral o molde é feito em duas partes: uma superior e outra inferior. Se a peça, a ser fundida, possuir partes ocas deverá ser acrescentado os modelos denominados de machos, que serão colocados no interior da cavidade deixada pelo modelo da peça. Na primeira parte do molde é juntado o molde mais a areia, em geral através de pressão, formando assim a parte inferior da caixa. Na segunda parte, será juntado o(s) macho(s) requerido(s) pela peça, da mesma forma como ocorreu na primeira parte, formando assim a parte superior da caixa. Após a confecção do molde, o modelo que serviu para dar a forma da peça desejada é retirado da caixa de moldar. O conjunto (molde/machos) é unido, grampeado.

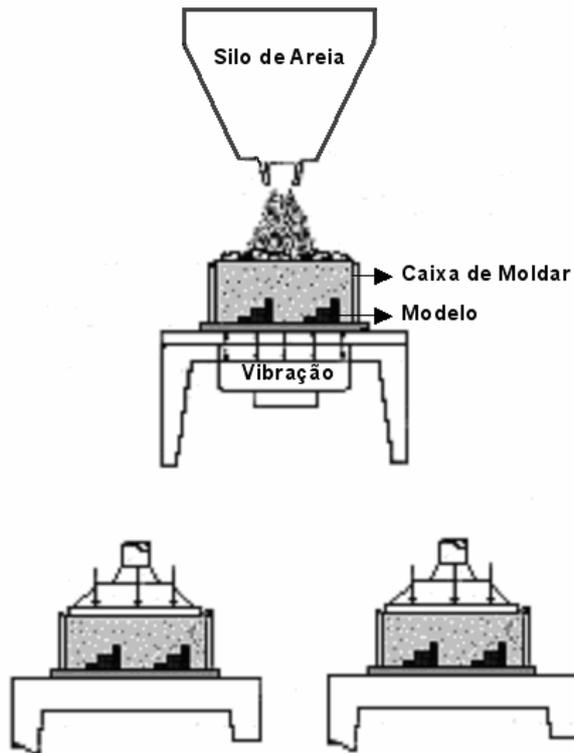


Figura 2: Compactação de Areia na caixa de moldar.
Fonte: Adaptação de Machado (2002)

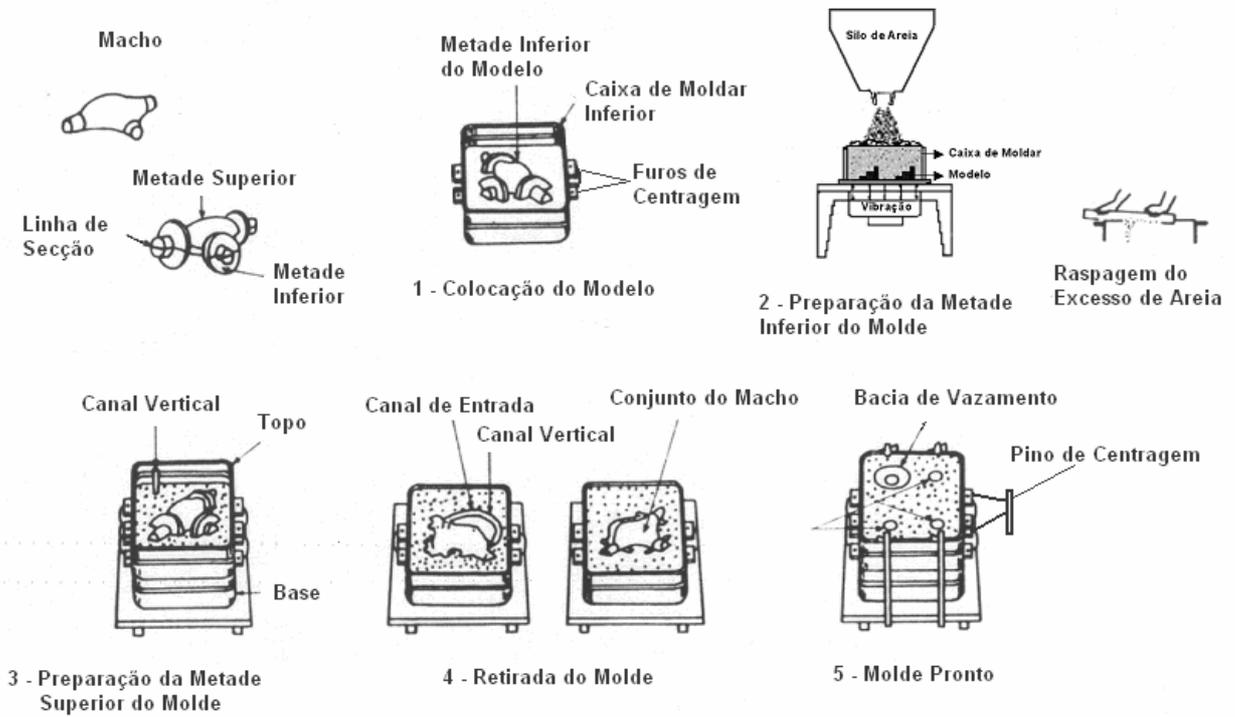


Figura 3: Preparação da Caixa de Moldar.
Fonte: Adaptação de Agostinho, Villela e Button (2004).

Os machos normalmente são de areia aglomerada com resina, fabricados antecipadamente, por processos diversos, conhecidos genericamente como “macharia”, que podem ser a quente ou a frio, e mantidos no estoque por um determinado tempo, pois possuem uma vida útil. Os tempos de setup na macharia freqüentemente são dependentes da seqüência, para tal o planejamento da produção deverá se ater ao tipo de processo de fabricação do macho, bem como se o mesmo possui ainda setup de família de processo.

Após o fechamento da caixa de moldar a mesma estará pronta para receber o metal líquido, que ocupa o espaço da cavidade, esta etapa é conhecida como vazamento. A provisão de metal é feita por meio de um sistema de canais de alimentação existentes no molde. Ao mesmo tempo, faz-se uma grande abertura rebaixada, denominada de bacia de vazamento, para facilitar a entrada do metal no molde. São abertos canais alargados para permitir que o metal escoe para fora da cavidade do molde após seu preenchimento, esses canais são conhecidos como massalotes ou montantes. As **Figuras 4 e 5** mostram o sistema de entrada do metal e alimentação do molde.

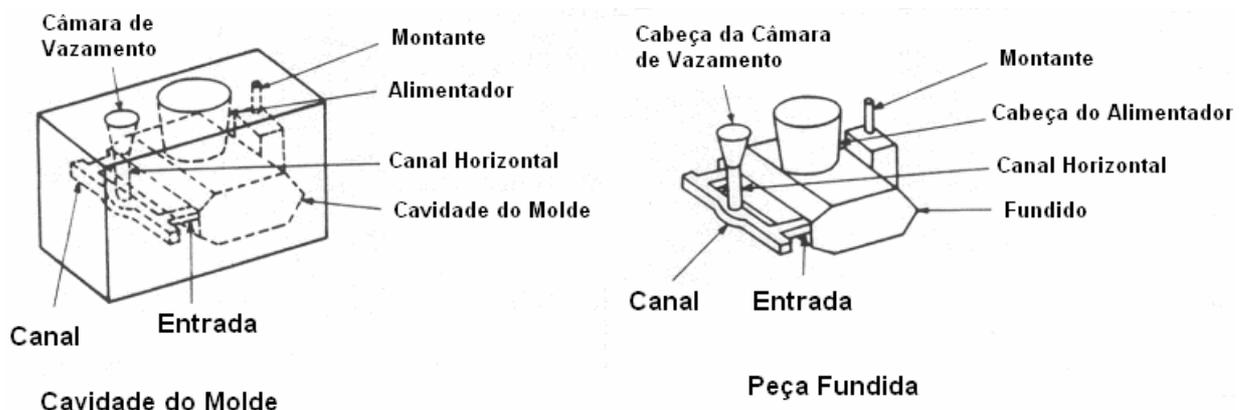


Figura 4: Sistema de Entrada do metal e alimentação do molde.

Fonte: Agostinho, Villela e Button (2004).

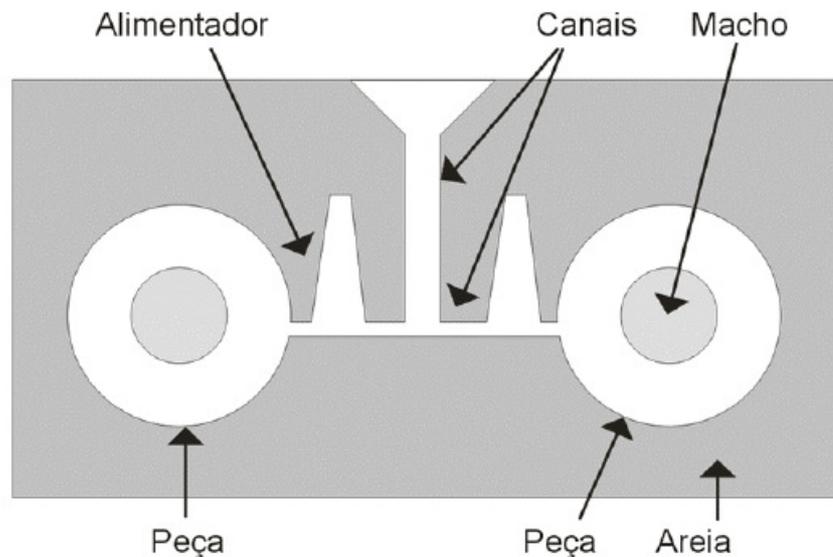


Figura 5: Vista transversal de um molde de fundição.

Fonte: Landmann (2005) que fez a adaptação de Siegel (1963).

A etapa que vem após o vazamento é conhecida como desmoldagem. Na desmoldagem a peça que está dentro da caixa de moldar é retirada, bem como a areia, que possivelmente ainda está quente, é separada das peças. As fundições equipadas dispõem de maquinários de desmoldagem especial. Antes de fazer essa retirada é necessário observar que cada peça possui um tempo mínimo para ser desmoldada, caso esse processo ocorra antes do mínimo previsto, a peça não atingirá a consistência necessária acarretando perda da mesma. Em geral a areia que sobra na desmoldagem volta para o processo de produção como matéria prima.

Para a retirada dos canais e alimentadores, que estão “solidificados” juntos às peças, será necessária uma força bruta conhecida como quebra de canal, onde a separação será feita através de impactos, podendo essa ser manual ou através de equipamentos. Antes da força bruta é necessário um pequeno corte no canal.

O processo de limpeza utiliza o jateamento de areia para remover os detritos de areia. Feito a limpeza da peça, a mesma irá passar pela rebarbação, momento no qual são retirados os excessos.

Nos processos, de molde permanente, são usados normalmente moldes metálicos que possuem os requisitos necessários para os sistemas de vazamento e alimentação. As dificuldades que envolvem a produção de moldes metálicos são responsáveis pelo alto custo dos processos que utilizam moldes permanentes.

O controle da qualidade das peças pode ser feito em vários momentos do processo, mas os dois principais momentos de verificação são após a limpeza, para

identificar se a mesma não sofreu nenhuma danificação durante a quebra de canal, e após a rebarbação, para verificar se a peça está dentro das especificações exigidas. As peças, que por algum motivo, não foram aprovadas pelo controle de qualidade, podem retornar para o processo de fusão como matéria prima. Já as peças aprovadas pelo controle de qualidade seguem para a expedição, onde podem ser encaminhadas aos clientes, ou podem passar por outros processos antes desse envio, tais como pintura e usinagem.

Segundo Agostinho, Villela e Button (2004), os tipos principais de fundição são:

- **Fundição em Areia:** utiliza-se a areia como material de moldagem. A areia deve ser previamente preparada através de homogeneização. A gravidade é usada para vazamento do metal líquido. O método mais simples de se conformar o molde é construí-lo manualmente. Esta é uma prática ainda comum para moldes grandes, ou quando estão sendo produzidas amostras de fundidos. Para produção em larga escala são adotados processos automáticos ou semi-automáticos, utilizando máquinas de moldagem. As perdas de material do molde são pequenas, já que a areia pode ser recuperada.
- **Fundição em Casca (*Shell Molding*):** para peças precisas usa-se resina fenólica para recobrir a areia. Pode ser usada onde haja necessidade de melhor acabamento superficial. Neste caso pode-se aplicar a moldagem manual ou mecanizada.
- **Fundição em Moldes Permanentes:** o processo é particularmente adequado para produção em larga escala de peças fundidas, pequenas e simples, sem rebaixos complexos ou partes internas intrincadas. Com moldes permanentes obtém-se bom acabamento superficial e alta definição de detalhes.
- **Fundição em Coquilha (Sob Pressão):** a fundição sob pressão em matriz metálica difere da fundição em molde permanente por ser mantida uma pressão positiva sobre o metal no interior do molde e durante a solidificação. A tolerância dimensional e a rugosidade superficial desse processo são melhores que em todos os outros. As matrizes são construídas de aço ferramenta de médio carbono, e com refrigeração interna a fim de prolongar sua vida. Podem ser obtidas peças com seções bastante finas, devido à injeção sob pressão.

- Outros Tipos de Fundição: Além dos citados, existem outros tipos de fundição tais como: fundição com cera perdida onde o modelo é feito de cera ou de plástico, que se desintegra quando da confecção do molde em sua etapa de queima para endurecimento; a fundição com molde cheio onde o modelo é feito de material combustível sólido ou material vaporizável (normalmente poliestireno expandido). O molde é conformado em tomo deste e o metal líquido é vazado sem a retirada do modelo, o qual vai se decompondo progressivamente até que o metal preencha totalmente o molde.

Os tipos de processos, bem como as vantagens de desvantagens de cada uma não são objetos de estudo dessa dissertação.

A fusão dos metais é feita em fornos de vários tipos e capacidade. Em geral os fornos podem ser elétricos, a carvão coque e óleo combustível. Os fornos possuem uma capacidade de produção, que é normalmente medida em toneladas produzidas por hora. Essa capacidade pode sofrer alterações, devido às jornadas de trabalho das empresas, bem como a disponibilidade de energia no caso dos fornos elétricos. Cada forno pode produzir somente um tipo de liga por vez. Segundo Landmann (2005) “Liga é a denominação atribuída á uma específica classe de metal, estabelecida em função das propriedades tecnológicas desejadas nas peças acabadas, normalmente determinadas pela sua composição química”.

1.2 Estrutura do Trabalho

O trabalho está organizado em cinco capítulos. No **Capítulo 2**, é feita uma abordagem dos temas relevantes à pesquisa, bem como uma revisão bibliográfica dos mesmos. No **Capítulo 3** é feita uma descrição do processo produtivo da fundição estuda, juntamente com a descrição do problema abordado, que serve para a construção do modelo matemático e para o desenvolvimento das heurísticas propostas. Com base nas descrições citadas é apresentado o objetivo do trabalho e a metodologia utilizada. Também é descrito o funcionamento da meta-heurística GRASP e da heurística EDD utilizadas na resolução do problema proposto. No **Capítulo 4**, é apresentado o modelo matemático para o problema proposto, bem como é feita a descrição da implementação das heurísticas e metas-heurísticas

propostas para a resolução do mesmo. No **Capítulo 5**, são apresentados os resultados computacionais. No **Capítulo 6**, é feita a conclusão e apresentação de propostas para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PCP

Para Tubino (2000), a definição de PCP é:

A atividade, em um sistema de manufatura, na qual se define metas e estratégias, formula planos para atingi-las, administra recursos humanos e físicos com base nestes planos, direciona a ação dos recursos humanos sobre os físicos e acompanha esta ação, permitindo a correção de prováveis desvios.

Para Slack et al. (1999) a função do PCP é de garantir que os recursos produtivos estejam disponíveis na quantidade, no momento e no nível de qualidade adequado. Slack et al, diz ainda que “a produção pode ser entendida, de forma ampla, como um processo de transformação envolvendo recursos de entrada (pessoal, maquinário e insumos em geral) para a geração de resultados como bens e serviços”.

Para ERDMANN (1998) o Planejamento e Controle da Produção (PCP), “é um sistema de informações que gerencia a produção, desde a obtenção e concepção dos dados de planejamento até a sua utilização no dia-a-dia, mediante a adoção de regras para o seu funcionamento, visando comandar o processo produtivo”.

Nos dias atuais, com a abertura dos mercados a nível mundial, é necessário que as empresas se tornem ou se mantenham cada vez mais competitivas, a fim de evitar a perda do seu mercado para empresas nacionais ou estrangeiras que tenham uma melhor organização e uma maior produtividade. Diante desse contexto, o Planejamento e Controle da Produção assumem um papel fundamental nas empresas, pois cabe a ele gerenciar os recursos produtivos de forma a atingir um elevado grau de produtividade, garantindo assim a competitividade necessária a este mercado globalizado.

Em geral o setor de Planejamento e Controle da Produção é um departamento que apóia a produção, vinculado a Gerência Industrial. Para Tubino (2000) este setor é responsável pela coordenação e aplicação dos recursos produtivos de forma a atender da melhor maneira possível os planos estabelecidos nos níveis estratégico, tático e operacional.

Para que o setor de PCP seja eficaz na execução de suas tarefas e consiga atingir os objetivos de coordenador é necessário que o mesmo administre as

informações advindas das diversas áreas do sistema produtivo. Segundo Tubino (2000), o fluxo de informações envolve basicamente todos os setores de uma empresa. O setor responsável pela Engenharia de Produtos confecciona a relação dos materiais necessários para a produção de um produto, que juntamente com os desenhos do mesmo, irão auxiliar ao setor responsável pela Engenharia de Processos no roteiro de fabricação. As vendas confirmadas pelo setor de Marketing irão gerar o plano mestre da produção, e ainda as necessidades de compras de matérias primas, bem como as contas a receber e a pagar. A necessidade de novos investimentos para atender a demanda, bem como, a necessidade de treinamento da mão de obra também são fatores importantes no sistema produtivo. Conforme pode ser visto, a necessidade de administrar as informações advindas de outros setores e do próprio PCP são fatores preponderantes ao sucesso de suas atividades.

Quanto ao horizonte de planejamento as tarefas do PCP estão divididas nos três seguintes níveis hierárquicos:

- No nível estratégico são definidas as políticas estratégicas de longo prazo da empresa e formulado o Planejamento Estratégico da Produção, gerando um Plano de Produção, com valores agregados de previsão de demanda. Neste nível são tomadas as decisões de compra de equipamentos, ampliação ou redução da capacidade produtiva, número de horas-homem disponíveis, número de horas máquina, definição do tipo de produto a ser produzido, implementação de novas tecnologias, entre outras.
- No nível tático são estabelecidos os planos de médio prazo para a produção e desenvolvido o Planejamento-Mestre da Produção, obtendo o Plano-Mestre de Produção (PMP), que leva em conta dados como: número de turnos, recursos humanos e horas disponíveis, entre outros, onde se equaciona a capacidade produtiva e informa a programação da fábrica.
- No nível operacional, onde são preparados, os programas de curto prazo de produção e realizados os acompanhamentos dos mesmos. Esse planejamento de curto prazo é chamado de Planejamento Fino da Produção. Cabe ao PCP, nesse nível, preparar a Programação da Produção administrando estoques, seqüenciando, emitindo e liberando as Ordens de Compras, Fabricação e Montagem, além de executar o Acompanhamento e Controle da Produção.

Com relação ao problema proposto pela dissertação, pode-se dizer que o mesmo enfoca os problemas de tomadas de decisão relacionados com o planejamento tático e operacional.

Landmann (2005) sintetiza a ordenação das atividades do PCP nos seguintes tópicos:

- Planejamento agregado, que consiste em desenvolver um plano de produção vinculado ao planejamento estratégico, onde são direcionados os recursos produtivos para as estratégias escolhidas.
- Planejamento da capacidade. Consiste em adequar a capacidade produtiva (homem\máquina) por centro de trabalho e para cada período de tempo envolvido. Está presente em todos os níveis do PCP.
- Previsão da demanda. Direcionamento das atividades para o rumo acreditado para o futuro. Serve para desenvolver o planejamento da produção á longo prazo, com base na demanda e serve para ser utilizado no planejamento mestre da produção a curto e médio prazo.
- Planejamento do produto e do processo. O projeto de um produto afeta diretamente a satisfação do cliente, a qualidade e os custos de produção. O processo de elaboração de um produto requer um detalhamento das especificações técnicas do mesmo, uma relação dos materiais a ser utilizado e a descrição do processo de fabricação e montagem. Todas essas especificações contêm informações essenciais ao PCP para fazer o planejamento e controle da produção.
- Programação da produção. A etapa de programação da produção será abordada no próximo item, com maiores detalhes, devido á importância do assunto em relação ao problema proposto pela dissertação.
- Emissão e elaboração de ordens. É a última atividade do PCP antes da produção. Cabe ao PCP elaborar as Ordens de Produção, que serão destinadas aos setores envolvidos na produção, com as especificações do que deve ser produzido, podendo essas conter o roteiro e a seqüência a ser seguida.
- Acompanhamento da produção. É a comparação do que foi planejado versus o que foi executado, a fim de identificar possíveis distorções e providenciar as correções necessárias.

Quanto à classificação dos sistemas de produção, Tubino (2000) diz:

“...existem inúmeras formas de classificar os sistemas de produção. A classificação dos sistemas de produção tem por finalidade facilitar o entendimento das características inerentes a cada sistema e sua relação com a complexidade das atividades de planejamento e controle desses sistemas”.

Como formas de classificação usuais, referentes aos sistemas de produção, pode-se citar:

- Atividade às quais pertencem:

- primária;
- secundária;
- terciária.

- Grau de padronização dos produtos:

- produtos padronizados;
- produtos sob medida.

- Por tamanho de lote:

- pequenos lotes (até 500 unidades);
- médios lotes (501 a 5000 unidades);
- grandes lotes (acima de 5000 unidades).

- Por tipos de operações:

- processos contínuos;
- processos discretos.

- Por tipos de produção:

- *Jobbing* – produzem produtos especiais, em uma quantidade única ou em lotes únicos. Eles podem ser produzidos novamente, mas não existe como prever quando um novo pedido poderá ser feito.
- *Batch* – produzem produtos repetitivos de forma intermitente e em lotes. Diferentes produtos e peças são produzidos ao mesmo tempo, dividindo as mesmas máquinas e instalações.
- Contínua - As máquinas e instalações são arranjadas em linhas, na mesma seqüência em que são usadas e existe um fluxo contínuo de materiais entre elas.

Também podemos abordar a programação da produção de acordo com a alocação de tarefas em centros de trabalhos. Basicamente existem dois tipos de

alocação, o carregamento finito e o carregamento infinito. Para Slack (1999), carregamento “É a determinação do volume com o qual uma operação produtiva pode lidar...”.

- Carregamento finito: para alocação de uma tarefa em um centro de trabalho deve ser considerado um limite preestabelecido. Em geral este limite é a capacidade do centro de trabalho, podendo ser horas de trabalho, capacidade de produção de uma máquina, número de operadores ou quaisquer outras variáveis que sejam relevantes na operação em questão.

- Carregamento infinito: Não existe limite para alocação das tarefas. Essa não limitação se deve muitas vezes ao custo proibitivo do carregamento, ou por que não existe a possibilidade de limitar a carga, ou ainda por que não existe a necessidade de limitar a carga. Como exemplo pode se citar as cabines de um pedágio numa estrada e também quando um sistema de produção possui linhas de produção projetadas para flexibilizar a capacidade produtiva.

Outra importante classificação pode ser feita considerando a velocidade de processamento das máquinas:

- Máquinas idênticas: possuem a mesma velocidade de processamento.
- Máquinas uniformes: velocidades de processamento diferem em forma constante.
- Máquinas não relacionadas: as velocidades de processamento dependem diretamente da tarefa a ser executada.

2.2 Programação da Produção

Segundo Araújo (2003), “o problema de sequenciamento da produção (*scheduling*) é definido como um problema de programação da produção”, onde as tarefas são preestabelecidas por um planejamento, sendo que as mesmas devem ser seqüenciadas nas máquinas existentes, de forma a otimizar uma função objetivo.

Para Slack et al. (1999), a atividade de programação da produção é uma das mais complexas no gerenciamento da produção. Existem diferentes tipos de recursos que devem ser programados simultaneamente, bem como as máquinas existentes terão capacidades diferentes e ainda, o pessoal envolvido no processo produtivo terá diferentes habilidades. Para cada n tarefas existem $n!$ (fatorial) maneiras diferentes de programar os trabalhos, isso num processo simples, já

quando for considerado mais de uma máquina ($m > 1$) disponível para programação esse número cresce para $n!^m$. Diante desse contexto, a tarefa de programação da produção se torna muito complexa, sendo a natureza combinatória dessa programação de difícil resolução, pois o número de soluções cresce de forma exponencial de acordo com as variáveis envolvidas.

Segundo MacCarthy e Liu (1993, apud Landmann, 2005), o problema da programação pode ser definido como a alocação de recursos no tempo, para a execução de um conjunto de tarefas. O ato de programar a produção irá definir a ordem de entrada das tarefas que deverão ser executadas na produção, ou seja, irá determinar como as tarefas devem ser conduzidas de uma máquina para outra.

Existem vários trabalhos importantes na área de programação da produção, sendo que os seguintes pesquisadores são muito referenciados nessa área: Morton e Pentico (1993), Santos e França (1995), Cheng, Gupta e Wanga (2000), Pinedo (1995), Blazewicz (1996), Baker (1995), Arroyo e Vianna (2007), entre outros.

2.3 Sequenciamento da Produção

As regras de seqüenciamento podem ser classificadas segundo várias óticas. Podem ser divididas em regras estáticas e regras dinâmicas, regras locais e regras globais, de prioridades simples e combinação de regras de prioridades simples, regras com índices ponderados e regras heurísticas sofisticadas. As regras heurísticas mais sofisticadas determinam as prioridades incorporando informações não associadas ao trabalho específico, como a possibilidade de carregar antecipadamente o recurso, o emprego de rotas alternativas, a existência de gargalos no sistema etc. (Tubino, 2000)

De acordo com Müller (1993), o sequenciamento pode ser classificado de acordo com as seguintes restrições:

- Tipo de recurso. Uma máquina (ou processador) é um recurso que pode realizar uma atividade a cada momento. As atividades são, normalmente, denominadas tarefas e assume-se, também, que uma tarefa é executada por apenas uma máquina a cada instante.

- Natureza determinística, dos problemas. Toda a informação relativa ao problema é conhecida com uma certa antecedência, sendo o sequenciamento da produção dividido em determinístico e probabilístico.

Com relação á apresentação do problema de sequenciamento, pode-se classificar da seguinte maneira.

Suponha que m máquinas M_i ($i = 1, \dots, m$) devem executar n tarefas J_j ($j = 1, \dots, n$). Um seqüenciamento (*schedule*) é a alocação de um ou mais intervalos de tempo em uma ou mais máquinas para cada tarefa. Um seqüenciamento é dito factível, se não há sobreposição de dois intervalos de tempo na mesma máquina, se não há sobreposição de dois intervalos de tempo alocados a mesma tarefa e, ainda, as condições impostas pela natureza do problema (características próprias das tarefas e das máquinas) são completamente satisfeitas. Um seqüenciamento é ótimo se ele minimiza (ou maximiza) um dado critério de otimalidade. (Muller, 1993)

De acordo com Fuchigami (2005), o gráfico de Gantt é uma ferramenta comumente utilizada na programação, onde o tempo é representado como uma barra, sendo que o início e o término das atividades podem ser indicados no gráfico.

Segundo Erdmann (2000, apud Fuchigami, 2005), podem ser citadas como técnicas de programação:

- MRP (Material Requirement Planning – Planejamento das necessidades de material);
- MRP II (Manufacturing Resource Planning – Planejamento de recursos de manufatura);
- Kanban (técnica de comando da programação por sinalização visual);
- Software incorporado ao OPT;
- Programação por Redes (PERT CPM);
- Programação Orientada pela carga dos recursos de produção;
- Ativação da produção pelo estoque;
- Programação da produção por períodos de tempo;
- Programação por tamanho de lotes; e
- Programação para atendimento de pedidos.

Com relação ao fluxo das tarefas executadas nas máquinas, Fuchigami (2005) classifica como segue:

- *Job Shop*: cada tarefa tem sua própria seqüência de processamento nas máquinas;
- *Flow Shop*: todas as tarefas possuem o mesmo fluxo de processamento nas máquinas. O *flow shop* é um caso particular de *job shop*.
- *Open Shop*: não há uma sequência pré estabelecidas para as tarefas;
- *Flow Shop* permutacional: *flow shop* em que a ordem de processamento das tarefas em cada máquina é estritamente a mesma;
- Máquina única: existe apenas uma única máquina disponível para o processamento das tarefas, nesse caso o conceito de tarefa é igual a *job*, pois as tarefas são independentes umas das outras.

- Máquinas Paralelas: em um mesmo estágio de produção, há duas ou mais máquinas disponíveis que podem executar qualquer tarefa, sendo que essas máquinas podem ser idênticas, quando possuem a mesma velocidade de processamento e diferentes, quando cada máquina possui uma velocidade de processamento. Quando as máquinas são diferentes elas podem ser uniformes quando a velocidade é constante, independente da tarefa executada e não uniformes, se a velocidade é dependente da tarefa executada.

- *Job Shop* com máquinas múltiplas: job shop em que existem duas ou mais máquinas em paralelo em cada estágio, sendo que cada tarefa é processada por somente uma máquina em cada um dos estágios;

- *Flow shop* com máquinas múltiplas: as tarefas são processadas em múltiplos estágios e em cada um deles há máquinas paralelas. As tarefas são processadas por apenas uma máquina em cada estágio;

Cada tarefa representa uma operação elementar e necessita de um determinado tempo e/ou recursos para sua realização, já um *job* representa uma seqüência conhecida de uma ou mais tarefas, as quais compõem a seqüência tecnológica de fabricação de cada produto, ou seja, um job pode representar a fabricação de um produto ou até mesmo um lote de uma família de produtos que possuem a mesma seqüência tecnológica de fabricação. Contextualizando o conceito de *job* e tarefa, pode-se dizer que o *job* seria o atendimento de um pedido de um cliente. Para a produção desse pedido, seria necessário executar uma série de tarefas, tais como: confecção do macho, moldagem, fusão, desmoldagem, quebra de canal, limpeza, rebarbação e expedição, sendo que nesse trabalho somente serão consideradas as etapas da confecção do macho e da moldagem.

Independente das características impostas pelo processo produtivo, ou do critério de otimização escolhido existem algumas restrições que são comuns à maioria dos problemas e devem ser respeitadas. Entre elas, podemos incluir as citadas anteriormente, que são as restrições quanto ao tipo de recurso e quanto à natureza determinística, e ainda quando uma tarefa ao ser iniciada não deve ser interrompida.

Uma outra restrição que deve ser levada em conta no momento da programação é com relação ao tempo gasto com a preparação de uma máquina. O tempo de preparação envolve o tempo gasto com as atividades necessárias para desmontar a máquina, que estava, até então, executando uma determinada tarefa e

montar a máquina para execução de uma nova tarefa. Em geral esse tempo de preparação da máquina é chamado de tempo de setup. Com relação ao tempo de preparação, existe o tempo de preparação que é independente da seqüência, quando o tempo de preparo depende somente da tarefa a ser executada, e dependente da seqüência, quando o tempo de preparação depende também da tarefa que está em execução.

O problema de sequenciamento ainda pode envolver os custos relativos á antecipação da produção, onde as empresas deverão tomar a decisão se desejam manter estoques referentes a uma possível antecipação, devido ao custo e riscos de eventuais cancelamentos de pedidos dos clientes, ou enfrentar problemas com possíveis atrasos. Em um ambiente produtivo ideal não pode haver antecipações e nem atrasos na produção, mas esses são problemas de difícil resolução conforme pode ser visto no estudo de caso. A data desejada para atendimento de uma demanda é chamada de *due date*.

Existem várias pesquisas que abordam a antecipação da produção, bem como a entrega de produtos fora da data demandada, e para a resolução desses problemas em geral, é atribuído uma penalidade ou um custo unitário, sendo que a mesma deve ser considerada como uma restrição a ser abordada no momento da programação da produção.

Allahverdi et al (1999), classifica o problema de sequenciamento envolvendo tempo de preparação das máquinas, de acordo com as seguintes características:

- non-batch setup: quando envolve o tempo de troca entre diferentes tarefas;
- *batch setup*: quando existe tempo de troca entre diferentes agrupamentos de tarefas. Na descrição do estudo de caso será possível verificar um exemplo desse problema, pois existe a necessidade de agrupar a produção dos machos por família de tipo de processo de fabricação.

Ainda com relação ao tempo gasto com a preparação de uma máquina, é possível incorporar esse tempo ao tempo de processamento da tarefa, isso em alguns casos, já em outros casos, onde o tempo de preparo é significativo não é possível fazer essa incorporação.

Segundo Cheng, Gupta e Wanga (2000), um típico problema de programação *Flow Shop* pode ser formalmente declarado como segue: um conjunto $N = \{1, 2, \dots, n\}$ de n tarefas é para ser processado em m estágios seqüências. Existe uma máquina para cada fase. Todas as máquinas estão permanentemente disponíveis.

Uma tarefa deve ser processada em uma máquina num dado momento sem preempção e uma máquina processa não mais que uma tarefa naquele momento. O objetivo consiste em programar tarefas de forma a minimizar alguma medida de desempenho, tais como o *makespan*, o tempo total de conclusão, o máximo atraso (demora), o atraso total, o atraso ponderado, a soma do peso de antecipação e demora, entre outros.

Com relação ao problema *Flow Shop* envolvendo setup, Cheng, Gupta e Wanga (2000) sugerem a seguinte classificação:

- Flowshop com seqüência de tarefas independentes de tempo de setup (SIJST)
- Flowshop com seqüência de tarefas dependentes de tempo de setup (SDJST)
- Flowshop com seqüência independente de família de tempo de setup (SIFST)
 - Flowshop com grupo de seqüência independente de tempo de setup (SIGST)
 - Flowshop com lotes de seqüência independente de tempo de setup (SIBST)
- Flowshop com família de seqüência dependente do tempo de setup (SDFST)
 - Flowshop com grupo de seqüência dependente de tempo de setup (SDGST)
 - Flowshop com lotes de seqüência dependente de tempo de setup (SDBST)

Para resolução de um flowshop com dois critérios, tempo final de processamento (*makespan*) e atraso máximo em relação às datas de entrega, Leite e Arroyo (2006) propuseram uma meta-heurística composta de duas fases, chamada de G-BT, que é a combinação do algoritmo GRASP, utilizado na primeira fase para gerar a solução inicial, com o algoritmo de Busca Tabu, utilizado na segunda fase para refinar a solução inicial. A meta-heurística G-BT possui como entrada os pesos ou preferências dos critérios e as respectivas condições de parada do algoritmo GRASP e Busca Tabu. O algoritmo GRASP é estruturado em duas fases, sendo que na primeira fase, chamada de construtiva, é utilizada a regra de prioridade TLB (*tardiness lower bound*) para ordenar as tarefas da lista de candidatos. Na segunda fase, chamada de busca local, a solução da primeira fase é melhorada, através da geração de soluções vizinhas feitas através da troca de tarefas, buscando um ótimo local. A Busca Tabu utiliza duas estratégias de geração de vizinhança, a inserção de tarefas e a troca de tarefas, sendo que a última apresentou os melhores resultados.

2.4 Problemas de sequenciamento em Máquinas Paralelas Idênticas

O problema de sequenciamento envolvendo máquinas paralelas idênticas, uniformes e não-relacionadas, pode ser representado através da classificação de três campos introduzida por Graham et al. (1979) como, $P \parallel C_{max}$, $Q \parallel C_{max}$ e $R \parallel C_{max}$, respectivamente. A descrição da classificação de três campos foi extraída de Müller (1993), que apresenta as heurísticas utilizadas na resolução dos problemas e propõem novas soluções para os mesmos.

O problema $P \parallel C_{max}$ consiste em alocar n tarefas independentes (J_1, \dots, J_n) , a m máquinas paralelas idênticas (M_1, \dots, M_m) , de uma forma não-preemptiva. Supondo $n \geq m \geq 2$ e que cada tarefa J_j tem um tempo de execução inteiro e positivo p_j , então o objetivo do problema é minimizar o tempo de finalização máximo das tarefas (*makespan*) definido como: $C_{max} = \max_{i=1, \dots, m} \{C_i\}$, onde C_i é o tempo de execução de todas as tarefas alocadas a máquina M_i . GAREY e JOHNSON (1979) provaram que este problema é fortemente NP-completo quando o número de máquinas é arbitrário.

Existem vários algoritmos para o $P \parallel C_{max}$, podendo ser esses classificados como heurísticas construtivas e heurísticas de melhoramento. Como exemplo de algoritmos para a resolução do $P \parallel C_{max}$, pode ser citados os seguintes: LPT, MULTIFIT, 0/1-INTERCHANGE, algoritmo 3-FASES.

O problema $Q \parallel C_{max}$, consiste em alocar n tarefas independentes (J_1, \dots, J_n) a m máquinas paralelas idênticas (M_1, \dots, M_m) , de uma forma não-preemptiva. Supondo $n \geq m \geq 2$, que cada tarefa J_j tem um tempo de execução positivo p_j e que cada máquina tem uma velocidade positiva σ_i que são normalizadas de modo que $\sigma_1 = 1 \leq \sigma_2 \leq \sigma_3 \leq \dots \leq \sigma_m$. Então o objetivo do problema é minimizar o tempo de finalização máximo das tarefas (*makespan*) definido como: $C_{max} = \max_{i=1, \dots, m} \{C_i\}$, onde C_i é o tempo de execução de todas as tarefas alocadas a máquina M_i , significando o somatório dos tempos de processamento de todas as tarefas alocadas a máquina M_i dividido pela velocidade desta máquina, denominada de σ_i .

Para a resolução do $Q \parallel C_{max}$, na maioria dos casos são utilizadas adaptações das heurísticas inicialmente desenvolvidas para solucionar o problema $P \parallel C_{max}$. Como exemplo pode-se citar a heurística KPROC proposta por Müller e Limberger (2000).

O problema $R \parallel C_{max}$ consiste em alocar n tarefas independentes a m máquinas paralelas não-relacionados, sendo que cada tarefa tem um tempo de processamento diferente para cada máquina. O objetivo é minimizar o tempo de execução da máquina mais carregada (makespan). Assume-se que todas as tarefas estão disponíveis para iniciar sua execução ao mesmo tempo, e uma máquina com mais de uma tarefa alocada a ela, deve executá-las uma após a outra, em alguma seqüência. Preempção não é permitida, ou seja, uma tarefa que inicia sua execução em uma máquina deve permanecer nela até o seu final.

Para a resolução do $R \parallel C_{max}$ pode-se citar as seguintes heurísticas: Busca Tabu, Algoritmos Genéticos, *Simulated Annealing* e *FOUR*.

2.5 Trabalhos Específicos no Setor de Fundições

Souderpandian & Balashanmuga (1991, apud Araújo, 2003), estudaram o problema de sequenciamento de tarefas às máquinas numa grande fundição. A fábrica produz 200 tipos de itens em 41 máquinas. Para cada máquina são atribuídos valores de 0 a 100 de acordo com a conveniência de se utilizar a máquina para fazer determinado item. O método de solução considera apenas os 100 itens principais que representam 90% da demanda e é baseado no clássico Problema de Transportes, onde cada máquina oferece uma quantidade de horas por semana e cada item demanda um certo número de horas para ser fabricado. O objetivo alcançado foi a minimização do custo total da programação.

Silva (2001) desenvolveu um método heurístico de solução baseado numa heurística gulosa de aspiração, isso para fundições de pequeno porte, em que vários problemas da mochila são resolvidos, sendo a capacidade do forno igual a da mochila.

Santos-Meza et al. (2002) propuseram, a partir de um estudo numa fundição de médio porte, com apenas um forno produzindo por turno, com várias máquinas de moldagem e com diferentes itens a serem produzidos em diferentes ligas, um

modelo de dimensionamento de lotes monoestáticos com restrição de capacidade, máquinas paralelas e múltiplos itens. O modelo de programação mista é resolvido por método heurístico baseado numa relaxação particular do problema.

Em Araújo e Arenales (2003) foram feitas extensões do modelo proposto por Santos-Meza et al (2002), onde são considerados os custos de preparação e também são admitidos atrasos na data de entrega, permitindo assim possíveis rearranjos na demanda, caso não seja possível o atendimento sem atraso. A programação da produção é dividida em dois momentos importantes e interligados, sendo o que primeiro momento diz respeito a programação dos fornos, onde é definido a liga a ser produzida por período e no segundo momento é feito a programação das máquinas de moldagem, com a definição das quantidades de cada item a ser produzida por período. Para a solução do problema foi apresentado um método heurístico dividido em três fases. Na primeira fase é feita a relaxação do problema e é proposto um modelo de programação linear, na segunda fase, uma heurística determina a liga ser produzida por período, na terceira fase é feito a programação das máquinas de moldagem.

Segundo Araújo (2003), “devido á complexidade do problema, os procedimentos ótimos resolvem apenas problemas pequenos em tempo razoável, enquanto procedimentos heurísticos conseguem obter boas soluções para problemas de maior porte”, para comprovar essa teoria o autor utilizou-se do pacote comercial AMPL/Cplex. Uma estratégia de horizonte rolante em conjunto de busca local é aplicada por Araújo (2003) para determinação das variáveis binárias que determinam quais ligas são produzidas no primeiro período de planejamento.

Silva e Morabito (2004) apresentam uma abordagem heurística para otimizar a programação da produção em fundições de mercado de pequeno porte. A abordagem baseia-se no problema do corte e empacotamento (PCE) unidimensional. Para resolução do problema foi combinada uma heurística construtiva gulosa com o clássico problema da mochila. O método proposto determina a programação da produção de diferentes ligas metálicas nos fornos, de maneira a produzir as peças de cada liga demandadas na carteira de pedidos dos clientes, dando prioridade aos programas que otimizem algum critério, por exemplo, que maximizem a produtividade do processo ou a margem de contribuição ao lucro. A abordagem proposta é aplicada para simular duas semanas reais de produção, e

apresentou dados significativos com relação à produtividade na empresa estudada, como a redução de tempo de produção, da carteira de pedidos, de 20 %.

Landmann (2005) desenvolveu um modelo heurístico para a programação simultânea e integrada da fusão e da moldagem, inserido no sistema de planejamento e controle de produção (PCP). O modelo é construído com base nos conceitos da lógica fuzzy, que oferecem mecanismos para a representação e manipulação do conhecimento de especialistas.

Tonaki (2006) decompõe o modelo apresentado por Araújo (2003) e desenvolve uma heurística lagrangiana baseada em transferências. A heurística é composta de três fases: obtenção da solução inicial, factibilização e melhoria.

3 ESTUDO DE CASO

3.1 Descrição do Processo Produtivo

O estudo de caso foi realizado em uma fundição “de mercado”, situada no Estado do Rio Grande do Sul, que conta com cerca de 800 funcionários, distribuídos entre o processo de fundição e usinagem, operando em três turnos. Por motivos estratégicos a empresa pede para não ser identificada. A fundição produz dois tipos principais de ligas: cinzento e o nodular e possui uma grande carteira de clientes e de peças por clientes.

Nesse capítulo é feito um detalhamento do processo produtivo da empresa estudada, onde são evidenciadas as características de todas as etapas envolvidas na produção, que como pode ser visto na **Figura 6** é muito similar ao processo produtivo apresentado no **Capítulo 1**.

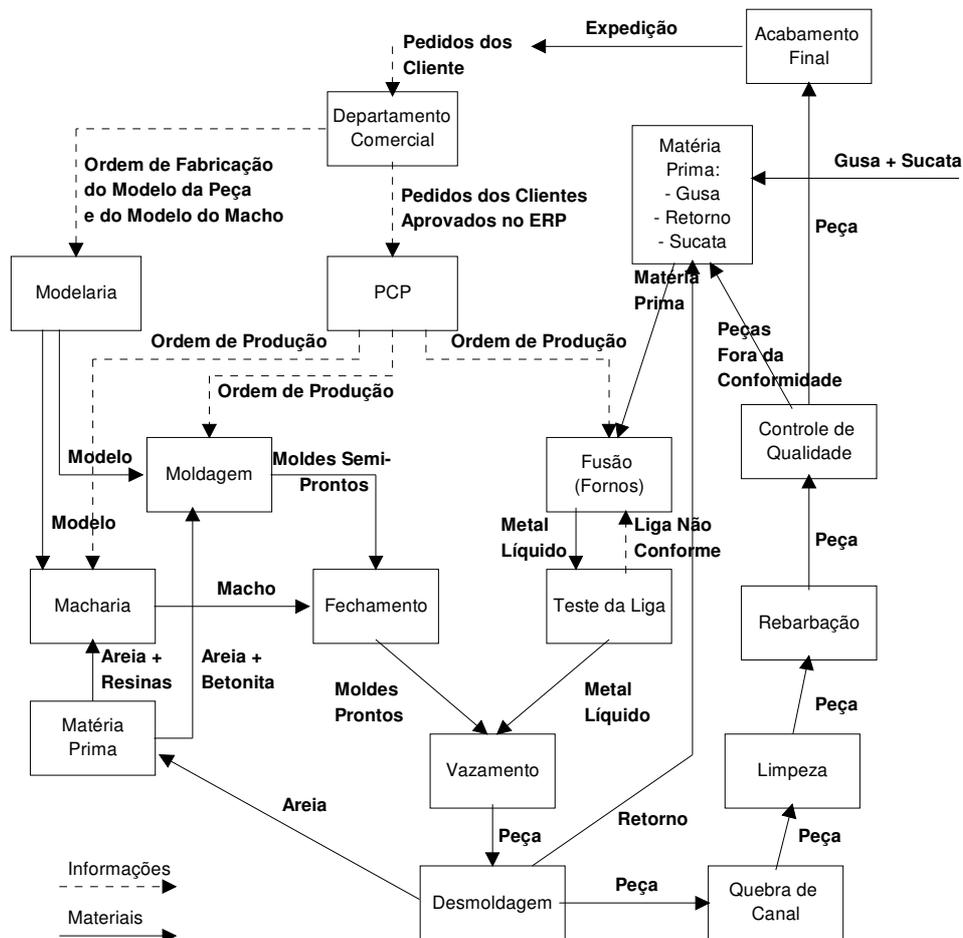


Figura 6: Processo produtivo da Fundição estudada.

3.1.1 Departamento Comercial

O Departamento Comercial recebe os pedidos com as necessidades dos clientes, analisa estes e autoriza a produção dos mesmos. O recebimento dos pedidos dos clientes é feito através de ligações telefônicas ou e-mail e através do Intercâmbio Eletrônico de Dados (EDI), o que agiliza o processo de atendimento e cria uma fidelização com o cliente.

Cabe também ao Departamento Comercial, a negociação com os clientes referentes aos prazos de entrega e a definição das prioridades de produção nos casos em que há necessidade de antecipar pedidos.

3.1.2 PCP

Como pode ser visto no **Capítulo 2**, que apresenta os conceitos pertinentes ao PCP, cabe, resumidamente, ao Setor de PCP programar e controlar a produção, definindo o que, quanto, quando e aonde as tarefas deverão ser executadas, bem como a emissão das Ordens de Produção aos setores envolvidos no processo produtivo.

O Setor de PCP, na fundição estudada, é responsável somente pela função de planejamento e controle da produção e hierarquicamente é vinculado ao gerente da indústria. Abaixo seguem as atribuições do PCP, sendo que as demais tarefas, as quais teoricamente seriam atribuições do setor, são de responsabilidade de outros setores, ou seja, o processo de planejamento e controle de matéria-prima para produção, expedição, programação da usinagem e relacionamento com clientes diretamente não são de sua responsabilidade, embora as decisões tomadas pelo PCP afetem diretamente esses demais setores envolvidos com o processo produtivo.

De posse dos pedidos dos clientes, o Setor de PCP executa no sistema de gestão ERP o planejamento da produção. O planejamento da produção é feito com base no Planejamento Mestre da Produção (PMP), o qual possui o planejamento da produção para vários meses.

Ao executar o planejamento da produção, em especial da “Moldagem”, o sistema planeja de acordo com as datas de entrega dos pedidos dos clientes. As datas de entrega são geradas automaticamente pelo sistema e de acordo com o

cliente, utilizando para isso a lógica do MRP. O sistema define as necessidades de produção de cada item, onde primeiramente verifica a quantidade em estoque dos depósitos (materia, em processo, bruto, usinados e em terceiros) para posteriormente planejar a quantidade a ser produzida. Existem outros critérios que são levados em conta pelo sistema, tais como: a máquina de moldagem em que a peça será feita, o tempo médio de produção, o tipo de metal, o tempo de “setup” da máquina de moldagem para a troca de ferramental, número de peças produzidas por caixa de moldar (bolo).

De posse das informações do planejamento da produção executado pelo sistema, é necessário que o planejador faça os ajustes necessários, ou seja, que faça o planejamento fino da produção. Atualmente, o planejamento fino da produção é feito para um horizonte de cinco dias. Como não existe, no sistema da empresa, nenhuma função que execute automaticamente o planejamento fino da produção, cabe ao planejador empregar seu bom senso, adquirido com a experiência de anos de trabalho, para realizar essa tarefa. O ideal seria que no sistema informatizado da empresa tivesse uma função específica para a execução do planejamento fino da produção, de acordo com parâmetros pré-configurados, que priorizassem os critérios de maior importância para o sequenciamento da produção, como pode ser visto no **Capítulo 2**, que apresenta maiores detalhes sobre a programação da produção.

Os ajustes são feitos de forma a atender os seguintes critérios: agrupar itens que possuem o mesmo tipo de ferro (cinzento ou nodular), redefinir as prioridades de produção e adequar o peso médio de moldes. Cabe ressaltar que o sistema em uso, não se preocupa em agrupar a produção de acordo com o tipo de ferro das peças a serem produzidas. Além disso, cabe ao planejador priorizar itens que estejam com o prazo de entrega atrasado e itens pedidos de determinados clientes (clientes preferências ou clientes que estão pressionando). Ainda, segundo Araújo et al. (2004) alguns itens podem ser fabricados de forma a tentar aproveitar a capacidade total do forno, ou seja, é feito um encaixe de itens que utilizam a mesma liga. O PCP também poderá se basear na quantidade mínima em estoque de cada peça, e assim planejar a produção das mesmas.

Também cabe ao PCP, planejar a produção de uma mesma peça em mais de uma máquina. Esse tipo de programação se faz necessário quando uma determinada peça, que possui mais de um ferramental, tenha uma prioridade de entrega elevada. As informações de que peça possui mais de um ferramental e

quais são as possíveis máquinas para sua produção não estão no sistema, ou seja, estão restritas ao conhecimento do planejador.

O planejador deverá levar em conta a existência dos turnos de trabalho, atualmente existem três turnos para a moldagem, bem como, programar as paradas para as refeições e para a manutenção dos equipamentos. Além disso, poderá existir produção nos finais de semana e feriados, o que requer que o planejador saiba os dias dessa produção extra, bem como a quantidade de turnos e de pessoal previstos para trabalhar, a fim de adequar o planejamento da produção à capacidade produtiva.

Feitos os ajustes necessários, ou seja, todas as máquinas da moldagem estão seqüenciadas para a produção, é gerada as Ordens de Produção para a Macharia, Moldagem e para a Fusão. As ordens geradas são impressas e entregue aos respectivos setores.

As Ordens de Produção da Macharia são impressas com três dias de antecedência, período esse julgado suficientemente necessário, para atender a programação do PCP. Na prática isso muitas vezes não ocorre, devido ao processo de produção dos machos utilizar um número restrito de máquinas, sendo que muitas vezes trabalham de forma concorrente na produção dos mesmos. Como o sistema utilizado pelo Setor de PCP, não planeja a produção das máquinas da macharia, pois este, somente define a quantidade a ser produzida e controla se os machos estão prontos ou não, cabe ao responsável pela macharia fazer esse planejamento e informar ao PCP quando não for possível cumprir o que estava planejado. Quando ocorrer esse fato, é necessário que o programador faça os ajustes necessários na programação fina da produção.

As Ordens de Produção da Moldagem são impressas com um dia de antecedência ou até no mesmo dia, sendo as mesmas individualizadas para cada uma das máquinas disponíveis. Elas são enviadas para fábrica após liberação das respectivas placas de moldar.

As Ordens de Produção da Fusão são impressas no mesmo instante que as ordens da moldagem. Da mesma forma como ocorre na Macharia, o sistema utilizado pelo PCP, não tem como variável principal planejar a produção de acordo com a capacidade dos fornos e sim de acordo com a capacidade das máquinas de moldagem, cabendo ao responsável pela fusão fazer esse planejamento e informar ao PCP, caso não possa cumprir o que foi planejado. Quando ocorre esse fato, mais

uma vez é necessário que o programador do PCP faça os ajustes necessários na programação fina da produção. O programador do PCP, sempre verifica o peso bruto programado, e tenta adequar a produção da moldagem de acordo com a capacidade dos fornos, ou seja, indiretamente o PCP realiza a programação dos fornos.

Muitas vezes é necessário que o PCP refaça o planejamento da produção, devido aos ajustes acima citados e também pelo surgimento de gargalos no sistema produtivo, afetando assim a produtividade da empresa. Os gargalos que demandam uma alteração na produção planejada são: quebra de máquinas e equipamentos (máquina de moldar, talha de desmoldagem, misturador de areia, secador/misturador de areia, sopradoras da macharia), quebra de fornos, falta de matéria-prima, falta de machos, tempo de vida útil dos machos, entre outros.

Na **Figura 7**, é mostrada a tela do sistema de gestão utilizado pelo PCP para fazer os ajustes (planejamento fino), a fim de planejar a produção das máquinas de moldagem.

Cliente	Data Prog	Tur	Item	Maqu	Hora	Hora Fin	Prior	Inf	Ord	Producao	Qtd	Ordem	Quente	eso	Cinzeno	eso	Nodular	Qt	Pecas	Pedidos	oque	Acab	oque	Fusao	Estoq	Seg	Dt	Entrega
JDB	19/06/07	1	JD059M	001	14:15	17:23	0		641409	22	7	0	260	320	250	6	0	25/06/07										
JDB	19/06/07	2	JD059M	001	22:30	01:07	2		641409	18	7	0	260	320	250	6	0	25/06/07										
JDB	19/06/07	2	SL228M	001	01:07	02:22	4		633753	4	14	0	58	24	0	63	0	150										
JDB	19/06/07	2	SL082M	001	02:22	04:22	6		640726	10	8	0	84	60	44	0	0	04/06/07										
JDB	19/06/07	2	SL115M	001	04:22	07:30	8		624522	19	4	0	84	40	25	1	0	018/06/07										
JDB	20/06/07	1	SL115M	001	07:35	07:41	10		624522	1	4	0	84	40	25	1	0	018/06/07										
CNCS	20/06/07	1	SL186M	001	07:41	09:41	12		636832	10	11	0	110	40	21	0	0	01/06/07										
JDB	20/06/07	1	JD080M	001	09:41	16:41	14		643974	90	8	0	422	300	294	0	0	06/06/07										
JDB	20/06/07	1	SL832M	001	16:41	17:23	16		644216	4	19	0	468	150	60	7	0	015/06/07										
JDB	20/06/07	2	SL832M	001	22:30	01:40	18		644216	21	19	0	468	150	60	7	0	015/06/07										
IDEMA	20/06/07	2	JD065M	001	01:40	07:30	20		646186	44	12	0	1140	380	300	0	0	021/06/07										
IDEMA	21/06/07	1	JD065M	001	07:35	14:22	22		646186	51	12	0	1140	380	300	0	0	021/06/07										
EATON VAL	21/06/07	1	CK070M	001	14:22	17:23	24		643944	23	7	700	0	100	57	0	5	08/06/07										
EATON VAL	21/06/07	2	CK070M	001	22:30	07:30	26		643944	67	7	700	0	100	57	0	5	08/06/07										
EATON VAL	22/06/07	1	CK070M	001	07:35	09:35	28		643944	10	7	700	0	100	57	0	5	08/06/07										
JDB	22/06/07	1	SL353M	001	09:35	11:35	30		644172	10	5	51	0	210	64	0	0	018/06/07										
JDB	22/06/07	1	SL540M	001	11:35	13:35	32		644200	10	8	78	0	90	0	50	0	0										
JDB	22/06/07	1	SL356M	001	13:35	16:50	34		644173	20	3	66	0	140	170	1	0	25/06/07										
JDB	22/06/07	1	SL816M	001	16:50	17:23	36		644214	4	7	0	420	240	0	39	0	0										

Ordenacao: Molde/Prioridade / Molde/Data Programacao/Turn / Item/Data Programacao/Item / Cliente/Item/Programacao / Data Programacao/Turno/Molde/Item

Estoque Inicial: Cinzeno: 0,00 / Nodular: 0,00

Criterios de Priorizacao: Cliente: / Item: / Dt Corte Termin: 26/06/07

Parametros: Tempo p/bolo em min: 2,50 / Tempo setup maquina: 15,00 / Periodos: 07 / 35 / 12 / 100 / 9,80 / Qtd Horas: 19,80

Peso Medio: 33,54 / Tot Peso Bolo: 682.685,00 / Tot Ordens: 20.353,00

Figura 7. Tela do Sistema ERP utilizado para ajuste da programação da produção.

Com relação à energia elétrica, pode-se dizer que é o maior gasto que a fundição possui como matéria-prima, devido à demanda elevada dos fornos. Atualmente a energia contratada permite que os fornos trabalhem 24 horas por dia,

de forma ininterrupta, parando apenas para a manutenção ou quando apresentarem problemas. A não existência de uma restrição para a produção, no que diz respeito ao consumo de energia elétrica é um fato recente para a empresa, pois até pouco tempo atrás a demanda contratada era menor que a capacidade produtiva, o que gerava a necessidade, por parte do PCP de fazer um planejamento da produção adequando a essa restrição. A fundição interrompia a produção dos fornos no horário de ponta (entre 17:30 e 21:30 horas). Landmann (2005) apresenta um caso, onde a fundição estudada possui restrição quanto ao consumo de energia elétrica devido à demanda contratada no horário de ponta (entre 18:00 e 21:00 horas). Nesse mesmo trabalho Landmann apresenta uma solução ao problema, sendo que a mesma respeita a restrição de consumo de energia sem interromper o funcionamento dos fornos.

Embora a fundição estudada não apresente restrições com relação ao consumo de energia elétrica, cabe ao PCP fazer uma programação da produção de forma a evitar desperdícios de energia elétrica, tentando ocupar o máximo possível à capacidade produtiva dos fornos, de forma a equilibrar a oferta do metal líquido e o consumo do mesmo, pelas caixas de moldar na etapa de vazamento.

3.1.3 Modelaria

A modelaria confecciona os modelos utilizados na produção das peças tanto da Macharia como da Moldagem. Os modelos são feitos de acordo com as especificações dos clientes e produzidos em aço. O cliente também pode fornecer o modelo pronto para uso. Em ambos casos, cabendo ao Setor de Modelaria, reparar eventuais danos que os mesmos sofram.

O modelo é feito através de um projeto, que contém um desenho da peça, bem como todas as informações necessárias para a confecção do mesmo. Um modelo mal elaborado compromete a qualidade da peça, por exemplo, um massalote mal dimensionado irá causar um vazio de contração na peça.

3.1.4 Macharia

O Setor da Macharia é responsável pela confecção dos machos que futuramente serão utilizados na moldagem para formação das peças a serem fundidas. O planejamento da produção dos machos é feito após o recebimento das Ordens de Produção, que são enviadas pelo PCP. A **Figura 8** mostra uma Ordem de Produção destinada a Macharia.

		ORDEM DE PRODUÇÃO - MACHARIA		*0662965*	
				DATA/HORA: 02/08/2007 - 17:57:00	
RN176MA - SUPORTE CAIXA - MACHO A				DESENHO 70100013	REV. A
QUANTIDADE TOTAL 300	TURNO 1		TURNO 2		DATA INÍCIO 25/07/2007
	FABRICADO	REFUGO	FABRICADO	REFUGO	
MATERIAL: GGG40		ARQUIVO: SP1-7B		DADOS MÓVEIS: 392	

LISTA DE MATERIAIS		
CÓDIGO	DESCRIÇÃO	QUANTIDADE
02020028	AREIA FINA 60-80 - JG INCAST 60 GR S	6,93000
02020047	RESINA CR-1130 = 397 I - ISOCURE	0,05544
02020048	RESINA CE-1230 = 617 II - ISOCURE	0,05544
02020050	CATALIZADOR CA-81 = CA-700	0,01386

ROTEIRO DE FABRICAÇÃO						
OPER	MÁQUINA	DESCRIÇÃO DA TAREFA	TEMPO HOMEM	TEMPO MÁQUINA	TEMPO PREPARO	APROVADO POR
10	SM010	FABRICAR MACHO	1,5000	1,5000	10,0000	
20	M4114	ACABAR MACHO	0,7000	0,7000	1,0000	

TURNO	APROVADOS	REPROVADOS	DATA	OPERADOR	Nº REGISTRO	TEMPO SETUP	OBSERVAÇÕES
MAQUINA							
ACABAMENTO							

Figura 8: Ordem de Produção para Macharia

O macho nada mais é do que um elemento refratário colocado no molde para definir uma cavidade ou espaço vazio no fundido final. Ele deve ter uma certa robustez para que possa suportar o metal líquido que irá fluir em sua volta e ainda tornar-se quebradiço após o processo de resfriamento, permitindo uma fácil retirada da peça fundida.

É importante salientar que não existe no sistema informatizado da empresa um módulo que auxilie na programação da produção dos machos. Conforme descrito anteriormente, o setor de PCP planeja a produção somente das máquinas de

moldagem, sendo que os demais setores envolvidos no processo produtivo (Macharia e Fusão), deverão fazer o seu próprio planejamento da produção, através das necessidades informadas nas Ordens de Produção.

Ao fazer o planejamento da produção, o planejador atenta para os seguintes detalhes: data de entrega das peças; quantidade real para ser produzida, que é a quantidade solicitada menos a quantidade existente em estoque e em processo de acabamento; tipo de processo de fabricação do macho; turno de trabalho; máquina de produção informada na Ordem de Produção.

A máquina de produção informada na Ordem de Produção é chamada de máquina preferencial. No momento do sequenciamento da produção, cada peça será programada para ser produzida na sua máquina preferencial. Assim como uma peça possui uma máquina preferencial, para sua produção, ela poderá, ou não, ser produzida em outras máquinas que possuem as mesmas características da máquina preferencial, dependendo do encaixe do ferramental. A possibilidade de produzir uma peça em outras máquinas, que não seja a preferencial, permite ao planejador fazer um balanceamento da produção entre as máquinas, sendo que uma máquina menos ocupada pode receber as tarefas de uma mais ocupada, conseguindo assim reduzir o tempo de entrega.

Para o sequenciamento da produção deve ainda ser levado em conta se o tipo de processo de fabricação do macho possui família de tipo de processo, caso possua, as peças de uma mesma família serão agrupadas, a fim de evitar perda de tempo com a troca da família. Também é necessário verificar a quantidade de ferramentais que uma peça possui, pois a existência de mais de um ferramental viabiliza a produção de uma mesma peça ao mesmo tempo em mais de uma máquina, o que pode minimizar o prazo de entrega.

Como pode ser observado, existe um elevado número de variáveis que tornam o processo de programação da produção da macharia muito complexo e de difícil execução por parte do planejador, que tem que se valer de sua experiência e bom senso para tentar gerar um bom sequenciamento para produção. Ao término desse capítulo é apresentado o funcionamento da meta-heurística **GRASP** como método para a resolução dos problemas da programação da produção da macharia.

A produção dos machos, em sua grande maioria, é feita através de máquinas de fabricação de machos com cavidades múltiplas. As cavidades nas caixas de machos são preenchidas com areia, ou areia + resina, soprada para dentro das

caixas, a matriz ou caixa do macho pode ser aquecida ou gasada para o início da cura, após esse processo o macho é retirado.

Após a produção do macho é feito o processo de acabamento. Na empresa estudada o acabamento é feito junto ao processo de produção do macho. Ele pode ser uma simples raspagem com uma lâmina, seguido da colagem das peças (quando necessário), bem como, podem ser feitos pequenos reparos através de uma espátula e um componente de enchimento (massa de grafite), e ainda pode envolver o processo de pintura da peça, dependendo da necessidade. A pintura de um macho serve para evitar veimento, arraste de areia, escama, ou seja, a pintura da uma proteção vítrea dando mais resistência ao macho no momento do vazamento.

A fundição em estudo possui quatro tipos de processos de fabricação de machos, que são conhecidos como Cura Fria (Cold-Box), Shell Molding (Caixa Quente), CO₂ e Estufa.

O tipo de processo conhecido como Cold Box utiliza o sistema de cura fria e possui duas famílias de tipo de processo de fabricação de macho. A primeira família é chamada de Isocure, que consiste de uma resina (Fenólica e outra isocianato) e um catalisador líquido para todos os machos por ela composta. As resinas são misturadas com a areia na quantidade pré determinada em um misturador e então transportada para um silo. Depois da injeção pneumática da mistura areia-resina na caixa de macho (sopragem do macho), o gás do catalisador é passado através da massa de areia do macho. Uma reação ocorre e o macho sólido é retirado da caixa de moldar.

A outra família desse tipo de processo é conhecida como Ecolotec e possui o mesmo sistema de fabricação, só mudando o tipo de resina (resina fenólica) e o tipo de catalisador.

As duas famílias citadas desse tipo de processo de fabricação utilizam o mesmo equipamento, o que requer que antes da produção do macho seja verificado qual é a família de tipo de processo a ser utilizada. Essa verificação é necessária para que haja uma maximização do aproveitamento das máquinas, onde o sequenciamento da produção é feito após o agrupamento das peças por família de tipo de processo, evitando assim uma perda maior de tempo com a mudança da resina e catalisador. O tempo gasto para realizar a troca de resina, ou seja, para mudar de família de tipo de processo de fabricação é conhecido como setup de família de processo.

Na empresa estudada existem quatro máquinas de fabricação de macho no sistema de cura fria, podendo a mesma máquina produzir peças da família Ecolotec e Isocure, sendo cada um por vez. Três delas possuem o mesmo funcionamento, onde só é possível produzir uma peça de cada vez. Cada uma dessas máquinas possui um misturador separado, ou seja, cada uma pode estar trabalhando com uma família de tipo de processo (Ecolotec ou Isocure). Ex.: Máquina A = produz com a família Isocure, Máquina B = Isocure e Máquina C = Ecolotec. A quarta máquina trabalha com um sistema de carrossel, onde é possível inserir até três ferramentais, diferentes ou não, ao mesmo tempo. Para que essa última máquina possua uma boa produtividade é preciso equacionar o tempo de produção de cada macho, tentando produzir machos com tempos de produção equivalente. Uma diferença existente entre essas máquinas é o tamanho do macho a ser produzido, sendo que a última máquina citada só produz machos de tamanhos médios.

O processo de produção conhecido como *Shell Molding*, também chamado molde-casca, utiliza o sistema de Caixa Quente. Nesse processo, a resina de cura térmica é misturada com areia e um catalisador para criar um sistema que se tornará uma massa sólida, isso após o processo de cura e em uma caixa de macho aquecida. Na empresa estudada a resina e a areia já são compradas misturadas, evitando assim problemas relativos ao percentual da mistura. Quanto maior for o percentual de resina maior é a resistência do macho. Depois de misturados, em um misturador, a areia, a resina e o catalisador são injetados dentro de uma matriz de metal (caixa de machos) a uma temperatura de 250 a 300 graus. Após o processo de cura o macho é retirado para uma estação de resfriamento.

Atualmente existem 09 (nove) máquinas de produção de machos que utilizam o sistema Caixa Quente, sendo que três dessas máquinas produzem machos de tamanhos maiores e seis máquinas produzem machos de tamanhos menores.

O terceiro tipo de processo utilizado pela empresa em estudo é conhecido com CO₂, onde a produção dos machos é feita de forma manual. A areia e o silicato de sódio são introduzidos na caixa de machos e são socados de forma a produzir uma massa compacta, o excesso é retirado. Após são feitos furos que e posteriormente servem para a injeção o gás CO₂. A junção desses componentes solidifica o macho. Esse processo é pouco utilizado na produção dos machos.

O último tipo de processo de fabricação de macho é chamado de estufa.

Considerações sobre a produção de machos:

- Cada macho possui um tempo de vida útil. Esse tempo de vida muda de acordo com o tipo de processo de fabricação e da família utilizada para a confecção da peça. Se por algum motivo a programação da produção, da moldagem, mudar o que estava programado e os machos já haviam sido feitos, será necessário observar a vida útil de cada macho pronto, ou seja, será necessário tomar a decisão de produzir uma peça para não perder o macho ou deixar de produzir uma peça e perder os machos prontos.
- O tempo de fabricação de cada macho depende do tamanho do mesmo, independente de tipo de processo de fabricação. O tempo de fabricação deve ser levado em conta no momento do planejamento da produção dos machos.
- O tempo de *setup* de ferramental, que é o tempo de mudança do ferramental de uma peça para outra, pode variar de peça para peça, ou seja, é necessário acrescentar esse tempo no planejamento da produção quando houver a mudança da peça produzida.
- O tempo de *setup* para a troca de família de tipo de processo é de aproximadamente 30 minutos.
- Entre 60% e 70% da produção de machos, na fundição estudada, é feita através de tipo de processo de cura fria (Isocure e Ecolotec).

3.1.5 Moldagem

A Moldagem é responsável pela confecção dos moldes, sendo o processo de fabricação conhecido com moldagem em areia. O processo de moldagem em areia pode ser visto no capítulo de introdução, onde o mesmo é explicado junto ao processo produtivo de uma fundição.

Resumidamente, a confecção do molde é feita através da compactação de areia em torno do modelo. Esta compactação é feita nas máquinas de moldagem e dentro de uma caixa de moldar.

Existem sete máquinas de moldagem na fundição estudada, sendo que seis dessas são pneumáticas (automatizada) e uma é manual, que está sendo desativada. Com relação á produção dos moldes, cabe ao Setor de Moldagem

seguir o sequenciamento da produção feito pelo Setor de PCP. A **Figura 9** apresenta uma Ordem de Produção destinada a Moldagem.

ORDEM DE PRODUÇÃO – MOLDAGEM										*0657850*	
02/08/2007-17:58:00										*0657850*	
RN176M - SUPORTE CAIXA - MOLDE								DESENHO 70100013	REV. A		
QUANTIDADE BOLOS 250	TURNO 1			TURNO 2			DATA INÍCIO 17/07/2007	DATA ENTREGA			
	A FABRICAR	FABRICADO	REFUGO	A FABRICAR	FABRICADO	REFUGO					
MATERIAL: GGG40	8-7 C			DADOS MÓVEIS: 992							
FAB:	FUSÃO	TURNO 1:		SALDO:		TURNO 2:	SALDO:				
OF - FUSÃO	661778										
LISTA DE MATERIAIS											
CÓDIGO	DESCRIÇÃO										QUANTIDADE
02040057	LUVA EXOMIL 200 8 X 11 SEM MACHO										1,00000
02040071	FILTRO REDONDO 50 X 22 X 10 PPI										1,00000
99020002	AREIA TIPO II ESPECIAL										3,80000
RN176MA	SUPORTE CAIXA - MACHO A										1,00000
RN176MB	SUPORTE CAIXA - MACHO B										1,00000
ROTEIRO DE FABRICAÇÃO											
OPER	MAQUINA	DESCRIÇÃO DA TAREFA				TEMPO HOMEM	TEMPO MAQUINA	TEMPO PREPARO	APROVADO POR		
10	MA001	PREPARAR AREIA MOLDAGEM				1,5000	1,5000	10,0000			
20	MMP009	CONFECCIONAR MOLDE				8,8200	8,8200	20,0000			
CP: DUREZA DO MOLDE####PINTAR REGIÃO ENFRETE DOS MASSALOTES											
QUANTIDADE MODELOS: 1		PESO BOLO:		RESP.LIBER.FERRAMENTAL: _____							
PESO BOLO	DUREZA ENC	TURNO	DATA	OPERADOR	Nº REGISTRO	CAIXA MOLDAR	LOCAL				

Figura 9: Ordem de Produção da Moldagem

Assim como acontece na macharia, cada peça da moldagem possui uma máquina preferencial, sendo que no momento do sequenciamento da produção, cada peça é programada para ser produzida em sua máquina preferencial. Também é possível que uma peça possa ser produzida em outra máquina que não seja a preferencial, dependendo do encaixe do ferramental.

O processo referente ao planejamento da produção das máquinas da moldagem, bem como todos os ajustes e restrições impostos ao processo, foram explicados anteriormente no item referente ao PCP.

Para cada máquina de moldagem, existe uma quantidade variada de linhas de produção. A **Figura 10** mostra uma linha de produção em processo de vazamento. Na medida que as caixas ficam prontas, elas vão sendo inseridas em

uma das linhas de produção, que esteja disponível, e aguardam para serem vazadas. Após o vazamento, as caixas aguardam o tempo necessário de resfriamento de cada peça para seguirem para a desmoldagem. O controle para saber qual caixa pode ser desmoldada é feita de forma individual, ou seja, caixa a caixa, pois podem existir na mesma linha de produção peças com diferente tempo de resfriamento, bem como as caixas onde o vazamento foi feito por primeiro terão suas peças solidificadas antes do que as que foram vazadas por último.



Figura 10: Linha de produção em processo de vazamento.

Cada máquina de moldagem pode trabalhar em paralelo, ou seja, enquanto uma estiver fazendo o molde/macho de uma peça, as outras podem estar fazendo o mesmo processo para outras peças. Aqui cabe uma observação, como existem três fornos é possível produzir peças de diferentes tipos de liga ao mesmo tempo.

3.1.6 Fusão

Atualmente a Fundição trabalha com dois tipos de ferros, o cinzento e o nodular. O que diferencia um do outro é a forma da grafite do ferro. Ao ser feito um corte numa peça fundida ou se for pego uma moeda (amostra do líquido, retirado no momento do último vazamento), poderá ser verificado que a grafite do cinzento é em forma de veio e a grafite do nodular é em forma de nódulos. Atualmente cerca de 75% da produção é de ferro nodular.

Cada peça a ser produzida possui uma especificação quanto á composição química da mesma. Essa composição química é feita através de normas que podem

ser próprias da empresa ou dos clientes ou ainda pode ser uma norma internacional. O ideal é juntar as peças que possuem o mesmo tipo de composição numa mesma fornada, minimizando assim o tempo de espera de produção das peças. A **Tabela 1** mostrar os componentes e o percentual necessário dos mesmos, para que a peça fique dentro das especificações.

Componente	GRADE 1	GRADE 2
Carbono	3,1 – 4,2 %	3,5 – 4,1 %
Silicon	2,3 – 2,8	2,4 – 2,7
Manganês	5,0 – 5,5	5,3 – 5,4
Súlfur	1,5 – 1,8	1,6 – 1,7

Tabela 1: Composição química de uma peça.

A norma específica à dureza (uma faixa) das peças, onde o material tem que atender algumas propriedades tipo alongamento, escoamento, entre outras. Também especifica a matriz, se ela é Ferrítica (mais mole) ou Perlítica (mais dura) ou se há uma combinação entre ambas.

A correção química é feita diretamente nas panelas, ou seja, os componentes fundidos formam uma massa, que é analisada quimicamente, para que sejam feitas as devidas correções antes do vazamento.

Atualmente existem três fornos da fundição, sendo que cada um possuiu dois cadinhos (locais onde são depositados a matéria prima a ser fundida). Existem dois fornos com a mesma capacidade, que é de 2 (duas) toneladas por cadinho, e com o mesmo tipo de funcionamento, o forno opera a 1.300 kw. Como são fornos mais antigos existe uma limitação com relação ao processo de fusão, onde somente um cadinho é fundido por vez. Isso gera uma perda de tempo e muitas vezes um re-trabalho dos fornos para aquecer novamente o líquido que já foi fundido. Com o passar do tempo o líquido começa a resfriar e perder as características ideais para o vazamento e necessita ser reaquecido. Aí surge mais um problema, pois o forno pode estar com um novo cadinho em processo de fusão.

O terceiro forno possuiu uma capacidade de quatro toneladas por cadinho, sendo que o forno opera a 2.000 KW. Nesse forno é possível colocar os dois cadinhos ao mesmo tempo e escolher o percentual de energia de fusão para cada um deles. Ex.: O 1º cadinho está com 90 % da capacidade do forno em processo de

fusão, já o 2º cadinho está com 10 % da capacidade do forno em processo de manutenção da temperatura do líquido já fundido.

O tempo médio de fusão, para cada cadinho, é de uma hora, independente do tipo de forno e do tipo de ferro usado.

A matéria prima utilizada para a confecção das peças é composta por: sucata de aço, minério de ferro (gusa) e retorno da fundição. A composição da carga (sucata, minério de ferro e retorno de fundição) pode afetar a produtividade, pois é difícil de conseguir sucata de forma compacta em pequenos lotes. Pode-se dizer que uma carga compacta aumenta o rendimento da fusão e em contrapartida uma carga menos compacta diminuiu o rendimento. Ex.: Utiliza-se cerca de 30 % de retorno, 20% de minério e 50% de aço.

O retorno de fundição, que é composto por peças problemáticas e sobras de materiais retirados durante a quebra de canal, é um componente que interfere diretamente no custo da produção, pois na falta do mesmo obriga a empresa utilizar outros componentes para fazer a liga. Na maioria das vezes a substituição considera o minério de ferro (gusa), que possui um valor comercial elevado se comparado com a sucata e o retorno da fundição.

Os seguintes problemas, que afetam a produtividade dos fornos, podem ocorrer numa linha de produção:

- número de linhas de produção reduzidas. Pode acontecer que as linhas de produção de uma ou mais máquinas de moldagem estejam preenchidas com caixas de moldar aguardando para serem desmoldadas. Como não existe espaço físico nessa linha de produção, caberá a máquina de moldagem interromper a sua produção. O metal líquido que está no forno, que atende a essa linha de produção deverá permanecer lá, acarretando um gasto desnecessário de energia.
- falta de matéria prima. É necessário que o setor responsável pela aquisição de material providencie a quantidade planejada do material necessário para a produção, tanto da macharia, como da moldagem e da fusão.
- quebra de alguma máquina de moldagem. A quebra de uma máquina de moldagem pode ser considerada como um surgimento de um gargalo, e precisa ser reportada ao PCP para que sejam feitos os devidos ajustes, afim de não perder a capacidade produtiva dos fornos.

- quebra de um dos fornos. Da mesma forma como acontece com uma máquina de moldagem, a quebra de um forno é considerado como um gargalo do sistema produtivo, e tem que ser reportado para o PCP para que sejam feitos os ajustes necessários, afim de adequar a capacidade produtiva aos fornos disponíveis.
- demora na hora do vazamento;
- falta de sincronismo entre a moldagem e a fusão. É necessário haver um sincronismo entre a etapa de moldagem e a de fusão, para que não falte metal líquido ou a falte caixas para vaziar, pois essa falta de sincronismo além de diminuir a produtividade aumenta os custos de produção.
- desperdício de líquido no momento do vazamento. O vazamento deve ser feito por profissionais treinados, que atentem para o local certo para o vazamento (canal de vazamento) e para quando o molde estiver preenchido.
- problemas com o molde. Moldes com problemas geram peças problemáticas, foras da conformidade, o que requer novamente a sua produção.
- necessidade de correção do líquido fundido (ex.: pouco minério de ferro), onde o bolo tem que voltar ao forno para misturar novamente os componentes.

3.1.7 Vazamento

No processo de vazamento, o metal na sua forma líquida é inserido no molde/macho através do canal deixado durante a fase de moldagem. O metal líquido é passado para as painelas, que podem ser de 500 ou 250 kg.

A **Figura 11** mostra uma painela no momento do vazamento. As painelas podem receber o metal líquido de qualquer um dos fornos, independente do tipo de liga produzida. Para evitar que existam problemas com as diferentes ligas, na fundição estudada, procura-se utilizar os cadinhos de número 5 e 6 para a produção de ferro cinzento e também, como foi citado anteriormente, agrupar a produção por tipo de metal, facilitando o controle no momento do vazamento.

Da mesma forma que as panelas podem receber o metal líquido de qualquer um dos fornos, elas podem se movimentar por qualquer uma das linhas de produção das máquinas de moldagem. As caixas de moldar que estão dispostas nas linhas são preenchidas, uma a uma, com o metal líquido, atentando para o tipo de liga que a caixa deverá receber.



Figura 11: Panela de vazamento.

Na última caixa é retirada uma moeda (amostra do líquido) que novamente é posto a prova. Esse último teste é chamado de metalografia e serve para determinar o tipo de ferro fundido, se ele é nodular ou cinzento. O cliente pode especificar qual o tipo de grafia desejada. Ex.: Cinzento, nodular e/ou cinzento especial.

3.1.8 Desmoldagem

Após o vazamento é feito o processo de desmoldagem. A peça é retirada da caixa de moldar, sendo a areia separada da mesma. Este processo é realizado por uma máquina de desmoldagem, conforme pode ser visto na **Figura 12**. A areia que sobra na desmoldagem volta para o processo de produção. As peças, após a desmoldagem, vão para uma área de resfriamento onde são separadas por clientes.



Figura 12: Máquina de Desmoldagem.

3.1.9 Quebra de Canal

Para a retirada dos canais e alimentadores, que estão “solidificados” juntos à peça, é necessária uma força bruta conhecida como quebra de canal, onde a separação é feita através de impactos de forma manual ou através de equipamentos.

Junto ao processo de quebra de canal é analisado se a peça contém a “dureza” especificada para ela. A verificação é feita por amostragem, se a peça não estiver dentro das especificações, a mesma, juntamente com o lote da qual faz parte, é submetida a uma batelada de testes. As peças que não são aprovadas pelo teste de dureza, juntamente com os canais e alimentadores servem de matéria prima para os fornos, sendo chamados de retorno de fundição.

3.1.10 Demais Processos

As peças aprovadas pelo teste de “dureza” são limpas pelo processo de jateamento de areia, onde são removidos os machos e a areia que está sob a superfície da peça. A limpeza se dá através de uma substância abrasiva, em grãos, arremessadas sob pressão de encontro com a superfície das peças. Ao final do processo de limpeza é verificado pelos inspetores de qualidade se a peça está

dentro dos requisitos, ou se a mesma não sofreu nenhuma danificação no processo de quebra de canal.

A peça passando pelo controle de qualidade é encaminhada para a rebarbação, onde são retiradas as rebarbas e outras protuberâncias em excesso na peça, através de esmerilhadeiras. Novamente é feito um controle de qualidade sobre as peças. Passando por esse controle, a mesma segue para a pintura e posteriormente para o setor de expedição que pode encaminhar as peças para a usinagem ou direto para os clientes.

3.2 Descrição do Problema

Após o detalhamento do processo produtivo, da fundição estudada, é possível constatar que o problema a ser resolvido é da programação da produção em um ambiente flow shop, sendo que o trabalho abordará dois estágios, onde o primeiro refere-se a macharia e o segundo á moldagem. A resolução do problema se dará de forma individualizada por estágio, o que permite caracterizar o mesmo como sendo um *parallel machines scheduling* (problema de máquinas paralelas), possibilitando desconsiderar o flow shop na resolução do mesmo.

Com a abordagem dos estágios de forma separada, pode-se dizer que o problema de programação da produção será o do sequenciamento da produção, respeitando as características e restrições impostas em cada um dos estágios. A função objetiva de cada um dos estágios será descrita posteriormente, após o detalhamento das características de cada uma das fases, mas pode-se dizer que o objetivo geral é o de encontrar uma alocação de todas as tarefas nas máquinas existentes que otimize um ou a combinação de múltiplos critérios.

3.2.1 Primeiro Estágio – Macharia

A **Figura 13** mostra o processo produtivo da macharia.

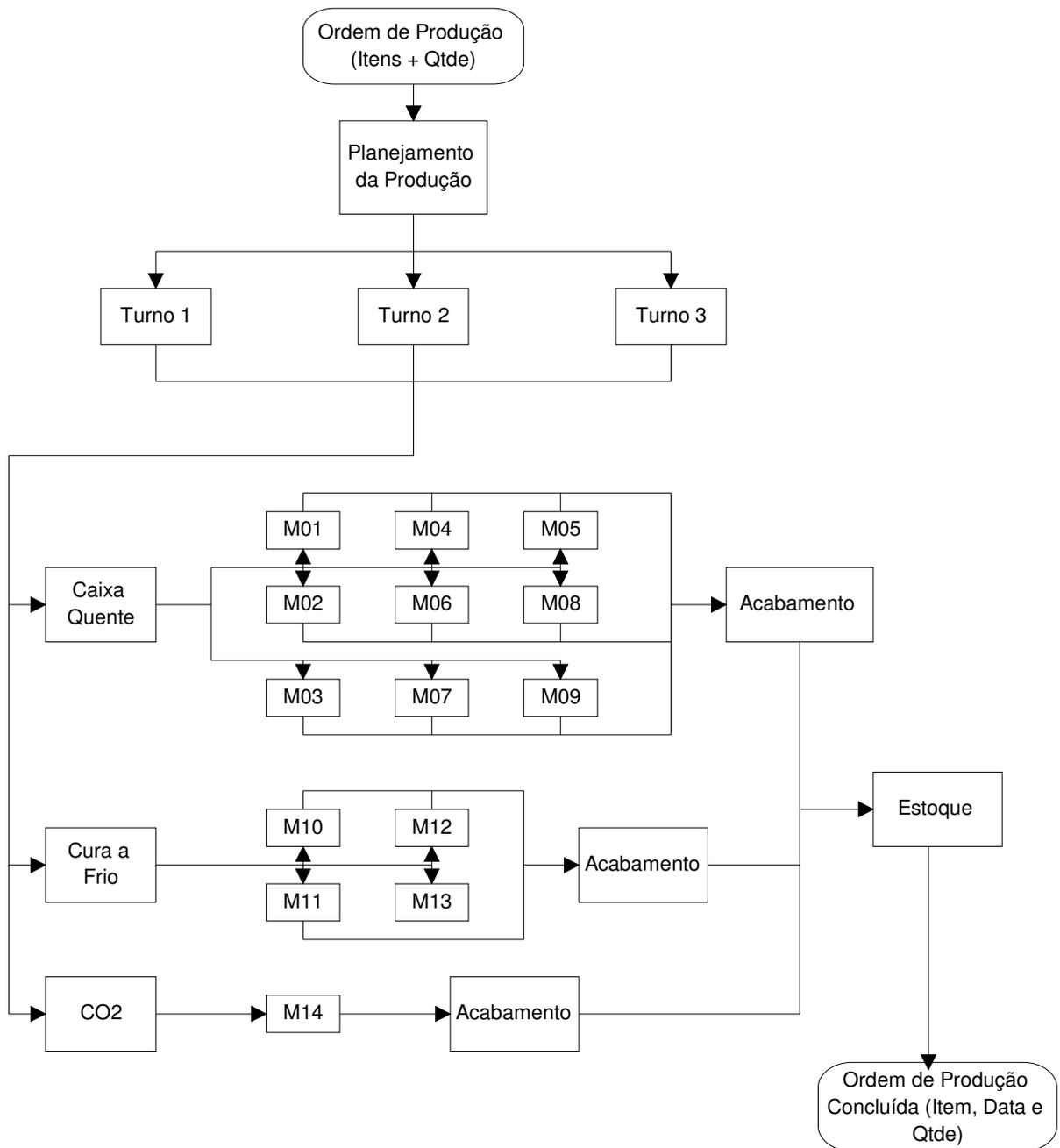


Figura 13: Processo produtivo da macharia.

As ordens de produção, para a macharia na fundição estudada, são impressas com três dias de antecedência. Atualmente existem três turnos de trabalhos, que abrangem 24 horas por dia de produção, sendo os turnos organizados da seguinte forma:

- 1° Turno: 07:00 até às 15:20 horas;
- 2° Turno: 15:20 até às 23:27 horas; e
- 3° Turno: 23:27 até às 07:00 horas.

Em cada turno de trabalho existe uma parada programada para as refeições. Os horários de paradas são os seguintes:

- 1° Turno: 12:00 até às 13:00 horas;
- 2° Turno: 19:00 até às 20:00 horas; e
- 3° Turno: 03:00 até às 04:00 horas.

A produção dos machos é feita por mais de um tipo de processo de produção, sendo que para cada um existe um ou mais equipamentos.

O processo de cura fria possui quatro máquinas para a produção dos machos (Ma10, Ma11, Ma12 e Ma13), sendo que uma delas pode produzir até 3 machos ao mesmo tempo (Ma13-1, Ma13-2 e Ma13-3), conforme pode ser visto na descrição do processo da macharia.

Quanto á velocidade de processamento das máquinas, segundo Ravetti (2003), podemos classificar as máquinas Ma10, Ma11 e Ma12, como sendo máquinas idênticas, pois possuem a mesma velocidade de processamento. Já a máquina Ma13, pode ser classificada como máquina não relacionada, onde a velocidade de processamento depende diretamente da tarefa a ser executada.

Para efeitos de planejamento da produção, a máquina que pode fabricar três machos ao mesmo tempo (Ma13) será considerada como se fossem três máquinas independentes. Sendo que, para cada ferramental a mais inserido, com limite de três, deverá ser aumentado o tempo de produção em 15 %. Para evitar uma perda maior na produtividade, devem ser produzidas nessa máquina, peças que possuam o tempo de produção similar. Caso o tempo de produção das peças for maior do que a soma dos tempos de produção individual, a programação não é válida para esse conjunto de peças. Para cada ferramental inserido é necessário acrescer o tempo de *setup* no tempo de produção.

Uma outra restrição, na cura fria, que deve ser considerada é quanto a família de tipo de processo de produção, conhecidos como Isocure e Ecolotec. Em cada troca de família de tipo de processo, existe a necessidade de trocar o tipo de resina, que leva cerca de 30 minutos, o que acarreta um aumento no tempo de produção dos machos, caracterizando assim um ambiente onde a produção é dependente da seqüência. Para maximizar a produtividade, as peças de um mesmo tipo e de uma mesma família de produção são agrupadas, de forma a serem produzidas seqüencialmente, evitando assim a perda desnecessária de tempo.

Antes de começar a produção de uma peça é necessário trocar o ferramental que está na máquina pelo da peça a ser produzida, ou seja, que se coloque na máquina de fabricação do macho o molde certo. Cada peça possui um tempo de *setup* para a troca de ferramental.

Ao iniciar um turno, cabe ao operador da máquina fazer uma verificação (*check list*) da mesma, esse é o tempo de *setup* inicial que deve ser computado somente no início de cada turno, sendo o mesmo de cinco minutos.

O tempo de produção e de acabamento de uma peça, tanto para a máquina preferencial como para as máquinas não preferências sempre será o mesmo, independente da máquina escolhida, e isso se deve ao fato das máquinas serem idênticas quanto á velocidade de processamento. A máquina Ma13 configura uma exceção, pois o tempo de produção aumenta quando for fabricado, ao mesmo tempo, mais de uma peça.

Para o sequenciamento da produção da macharia é considerado somente o tempo de produção do macho, sendo o tempo de acabamento desconsiderado, pois o mesmo não ocupa recursos da máquina. Já para o sequenciamento da produção da moldagem, na qual a possibilidade do não fornecimento de um macho afeta o planejamento da produção, deve ser considerado o tempo total de produção do macho, que é a soma do tempo produção e do tempo de acabamento. Nos dois casos, devem ser somados ainda os tempos de *seutp* envolvidos no processo de produção.

A **Figura 14** mostra o fluxograma da produção dos machos de cura fria.

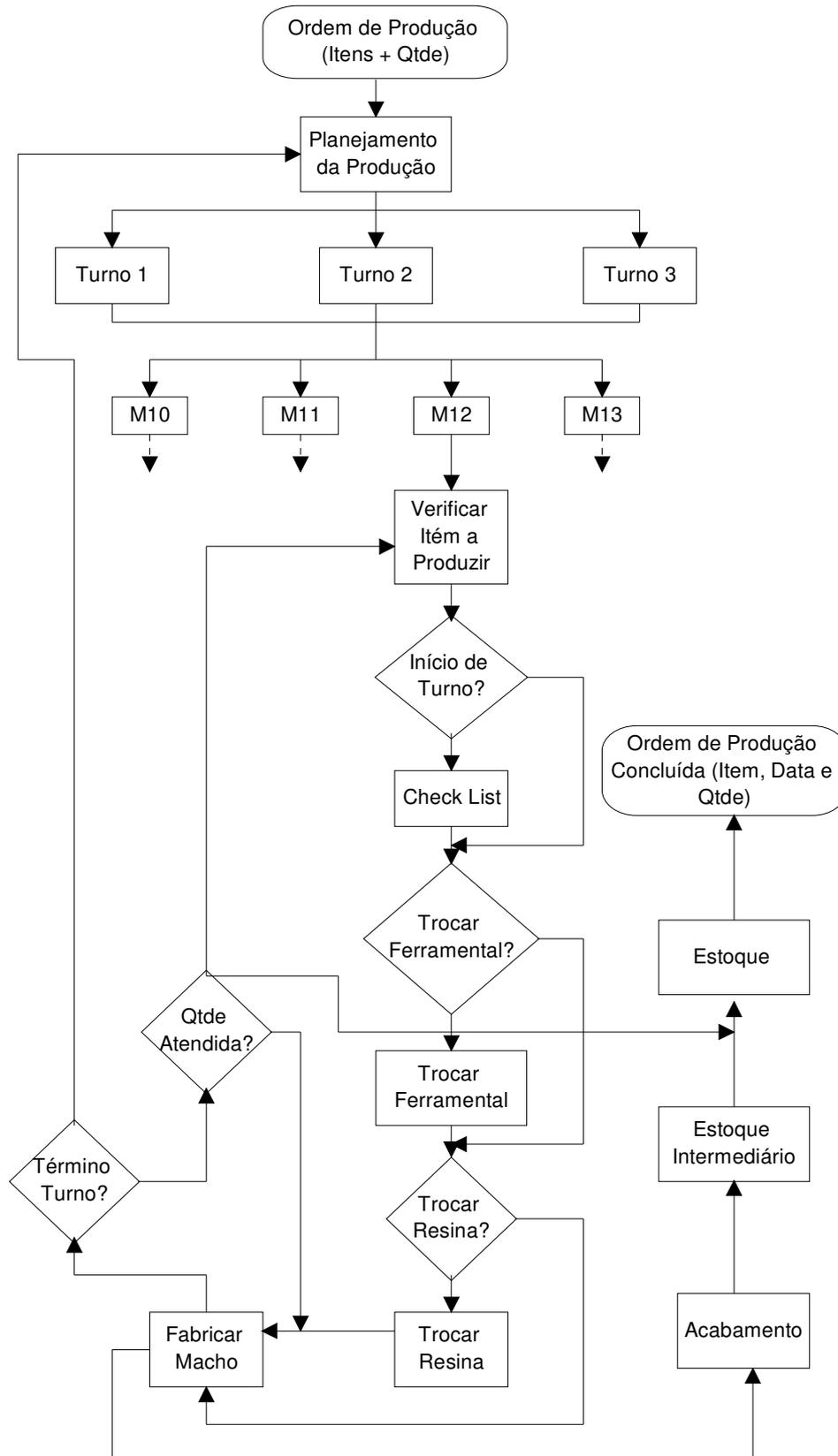


Figura 14: Fluxograma de produção do processo de cura a frio.

O processo que utiliza o sistema de Caixa Quente para a produção dos machos possui nove máquinas (M01, M02, M03, M04, M05, M06, M07, M08 e M09), sendo que três dessas máquinas (M05, M08 e M09) produzem machos de tamanhos maiores e seis máquinas produzem machos de tamanhos menores.

Não existe, nesse processo, nenhuma máquina que comporte, ao mesmo tempo, mais de um ferramental, como ocorre com uma máquina no processo de fabricação dos machos a frio.

Da mesma forma como ocorre no processo anteriormente descrito, antes de começar a produção de uma peça, é necessário trocar o ferramental que está na máquina pelo da peça a ser produzida, ou seja, que se coloque na máquina de fabricação do macho o molde certo. Ao mesmo tempo, em que o ferramental é trocado a máquina começa a ser aquecida e pode ser feito a trocar da areia + resina, se for o caso, ou seja, não requer um setup de família quando houver mudança da resina. Em geral o tempo de setup desse processo nas máquinas *Shell Molding* é de 30 minutos. Ao iniciar um turno, cabe ao operador da máquina fazer uma verificação (*check list*) da mesma, esse o tempo de setup inicial deve ser computado somente no início de cada turno, sendo o mesmo de 05 (cinco) minutos. Durante a parada para as refeições as máquinas ficam aquecidas, evitando assim a perda de tempo para reaquecimento.

Cada peça possui um tempo de produção e um tempo de acabamento, que são iguais, independente da máquina utilizada, o que novamente configura um ambiente de máquinas paralelas e idênticas na velocidade de processamento. Para efeitos de sequenciamento da produção da macharia é considerado somente o tempo de produção do macho, já para o sequenciamento da produção da moldagem, na qual a possibilidade do não fornecimento de um macho afeta o planejamento da produção, deve ser considerado o tempo total de produção do macho, que é a soma do tempo produção e do tempo de acabamento. Nos dois casos, devem ser somados ainda os tempos de *setup* envolvidos no processo de produção.

Existem peças que possuem mais de um ferramental, o que possibilita a produção em paralelo de uma mesma peça ao mesmo tempo, só que em máquinas diferentes.

A **Figura 15** mostra o fluxo de produção de uma máquina que utiliza o processo de caixa quente.

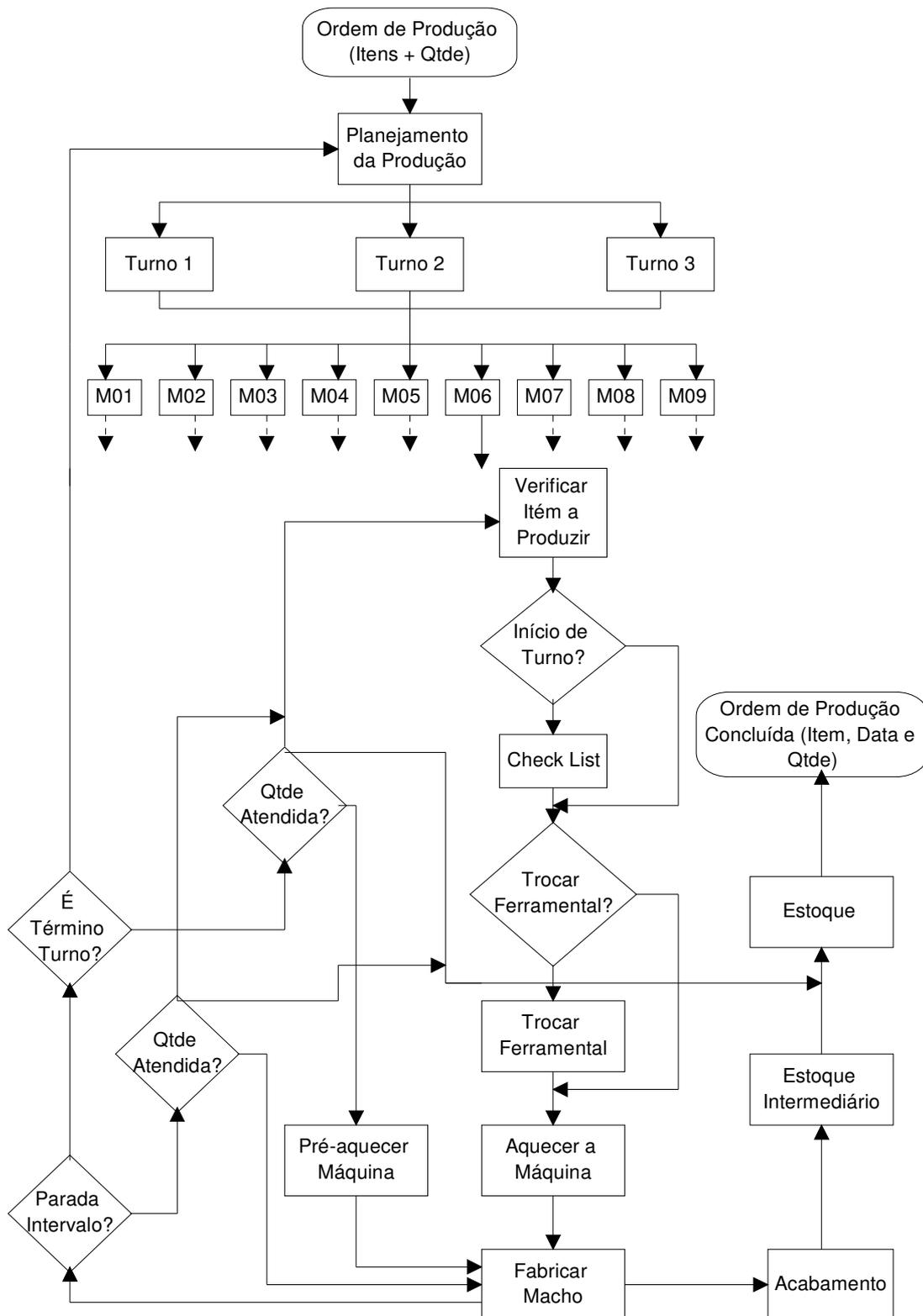


Figura 15: Processo caixa quente.

O processo que utiliza o Co₂ como agente de cura é feito de forma manual, sendo que cada peça possui um tempo de produção e um tempo de acabamento,

bem como um tempo para troca de ferramental. O tempo total de produção é igual à soma do tempo de produção mais o tempo de troca de ferramental.

Uma observação importante, com relação à produção dos machos, é de que um molde pode comportar vários machos, ou seja, vários machos são produzidos ao mesmo tempo. Para efeitos da programação da produção, a quantidade a ser produzida deve ser dividida pela quantidade de macho que cada molde possui. Com relação ao tempo de produção, o molde independente da quantidade de machos, deve ser considerado como se fosse uma peça.

3.2.2 Segundo Estágio – Moldagem

A **Figura 16** mostra o processo produtivo da moldagem.

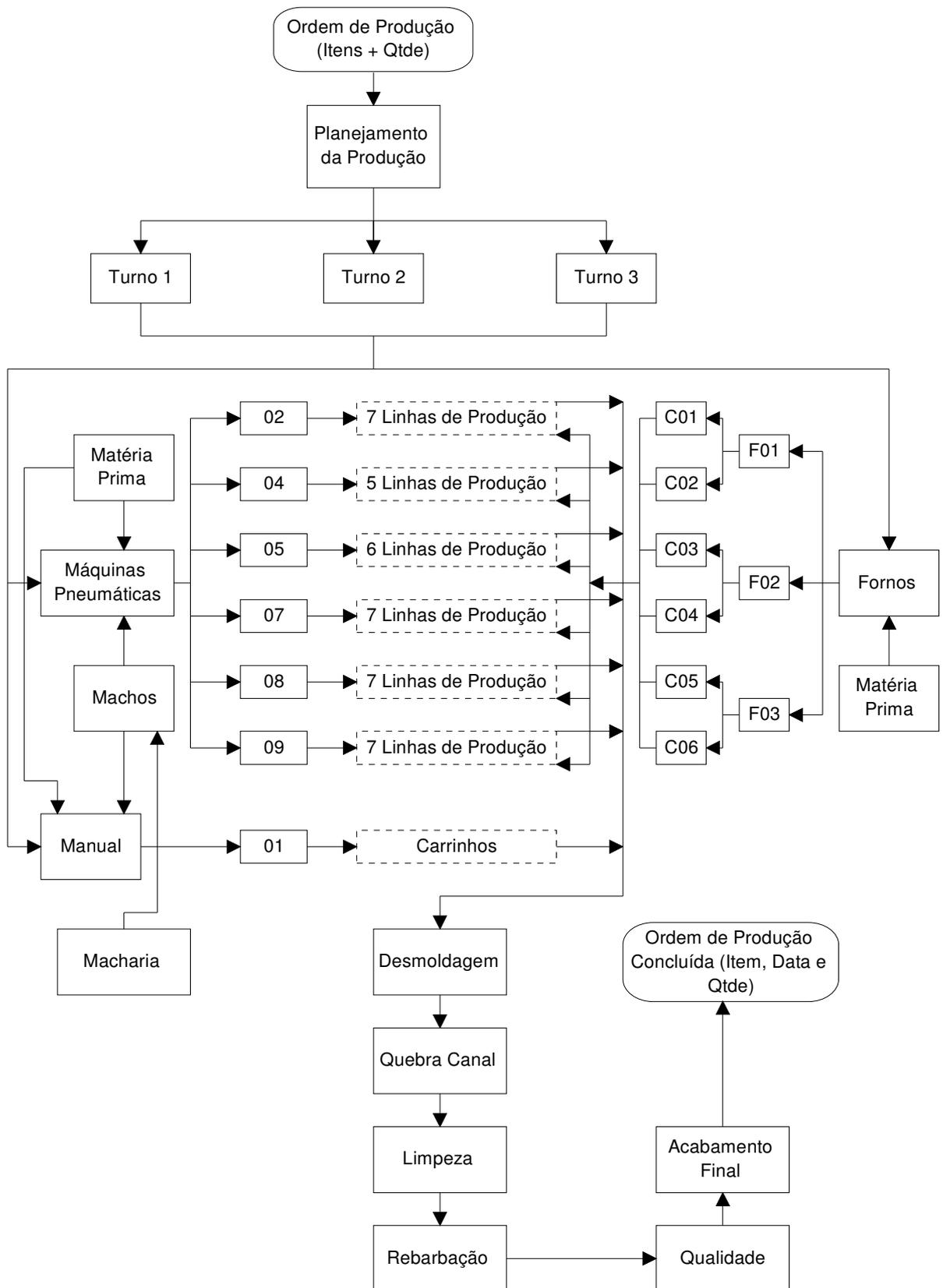


Figura 16: Processo produtivo da moldagem.

Não existem tipos distintos de processos de fabricação de moldes como existe na macharia, mas a produção dos moldes pode ser separada pelo tipo de ferro das peças, o que possibilita a classificação delas em famílias de processo de fabricação, mas sem tempo de setup na troca de uma família para outra.

O sequenciamento da produção leva em conta a existência dos turnos de produção e dos intervalos para as refeições, que são os mesmos da macharia, citado anteriormente. Existem seis máquinas de moldagem pneumáticas, sendo que cada uma possui várias linhas de produção, onde as caixas aguardam o vazamento e posteriormente a desmoldagem. Existe também uma máquina de fazer moldes de forma manual, sendo que as caixas ficam em carrinhos aguardando o vazamento e a desmoldagem. A empresa em estudo pretende desativar essa máquina num futuro próximo.

As caixas nas linhas de produção podem receber o metal líquido de qualquer um dos fornos, sendo que na prática o terceiro Forno (F03) é basicamente o único a produzir o ferro cinzento.

Os fornos possuem a seguinte capacidade produtiva:

- Forno 01 (F01), possui dois cadinhos (C01 e C02), cada um com capacidade de 2 toneladas por hora;
- Forno 02 (F02), possui dois cadinhos (C03 e C04), cada um com capacidade de 4 toneladas por hora;
- Forno 03 (F03), possui dois cadinhos (C05 e C06), cada um com capacidade de 2 toneladas por hora;

Atualmente os fornos não são gargalo na fundição estudada, pois possuem uma capacidade de produção superior ao das máquinas de moldagem, mas no futuro poderão vir a ser, bastando para isso a aquisição de mais máquinas de moldagem, ou até mesmo a desativação de um dos fornos. Como o planejamento dos fornos não será levado em conta nessa pesquisa, considera-se que esse problema pode ser resolvido através das técnicas heurísticas utilizadas por Landmann (2005) ou através do modelo matemático de otimização inteira mista proposto por Araújo (2003). A revisão das duas pesquisas citadas, que apresentam soluções para o problema do planejamento dos fornos podem ser vistas no **Capítulo 2**.

A capacidade de produção, em toneladas por hora, será considerada uma restrição para a heurística construída, pois a programação da produção das máquinas de moldagem não poderá exceder a capacidade dos mesmos.

Atualmente a produção diária da moldagem é em torno de 100 toneladas ao dia, já a capacidade dos fornos é de 192 toneladas, isso considerando que em uma hora podem ser fundidos três cadinhos, ou seja, 8 toneladas por hora. Deve-se salientar que a produção de 100 toneladas por dia é em virtude de que o planejamento da produção, programa as máquinas de moldagem, priorizando as datas de entregas dos pedidos dos clientes e entrega antecipada dos pedidos dos clientes preferenciais, no lugar de uma programação otimizada, que visa à maximização das toneladas produzidas.

A pesquisa também não se preocupava, com o tempo em que cada caixa leva para ser desmoldada, e assim retornar para a moldagem.

Da mesma forma que ocorre na macharia, um molde pode comportar várias peças. Para efeitos do planejamento da produção, a quantidade a ser produzida deve ser dividida pela quantidade de peças que cada molde possui. Com relação ao tempo de produção, o molde independente da quantidade de peças, deve ser considerado como se fosse uma só.

Antes de começar a produção de uma peça, é necessário trocar o ferramental, pelo da peça a ser produzida, ou seja, que se coloque na máquina de moldagem o molde certo. O tempo de *setup* assumido pela fundição estudada, para esse processo é de 10 minutos. Ao iniciar um turno, cabe ao operador da máquina fazer uma verificação (check list) da mesma, esse o tempo de *setup* inicial deve ser computado somente no início de cada turno, sendo o mesmo de 05 (cinco) minutos.

Cada peça possui um tempo de produção e um tempo de acabamento, que são iguais, independente da máquina utilizada para a produção, o que novamente configura um ambiente de máquinas paralelas idênticas na velocidade de processamento, exceto para a máquina 01, que é manual. Para efeitos de planejamento da produção é considerado o tempo médio de produção das peças, sendo o mesmo de 2 minutos e 40 segundos, e não o tempo exato de produção que muda de peça para peça.

Existem peças que o mesmo ferramental cabe em outras máquinas, o que possibilita a programação de uma peça em máquinas diferentes, sendo que o

sistema utilizado pelo planejador não considera a possibilidade de programar uma peça que não seja na máquina preferencial.

O tempo total de produção de uma peça, para efeitos de planejamento da produção da macharia, é a soma do tempo de produção mais os tempos de setup envolvidos no processo produtivo.

3.3 Objetivo do Trabalho

Este trabalho tem como objetivo aplicar técnicas heurísticas ao problema de planejamento da produção em fundições de mercado. Dada às características especiais do estudo de caso abordado (detalhado no item 3.2 descrição do problema), a otimização pretendida será aplicada ao processo de confecção de machos (macharia) e moldes (moldagem).

O critério de otimização da macharia é o da minimização da duração total da programação (*makespan*), sendo que a data de entrega dos machos é uma restrição ao problema que deverá ser respeitada para não acarretar atrasos na produção da moldagem.

Para a moldagem, existem dois critérios a serem otimizados, onde o primeiro é atender os pedidos que foram priorizados pelo PCP e o segundo é minimização da duração total da programação (*makespan*), para isso a data de entrega das peças deve ser considerada como uma restrição, de forma a evitar atrasos na produção das mesmas.

Para o problema de sequenciamento da produção da macharia, com o objetivo de atender o critério de otimização, será considerado para cada tarefa o seu tempo de processamento, a família a qual pertence e a sua data de entrega, envolvendo ainda os tempos de preparação da máquina quando se muda a tarefa a ser processada, podendo esses tempos serem dependentes ou independentes da seqüência de tarefas, dependendo de tipo de processo de fabricação a ser utilizado.

3.4 Metodologia Utilizada

Para simplificação do problema proposto, o mesmo foi dividido em dois sub-problemas, onde primeiramente será resolvido à programação da produção da

macharia, sendo que o resultado dessa etapa servirá como restrição para o segundo sub-problema, que é a programação da produção da moldagem. Dessa forma o problema a ser abordado é o de máquinas paralelas com famílias de *setup* dependente da seqüência.

Por se tratar de um estudo de caso em uma fundição, é possível considerar um terceiro sub-problema (estágio), que seria o da fusão, mas como foi explicado no item 3.2 (Descrição do Problema) o mesmo não será abordado, por se tratar de um problema resolvido.

Para a resolução do problema da programação da produção, tanto para a macharia como para a moldagem foi utilizada a meta-heurística GRASP, sendo o funcionamento da mesma descrita no próximo item e sua implementação descrita no próximo capítulo.

A utilização de heurísticas para tratar do problema proposto se deve ao fato da extrema complexidade, conforme visto na descrição do estudo de caso e também por ser um problema real, onde o tempo de resolução é considerado um fator crítico para a solução. Diante do exposto, pode-se dizer que as heurísticas são de extrema importância para obter uma solução razoável num tempo computacional viável.

3.5 GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure)

O método GRASP (procedimento de busca guloso, adaptativo e randômico), foi utilizado por Resende (1995) para resolver o problema nas diferentes instâncias. O algoritmo é uma meta-heurística constituída de duas fases, sendo que na primeira fase um método construtivo é utilizado na construção de uma solução viável, isso por meio de uma busca gulosa, já na segunda fase é utilizado um método de busca local, que serve para melhorar a solução inicial encontrada.

No método construtivo, todos elementos que deverão ser seqüenciados para a produção, são incluídos numa lista de candidatos, seguindo um critério de ordenação pré-determinado. O elemento, no caso desse trabalho, é a Ordem de Produção, que contém a necessidade de produção de uma única peça. Já o critério de ordenação é a data de entrega dessa Ordem de Produção. Para realizar a ordenação desejada é utilizada a heurística construtiva EDD. Os melhores candidatos são colocados numa lista restrita de candidatos (LRC).

A retirada dos candidatos da LRC se dará de forma aleatória, sendo o elemento retirado, inserido na solução que está sendo construída. Um parâmetro γ é utilizado para controlar o tamanho da LRC. A retirada de forma aleatória permite que diferentes soluções sejam construídas a cada nova iteração. Novamente a lista restrita de candidatos é preenchida, com novos candidatos, seguindo o critério de ordenação citado. O método construtivo estará finalizado quando todos os elementos forem inseridos na solução, e essa solução for considerada viável. Na busca local são analisadas as soluções vizinhas e a melhor é escolhida.

3.6 EDD (Earliest Due Date)

A heurística (EDD) é uma das mais utilizadas quando o sequenciamento envolve datas de entrega de produtos. Ela leva em conta somente às datas de entrega, ordenando as tarefas segundo uma seqüência não decrescente das mesmas.

Os passos da regra EDD são:

Passo 1 (Inicialização): Criar 2 vetores: A e B. Inicializar o vetor A com as tarefas na seqüência EDD. Inicializar o vetor B como nulo.

Passo 2 (Iterações): Inserir as tarefas segundo a seqüência de A no vetor B, sempre na posição que produza o menor atraso total parcial – caracterizado pelo menor atraso total considerando apenas as tarefas presentes no vetor B.

Passo 3 (Pós-Otimização): Aplicar um procedimento de melhoria (uma busca local) sobre a seqüência armazenada no vetor B do Passo 2.

O passo três não é utilizado pelo trabalho, pois o procedimento de melhoria (busca local) é feito pela meta-heurística GRASP.

4 DESENVOLVIMENTO DO GRASP

Nesse capítulo é apresentado o modelo matemático para o problema proposto e a descrição do desenvolvimento da meta-heurística GRASP, utilizada na resolução do problema.

A apresentação do modelo matemático se faz necessário, porque através dele é possível representar o problema, e essa representação servirá para avaliar e validar o método heurístico proposto. Os métodos de programação matemática, chamados de exatos, em geral são usados para resolver na otimalidade problemas de pequenas e médias dimensões, pois problemas maiores requerem um tempo computacional muito grande o que inviabiliza a utilização dos mesmos, que é o caso desse trabalho.

4.1 Modelo Matemático

Parâmetros:

F : número de famílias

B : número de batchs ou lotes

M : número de máquinas

p_{im} : tempo de processamento de uma tarefa da família i na máquina m

$$s_{ij} = \begin{cases} s^* & \text{se os batchs } i \text{ e } j \text{ são de famílias diferentes} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

C : um número suficientemente grande

d_i : data de entrega das tarefas da família i

n_i : número total de tarefas da família i

Variáveis:

y_{ikm} : tempo de início do processamento das tarefas da família i no lote k na máquina m

$$w_{ikjhm} = \begin{cases} 1 & \text{se as tarefas da família } i \text{ no lote } k \text{ precedem as tarefas da família } j \text{ no lote } h \text{ na máquina } m \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

x_{ikm} : número de tarefas da família i que compõem o lote k na máquina m

L_i : atraso das tarefas da família i

Modelo:

$$\text{Min } \sum_{i=1}^F L_i \quad (01)$$

s.a.

$$y_{ikm} \geq y_{jhm} + p_{jm}x_{jhm} + s_{ij} + (w_{jhikm} - 1)C \quad \forall j, i \neq j, h, k \quad (02)$$

$$L_i \geq y_{ikm} + p_{im}x_{ikm} - d_i \quad \forall i, k, m \quad (03)$$

$$\sum_{k=1}^B \sum_{m=1}^M x_{ikm} = n_i \quad \forall i \quad (04)$$

$$\sum_{i=1}^F \sum_{k=1}^B w_{ikjhm} = 1 \quad \forall j, h, m \quad (05)$$

$$\sum_{j=1}^F \sum_{h=1}^B w_{ikjhm} = 1 \quad \forall i, k, m \quad (06)$$

$$\sum_{j=1}^F \sum_{h=1}^B w_{01jhm} = 1 \quad \forall m \quad (07)$$

$$\sum_{i=1}^F \sum_{k=1}^B w_{ik01m} = 1 \quad \forall m \quad (08)$$

$$y_{ikm} \geq 0 \quad \forall i, k, m \quad (09)$$

$$L_i \geq 0 \quad \forall i \quad (10)$$

$$w_{ikjhm} \in \{0,1\} \quad \forall i, k, j, h, m \quad (11)$$

$$x_{ikm} \text{ inteiro} \quad \forall i, k, m \quad (12)$$

O modelo matemático apresentado tem como função objetivo a minimização do atraso total (1). A primeira restrição (2) modela o seqüenciamento das tarefas. A segunda restrição (3) fornece o atraso de cada tarefa. As restrições de (4) a (8) e (9) a (12) modelam, respectivamente a designação das tarefas e a definição do domínio das variáveis.

O modelo foi resolvido com o software CPLEX 10. Abaixo estão as informações da instância de teste utilizada.

Instância:

$$F = 7;$$

$$M = 3;$$

$$B = 3;$$

$$C = 100000;$$

$$SO = [5 \ 10 \ 10 \ 10 \ 10 \ 10 \ 30];$$

$$S = [0 \ 40 \ 0 \ 10 \ 40 \ 40 \ 30;$$

$$35 \ 0 \ 40 \ 40 \ 10 \ 10 \ 60;$$

$$0 \ 40 \ 0 \ 10 \ 40 \ 40 \ 30;$$

$$5 \ 40 \ 10 \ 0 \ 40 \ 40 \ 30;$$

$$35 \ 10 \ 40 \ 40 \ 0 \ 10 \ 60;$$

$$35 \ 10 \ 40 \ 40 \ 10 \ 0 \ 60;$$

$$5 \ 40 \ 10 \ 10 \ 60 \ 60 \ 0];$$

$$P = [1.1091 \ 1.3714 \ 1.1091 \ 1.7636 \ 1.3833 \ 1.7667 \ 2.1400];$$

$$N = [110 \ 70 \ 310 \ 110 \ 60 \ 60 \ 250] ;$$

Due dates são apresentadas no gráfico

Solução:

$$L \quad 470.362647$$

$$x_{6_3_1} \quad 5.000000$$

$$x_{5_1_1} \quad 60.000000$$

$$x_{7_1_1} \quad 2.000000$$

$$x_{1_3_1} \quad 53.000000$$

$$x_{4_2_1} \quad 108.000000$$

$$y_{6_3_1} \quad 10.000000$$

$$y_{5_1_1} \quad 28.833541$$

$$y_{7_1_1} \quad 171.831547$$

$$y_{1_3_1} \quad 206.111547$$

$$y_{4_2_1} \quad 269.893847$$

$$w_{6_3_6_2_1} \quad 1.000000$$

$$w_{5_1_5_2_1} \quad 1.000000$$

$$w_{7_1_7_2_1} \quad 1.000000$$

$$w_{1_3_1_1_1} \quad 1.000000$$

$$w_{4_2_4_3_1} \quad 1.000000$$

$$x_{2_1_2} \quad 70.000000$$

x_4_1_2	2.000000
x_1_3_2	57.000000
x_7_2_2	111.000000

y_2_1_2	10.000000
y_4_1_2	150.998001
y_1_3_2	164.525201
y_7_2_2	232.743901

w_2_1_2_3_2	1.000000
w_4_1_4_3_2	1.000000
w_1_3_4_1_2	1.000000
w_7_2_1_3_2	1.000000

x_6_3_3	55.000000
x_7_2_3	137.000000
x_3_2_3	310.000000

y_6_3_3	30.000000
y_7_2_3	177.166650
y_3_2_3	500.346650

w_6_3_6_1_3	1.000000
w_7_2_7_1_3	1.000000
w_3_2_7_2_3	1.000000

Representação Gráfica da Solução.

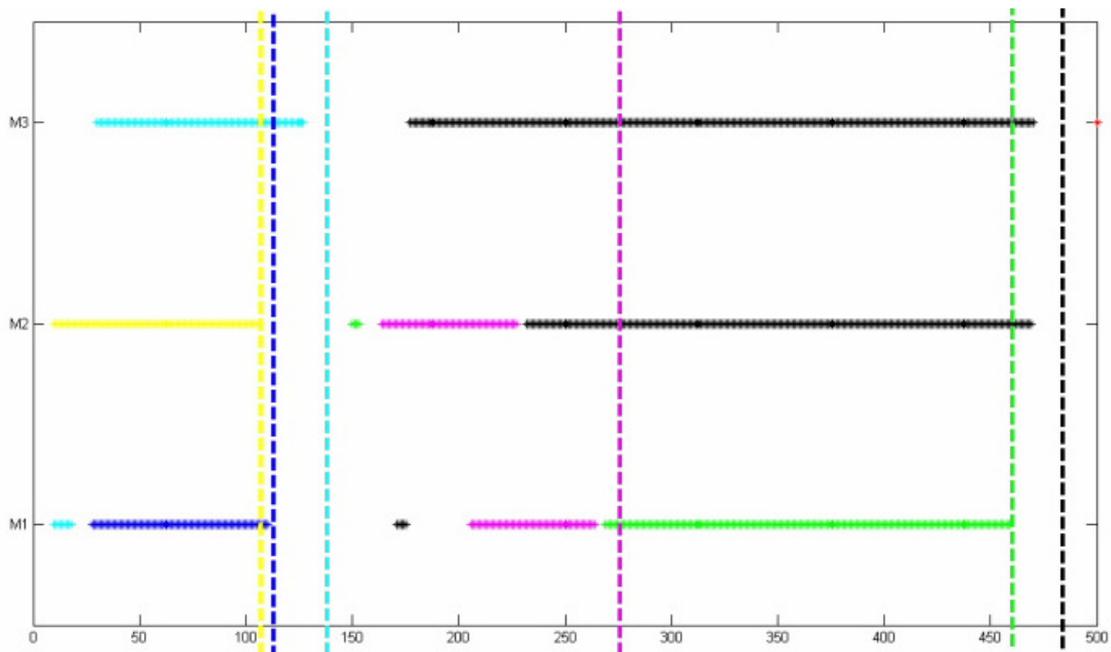


Figura 17: Representação gráfica da solução.

A instância foi construída com uma simplificação dos dados obtidos junto à fundição estudada.

4.2 Implementação do GRASP

Antes de começar a descrição da implementação do modelo é importante salientar que o objetivo do trabalho é a resolução do problema da programação da produção de uma fundição de mercado, mais especificamente, a resolução do problema do sequenciamento da produção envolvendo os estágios da Moldagem e da Macharia, sendo o GRASP utilizado como o método de resolução do problema proposto. Para atender as restrições de cada um dos estágios, a implementação foi dividida em duas, de forma individualizada para cada um deles.

A implementação do GRASP, como citado no **Capítulo 3**, é dividida em duas fases: um método construtivo e um de busca local, conforme pode ser visto na **Figura 18**.

```

Procedure GRASP (iterações,  $\gamma$ )
  1. Entrada dos Dados
  2. Ordenação das Tarefas_EDD
  3. For i = 0 to iterações Do
  4.   Solução = Construtivo Aleatorizado ( $\gamma$ , Tarefas_Ordenadas)
  5.   Solução = Busca_Local (Solução)
  6. End
  7. Return Melhor_Solução
end GRASP

```

Figura 18: Pseudocódigo GRASP

O primeiro parâmetro a ser definido é o número de iterações do método GRASP. Esse parâmetro pode ser um número fixo de execuções, como por exemplo: execute 10 iterações, ou, pode ser determinado por um tempo de execução onde será executado por t segundos (minutos), ou ainda pode ser determinado por um critério de parada, onde o algoritmo pára após executar um número i de iterações sem obter melhora na solução.

O segundo parâmetro a ser definido é o γ , onde $\gamma \in [0,1]$. O parâmetro γ define o tamanho da LRC. Entretanto, o presente trabalho, ao invés de utilizar um valor fixo para definir o tamanho da lista, irá calcular o tamanho da mesma antes da

inserção dos candidatos. O tamanho da lista é definido pelo número de candidatos existentes para cada data de entrega, separados pela família do tipo de processo de fabricação das peças. Diante desse contexto, o parâmetro γ , ao invés de determinar o tamanho da lista, é utilizado para determinar a maneira como os elementos serão retirados da LRC, sendo que, se $\gamma = 0$ o procedimento torna-se totalmente guloso e se $\gamma = 1$ o procedimento é aleatório.

Quando o parâmetro γ for definido como sendo igual a 1, é utilizada uma distribuição probabilística para retirada de um candidato da lista, onde um número aleatório $\in [0,1]$ é gerado, sendo que se o número for menor ou igual a 0,5, a função aleatória irá escolher um candidato que estiver entre os $x\%$ primeiros candidatos. Caso x for igual a 30%, existe uma probabilidade de 50% dos 30% melhores resultados serem alocados por primeiro.

A entrada dos dados, nada mais é do que a alimentação da matriz das tarefas a serem produzidas, conforme pode ser vista na **Tabela 2**, com as Ordens de Produção, contendo as peças, a quantidade a ser produzida e a data de entrega das mesmas.

Ordem P.	Peça	Quantidade	Data Entrega
00001	RN136M	150	17/04/2008
00002	RN176M	300	17/04/2008
00003	RN177M	300	17/04/2008
00004	CK064M	200	17/04/2008
00005	RN112M	300	17/04/2008
00006	RN180M	150	17/04/2008
00007	RB074M	200	17/04/2008
00008	RN176M	136	17/04/2008
00009	DN016M	100	17/04/2008
00010	SL515M	189	17/04/2008
00011	JD336M	90	18/04/2008
00012	MS002M	26	18/04/2008
00013	RN113M	300	18/04/2008
00014	SL162M	100	18/04/2008
00015	SL341M	181	18/04/2008
00016	SL957M	120	18/04/2008
00017	DA014M	80	18/04/2008
00018	SL328M	50	18/04/2008

Tabela 2: Ordens de Produção

Após a ordenação, que é feita pela heurística EDD, o método construtivo está pronto para ser iniciado. Os candidatos são inseridos numa Lista Restrita de Candidatos (LRC). A lista está ordenada pelo tempo de produção dos candidatos, aqueles que possibilitam uma melhora na solução são os primeiros da lista.

Os elementos da LRC retirados da lista são adicionados na solução, de forma que cada máquina contenha somente as tarefas possíveis de sua execução. Os

tempos adicionais, como o setup de ferramental, setup de troca de família de processo de fabricação, bem como os intervalos são adicionados ao tempo de produção das tarefas.

A escolha da máquina na qual a tarefa é inserida, varia por implementação do método, podendo ser a mesma escolhida de acordo com a máquina preferencial para a fabricação da peça, ou pela máquina que está menos carregada, ou seja, a que fique por primeiro disponível.

A **Figura 19** mostra o pseudocódigo do algoritmo utilizado na construção do método construtivo.

```

Procedure Construtivo Aleatorizado ( $\gamma$ , Tarefas_Ordenadas)
1. While  $K = 1 < Tam$  (Tarefas_Ordenadas) Do
2.   Tarefa_data_familia = (Tarefas_Ordenadas)
3.   Construção_LRC ( $\gamma$ , Tarefa_data_familia)
4.   Seleção de uma tarefa aleatória probabilística
5.   Alocação na máquina que complete mais rápido
6. End
End Construtivo

```

Figura 19: Pseudocódigo do algoritmo construtivo

Na segunda fase da meta-heurística GRASP, é utilizado um método de busca local, que tem por objetivo melhorar a solução inicial. O método utilizado para melhorar essa solução inicial é uma adaptação do Algoritmo 0/1-INTERCHANGE, apresentado por FINN e HOROWITZ (1979). O algoritmo 0/1-INTERCHANGE inicia alocando n tarefas as m máquinas em uma ordem aleatória. Então faz uma ordenação das máquinas de modo que $C_1 \geq C_2 \geq \dots \geq C_m$. Seja $d = C_1 - C_m$, a diferença entre os tempos de finalização da máquina mais carregada e da menos carregada. Se existir uma tarefa na máquina M_j , cujo tempo de processamento p_j é menor que d , então esta tarefa é retirada de M_j e realocada em M_m . O algoritmo continua com uma nova ordenação das máquinas de acordo com suas novas cargas, recalcula d e busca por uma tarefa na nova máquina M_j cujo tempo de processamento seja menor que d e realiza a troca. O algoritmo continua até que nenhuma tarefa em M_j satisfaça a condição $p_j < d$. A **Figura 20** mostra o Pseudocódigo do Algoritmo 0/1-INTERCHANGE

Passo 1: inicialize as máquinas alocando as n tarefas em uma ordem qualquer. Esse passo foi realizado pelo método construtivo, descrito anteriormente.

Passo 2: Ordene as máquinas de modo que $C_1 \geq C_2 \geq \dots \geq C_m$.

$$\text{Faça } d = C_1 - C_m$$

Passo 3: Se existir uma tarefa J_j , em M_1 , tal que, $P_j < d$

então remova J_j em M_1 , e recalcule sua carga, $C_1 = C_1 - P_j$

aloque J_j em M_m e recalcule sua carga, $C_m = C_m + P_j$

vá para o **Passo 2**

caso contrário vá para o **Passo 4**

Passo 4: Pare

Figura 20: Pseudocódigo do Algoritmo 0/1-INTERCHANGE

O método recebe como entrada o resultado gerado pelo método construtivo, onde existe um número m de máquinas, n tarefas e o tempo de processamento p_j de cada uma das tarefas. O número de máquinas a serem seqüenciadas pode variar de acordo com as Ordens de Produção, bem como as quantidades de tarefas a serem executadas, o que não muda é o tempo de processamento das tarefas. Como saída do método, tem-se a distribuição de forma balanceada das n tarefas nas m máquinas e o *makespan*, sendo o prazo de entrega respeitado.

4.3 Implementação do GRASP na Macharia

A implementação do GRASP no estágio da Macharia foi subdividida em duas implementações distintas. Uma para as máquinas que não utilizam setup de família, que é o caso dos machos fabricados pelo tipo de processo chamado de Caixa Quente, e outra para as que utilizam setup de família, que é o caso dos machos fabricados pelo tipo de processo chamado de Cura Fria. A implementação individualizada por tipo de processo de fabricação, deve-se ao fato que os mesmos possuem um conjunto distintos de máquinas, ou seja, um macho que é fabricado no processo Caixa Quente não pode ser fabricado pelo processo de Cura Fria e vice e versa, portanto não são concorrentes na produção das peças. Maiores detalhes podem ser vistos no **Capítulo 3**.

Inicialmente têm-se todas as tarefas a serem produzidas pela macharia numa mesma matriz, como pode ser visto no exemplo apresentado na **Tabela 3**. Ao

subdividirmos a implementação, a matriz passará a conter somente as tarefas de um determinado tipo de processo de fabricação dos machos.

Tarefa	Qtde	Data Entrega	Tipo Processo	Família
CK034MA	520	12/08/2007	Quente	Shell 9%
RN112MA	200	12/08/2007	Frio	Ecolotec
SL265MA	25	12/08/2007	Quente	Shell 3%
SL402MA	90	12/08/2007	Quente	Shell 4.5%
RB089MA	190	12/08/2007	Frio	Ecolotec
SL576MB	64	13/08/2007	Frio	Isocure
RB089MA	110	13/08/2007	Frio	Ecolotec
JD212MA	24	13/08/2007	Frio	Isocure
AC009MB	60	13/08/2007	Frio	Isocure
RN125MA	120	13/08/2007	Frio	Ecolotec
JD133MB	25	13/08/2007	Frio	Isocure
SL402MA	230	13/08/2007	Quente	Shell 4.5%
SL891MA	302	13/08/2007	Frio	Isocure
SL866MA	66	13/08/2007	Frio	Isocure
SL118MA	560	13/08/2007	Quente	Shell 3%
SL406MA	330	13/08/2007	Quente	Shell 3%
AC009MA	60	13/08/2007	Frio	Isocure
JD248MA	600	13/08/2007	Quente	Shell 4.5%
RN157MA	542	13/08/2007	Quente	Shell 4.5%

Tabela 3: Tarefas a serem produzidas pela Macharia

4.3.1 Implementação do GRASP na Macharia - Caixa Quente

Para a construção da solução inicial, primeiramente são ordenadas as tarefas a serem produzidas utilizando a data de entrega como critério principal e o tempo de produção das tarefas como critério secundário. A **Tabela 4** mostra uma abstração da matriz, com as tarefas ordenadas de acordo com o critério escolhido. A ordenação é feita através do método EDD, descrito no **Capítulo 3**.

Tarefa	Qtde	Data Entrega	Tipo	Família Processo
SL402M	90	12/08/2007	Quente	Shell 4.5%
CK096M	354	12/08/2007	Quente	Shell 3%
CK034M	520	12/08/2007	Quente	Shell 9%
AC044M	48	13/08/2007	Quente	Shell 3%
SL114M	10	13/08/2007	Quente	Shell 3%
SL118M	560	13/08/2007	Quente	Shell 3%
SL480M	310	13/08/2007	Quente	Shell 3%
SL118M	320	13/08/2007	Quente	Shell 3%
RN157M	542	13/08/2007	Quente	Shell 4.5%
RN133M	803	13/08/2007	Quente	Shell 4.5%
JD248M	600	13/08/2007	Quente	Shell 4.5%
CK079M	50	14/08/2007	Quente	Shell 3%
DN024M	150	14/08/2007	Quente	Shell 4.5%
SL480M	1565	13/08/2007	Quente	Shell 3%

Tabela 4: Ordenação das tarefas a serem inseridas na LRC

Após a ordenação, os candidatos (tarefas) são inseridos numa Lista Restrita de Candidatos (LRC). O tamanho da lista é definido de acordo com o número de candidatos por data de entrega. Através da **Tabela 4**, é possível verificar que o

tamanho da lista inicialmente será igual a três, pois existem três tarefas com a mesma data de entrega, no caso do exemplo a data é 12/08/2007.

Os elementos da LRC são adicionados na solução, de forma que cada máquina contenha somente as tarefas possíveis de sua execução. Escolhe-se aleatoriamente, através de uma distribuição probabilística, descrita anteriormente, uma tarefa candidata a ser inserida na solução.

A inserção da tarefa escolhida se dá através de uma função avaliativa, que verifica primeiramente qual é a máquina preferencial dessa tarefa, e em seguida, confere se essa máquina está vazia, se estiver insere a tarefa nela, caso não estiver vazia, verifica se existem outras máquinas possíveis para a execução da mesma, se não existir insere a tarefa na máquina preferencial independente de sua carga. Caso existam outras máquinas possíveis, insere a tarefa na máquina que estiver menos carregada, ou seja, a que terminar suas tarefas por primeiro. A **Figura 21** apresenta um gráfico contendo a distribuição das tarefas de acordo com o critério acima citado.

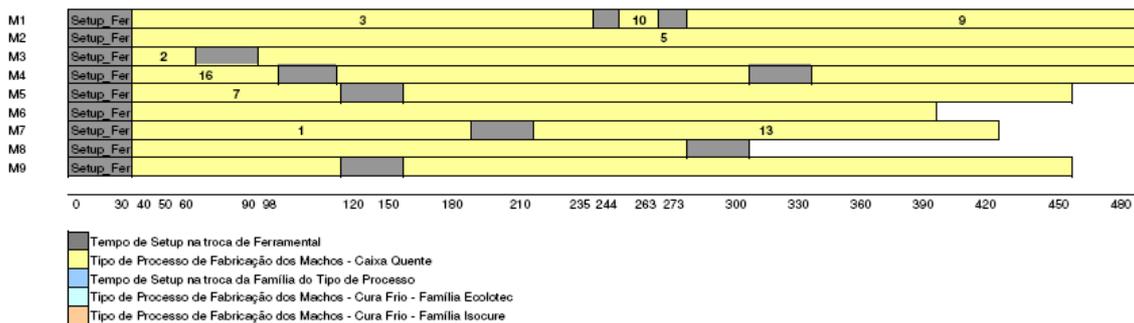


Figura 21: Gráfico com a distribuição das tarefas por máquina.

Concluído a primeira fase da meta-heurística GRASP, é iniciada a segunda fase, que é a busca local. O Algoritmo 0/1-INTERCHANGE, utilizado nessa fase, foi descrito anteriormente. O seu funcionamento pode ser entendido através do exemplo abaixo.

$m = 9 \{M_1, M_2, \dots, M_9\}$ (9 máquinas de tipo de processo caixa quente)

$n = 42$ (tarefas)

Passo 1: (tarefas seqüenciadas pelo método construtivo)

M	n	Data Início	Hora Início	Data Fim	Hora Fim	Qtde	Tempo Setup	p_j	Tempo Total
1	1	16/04/200	07:53	16/04/200	12:07	560	30	0,4	254
1	2	16/04/200	12:37	16/04/200	16:25	600	30	0,33	228
1	3	16/04/200	16:55	16/04/200	17:45	50	30	0,4	50
1	4	16/04/200	18:15	16/04/200	19:04	48	30	0,4	49,2
1	5	16/04/200	19:34	16/04/200	22:52	210	30	0,8	198
2	6	16/04/200	07:53	16/04/200	16:44	1565	30	0,32	530,8
2	7	16/04/200	17:14	16/04/200	22:09	803	30	0,33	294,99
2	8	16/04/200	22:39	17/04/200	01:54	500	30	0,33	195
2	9	17/04/200	02:24	17/04/200	03:21	100	30	0,27	57

2	10	17/04/200	03:51	17/04/200	14:06	780	30	0.75	615
3	11	16/04/200	07:53	16/04/200	08:52	25	30	1.15	58.75
3	12	16/04/200	09:22	16/04/200	13:02	760	30	0.25	220
3	13	16/04/200	13:32	16/04/200	14:19	48	30	0.36	47.28
3	14	16/04/200	14:49	16/04/200	16:19	750	30	0.08	90
3	15	16/04/200	16:49	16/04/200	20:07	300	30	0.56	198
3	16	16/04/200	20:37	16/04/200	22:48	252	30	0.4	130.8
4	17	16/04/200	07:53	16/04/200	08:45	90	30	0.25	52.5
4	18	16/04/200	09:15	16/04/200	12:55	542	30	0.35	219.7
4	19	16/04/200	13:25	16/04/200	15:51	330	30	0.35	145.5
4	20	16/04/200	16:21	16/04/200	18:24	46	30	2.02	122.92
4	21	16/04/200	18:54	16/04/200	20:29	123	30	0.53	95.19
5	22	16/04/200	07:53	16/04/200	10:02	260	30	0.38	128.8
5	23	16/04/200	10:32	16/04/200	12:50	100	30	1.08	138
5	24	16/04/200	13:20	16/04/200	15:38	120	30	0.9	138
5	25	16/04/200	16:08	16/04/200	17:08	75	30	0.4	60
5	26	16/04/200	17:38	16/04/200	18:30	250	30	0.09	52.5
5	27	16/04/200	19:00	16/04/200	20:46	70	30	1.08	105.6
6	28	16/04/200	07:53	16/04/200	10:49	520	30	0.28	175.6
6	29	16/04/200	11:19	16/04/200	12:47	230	30	0.25	87.5
6	30	16/04/200	13:17	16/04/200	16:29	650	30	0.25	192.5
6	31	16/04/200	16:59	16/04/200	17:53	60	30	0.4	54
6	32	16/04/200	18:23	16/04/200	22:33	630	30	0.35	250.5
7	33	16/04/200	07:53	16/04/200	13:55	950	30	0.35	362.5
7	34	16/04/200	14:25	16/04/200	15:04	10	30	0.9	39
7	35	16/04/200	15:34	16/04/200	16:20	50	30	0.31	45.5
7	36	16/04/200	16:50	16/04/200	20:20	600	30	0.3	210
7	37	16/04/200	20:50	17/04/200	00:18	318	30	0.56	208.08
8	38	16/04/200	07:53	16/04/200	14:09	184	30	1.88	375.92
9	39	16/04/200	07:53	16/04/200	14:52	354	30	1.1	419.4
9	40	16/04/200	15:23	16/04/200	19:05	150	30	1.28	222
9	41	16/04/200	19:35	17/04/200	02:55	910	30	0.45	439.5
9	42	17/04/200	03:25	18/04/200	10:43	1711	30	1.08	1877.88

Tabela 5: Passo 1

Passo 2: $C_1 \geq C_2 \geq \dots \geq C_m$ (Somatório do tempo de finalização das máquinas)

M	C_m	N
9	2958.78	4
2	1692.79	5
7	865.08	5
1	779.2	5
6	760.1	5
3	744.83	6
4	635.81	5
5	622.9	6
8	375.92	1

Tabela 6: Passo 2

Como pode ser observado, na **Tabela 6**, a máquina mais carregada é a $m=9$ e a menos carregada é a $m=8$. Calculando a diferença de tempo entre elas ($d = C_1 - C_m$), $d = 2.958,78 - 375,92 = 2.582,86$ minutos.

Passo 3:

- Verifica se existe uma tarefa J_j , em M_1 , tal que, $P_j < d$.

Além de verificar se existem tarefas que tenham um tempo de produção menor que a diferença entre a máquina mais carregada para a menos carregada, também deverá ser verificado se a mesma pode ser produzida pela máquina para

qual será movida. Se não puder, será escolhida uma outra tarefa para mover, que atenda os dois critérios. Caso não exista nenhuma tarefa, que possa ser movida para a máquina menos carregada, o algoritmo irá buscar a próxima máquina menos carregada, e assim por diante até esgotar a possibilidade de mover alguma tarefa da máquina mais carregada para uma menos carregada. Se não conseguir mover nenhuma tarefa, a próxima máquina mais carregada irá assumir o lugar da mais carregada e fazer o mesmo processo e assim sucessivamente até esgotar a possibilidade de mover alguma tarefa. A cada movimento válido, o algoritmo irá fazer novamente essa verificação.

Verificando na **Tabela 6**, é possível identificar que pela diferença de tempo, todas as tarefas que estão alocadas na máquina $m = 9$, ou seja, que pertencem ao conjunto {39, 40, 41 e 42}, poderão ser movidas para a máquina $m = 8$. Aplicando a segunda verificação, o conjunto de peças possíveis para a movimentação passou a ser esse {39, 41}.

Caso exista alguma tarefa que atenda a verificação acima descrita, o algoritmo executará os seguintes passos:

- remova J_j em M_1 , e recalcule sua carga, $C_1 = C_1 - P_j$;
- valide o movimento, caso a tarefa movida cause atraso na entrega das demais tarefas, o mesmo não será aceito e a próxima peça do conjunto será removida;
- caso o movimento seja aceito, aloque J_j em M_m e recalcule sua carga, $C_m = C_m + P_j$;
- vá para o **Passo 2**.

Caso não exista mais nenhuma tarefa a ser movida, vá para o **Passo 4**.

Passo 4: Pare, a iteração do GRASP está terminada.

Através do exemplo, acima descrito, é possível identificar o funcionamento da adaptação feita ao algoritmo 0/1-INTERCHANGE. O algoritmo original é finalizado quando não existe mais nenhuma tarefa para ser retirada, isso da máquina mais carregada para outra menos carregada, e o *makespan* é apresentado. Já a adaptação feita, permite que a próxima máquina mais carregada assuma como sendo a mais carregada, e reinicia o algoritmo. A cada movimento válido, é verificado novamente qual é a máquina mais carregada. O algoritmo só será finalizado quando não existir a possibilidade de mover nenhuma tarefa entre as máquinas. O resultado apresentado será o *makespan* de menor a igual ao da máquina mais carregada apresentado após a primeira fase.

A adaptação do algoritmo 0/1-INTERCHANGE, se faz necessária devido ao fato de que cada peça possui um conjunto distinto de máquinas possíveis para sua produção, o que impossibilita momentaneamente, a remoção de uma tarefa da máquina mais carregada para um menos carregada.

O motivo da escolha algoritmo 0/1-INTERCHANGE para a busca local e não os tradicionais como VND, VNS, entre outros, é o fato de que o mesmo evita uma busca exaustiva na vizinhança, além de objetivar uma distribuição balanceada na carga das máquinas, fato esse de suma importância num ambiente produtivo como da fundição estudada.

Após o término da iteração, o resultado obtido é comparado com o melhor resultado encontrado até então, se apresentar uma melhora no resultado, o mesmo passa a ser o melhor resultado.

A **Tabela 7** apresenta a soma dos tempos de produção após o término da iteração. Através dela é possível verificar que houve uma melhora significativa na alocação das máquinas.

m	C_m
1	889.78
2	868.57
3	892.89
4	903.6
5	916.29
6	1060.5
7	1008.58
8	1017.32
9	1877.88

Tabela 7: Tempo de produção após o término da iteração.

Uma outra maneira de visualizar os resultados obtidos é através do Gráfico de Gantt, apresentado abaixo.

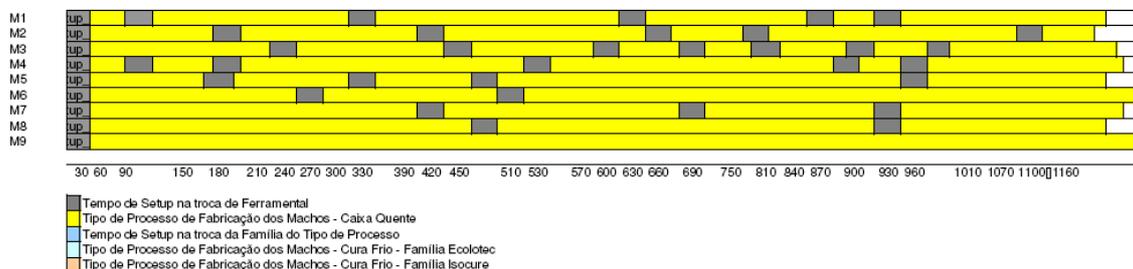


Figura 22: Resultado da programação das máquinas.

Analisando a **Tabela 7** pode-se verificar que a alocação da máquina $m = 9$ apresenta um tempo de produção maior que das outras máquinas. Ao analisar a **Figura 22** pode-se perceber que ela está executando uma única tarefa, de forma que não é possível melhorar seu tempo. Num horizonte de produção maior, essa

distorção provavelmente não irá ocorrer, pois a macharia não tem como característica a produção de uma quantidade elevada de uma mesma peça, pelo fato das mesmas apresentarem um tempo de vida útil muito pequeno, e com as constantes necessidades de reprogramação da produção, conforme citadas no **Capítulo 3**, as mesmas poderão ser perdidas.

Existem técnicas que trabalham com o dimensionamento de lotes, como a utilizada por Santos-Meza et al. (2002) citada no **Capítulo 2**, que poderiam melhorar a alocação das máquinas, no caso da existência da necessidade de produção de uma quantidade elevada de uma mesma peça, mas essas técnicas não serão objetos de estudo desse trabalho, pelos motivos citados acima.

4.3.2 Implementação do GRASP na Macharia – Cura Fria

Para a construção da solução inicial, da mesma maneira como foi feito para o tipo de processo de Caixa Quente, primeiramente são ordenadas as tarefas a serem produzidas, utilizando para isso a data de entrega como critério principal, a família de tipo de processo como segundo critério e o tempo de produção das tarefas como terceiro critério. A **Tabela 8** mostra as tarefas ordenadas de acordo com esses critérios.

Tarefa	Qtde	Data Entrega	Tipo Processo	Família Processo
RN112M	310	13/08/2007	Frio	Ecolotec
SL554M	110	13/08/2007	Frio	Ecolotec
JD190M	64	13/08/2007	Frio	Ecolotec
RN180M	20	13/08/2007	Frio	Isocure
AC009M	60	13/08/2007	Frio	Isocure
SL576M	64	13/08/2007	Frio	Isocure
SL576M	64	13/08/2007	Frio	Isocure
SL866M	66	13/08/2007	Frio	Isocure
RB060M	130	13/08/2007	Frio	Isocure
SL891M	175	13/08/2007	Frio	Isocure
SL891M	302	13/08/2007	Frio	Isocure
JD262M	16	14/08/2007	Frio	Isocure
SL340M	60	14/08/2007	Frio	Isocure
RB060M	150	14/08/2007	Frio	Isocure
RN112M	60	14/08/2007	Frio	Ecolotec
RN112M	160	14/08/2007	Frio	Ecolotec
RN114M	700	14/08/2007	Frio	Ecolotec

Tabela 8: Tarefas Ordenadas

A implementação do método construtivo para esse tipo de processo de fabricação apresenta algumas diferenças da implementação utilizada no tipo de processo de Caixa Quente.

A primeira diferença diz respeito à definição do tamanho da LRC, onde além da data de entrega deverá ser considerada a família do processo de fabricação, de forma que a mesma será composta somente por peças pertencentes a uma mesma família com uma mesma data de entrega, evitando assim perda de tempo com setup de família. Através da **Tabela 8**, é possível verificar que o tamanho da lista inicialmente será igual a três, pois existem três tarefas com a mesma data de entrega e que pertencem a mesma família, no caso do exemplo a data é 13/08/2007 e a família é Ecolotec. Seguindo no exemplo, o próximo o tamanho da lista será igual a oito, pois existem oito tarefas pertencentes ao critério de povoação da LRC.

A segunda diferença é com relação à alocação das máquinas, onde além de buscar a máquina menos carregada, a função avaliativa verifica em qual família de processo a máquina estava produzindo, para que sejam inseridas as tarefas primeiramente dessa mesma família, diminuindo também assim a perda de tempo com setup desnecessários. A verificação em qual máquina a tarefa será inserida, refere-se às máquinas que não são do tipo carrossel.

A terceira diferença, refere-se à máquina do tipo carrossel, onde uma mesma máquina pode produzir ao mesmo tempo, tarefas (peças) diferentes, desde que sejam de uma mesma família. No **Capítulo 3** são apresentados os detalhes e as particularidades dessa máquina. A inicialização dos parâmetros e o ajuste do tamanho da LRC para essa máquina serão os mesmo utilizados para as máquinas que não são do tipo carrossel. Para efeitos de implementação, cada um dos ferramentais, no montante de três, são considerados máquinas separadas. A função avaliativa irá verificar a quantidade de ferramentais que cada peça possui, bem como o tempo de produção da mesma. De posse dessas informações, irá verificar se é viável a inserção dessa tarefa, juntamente com as que já foram planejadas, ou se será necessário inseri-la após o termino dessas.

Independente do tipo de máquina, a retirada do candidato da LRC se dará da mesma forma como foi feito para o tipo de processo de Caixa Quente.

A implementação da segunda fase, a da busca local, é basicamente igual à implementação utilizada no tipo de processo de Caixa Quente. A diferença é com relação à inserção da tarefa em outra máquina, onde a mesma deverá ser inserida juntamente com as tarefas da família a qual pertence.

A **Tabela 9** apresenta o somatório dos tempos de produção encontrados na primeira fase. Já a **Tabela 10** apresenta os resultados encontrados após a execução

da segunda fase. Como pode ser observado houve uma melhora significativa em relação á ocupação das máquinas, bem como com uma diminuição do tempo de produção da máquina $m = 13$, isso devido à inserção de mais de um ferramental na produção das peças.

M	Cm
10	3453.44
11	2241.65
12	1851.92
13	5725.05

Tabela 9: Resultados da fase construtiva

M	Cm
10	2704.14
11	2624.95
12	2222.92
13	3576.89

Tabela 10: Resultados da fase de busca local.

4.4 Implementação do GRASP na Moldagem

A implementação do GRASP, no estágio da Moldagem é muito similar à implementação realizada para o tipo de processo de Cura Fria, do estágio da Macharia.

Da mesma forma como ocorre no estágio da Macharia, inicialmente tem-se as Ordens de Produção, conforme pode ser visto na **Tabela 11**, que servem de entrada para a matriz das tarefas a serem produzidas.

Ordem P.	Peça	Qtde	Data Produção
769794	JD186M	250	19/04/2008
771513	CK053M	110	17/04/2008
773700	DN016M	100	17/04/2008
774714	CK104M	100	20/04/2008
774716	CK104M	100	19/04/2008
774719	DA026M	45	18/04/2008
774726	DN024M	75	19/04/2008
774738	JD049M	55	19/04/2008
774766	JD190M	229	24/04/2008
774804	SL014M	164	20/04/2008
774813	SL180M	40	20/04/2008
774822	SL268M	110	19/04/2008
774831	SL406M	92	17/04/2008
774860	SL902M	45	18/04/2008
775800	CK063M	300	19/04/2008
775808	CK095M	250	23/04/2008
775818	DN030M	40	18/04/2008
775825	JD108M	18	19/04/2008
775849	JD194M	200	18/04/2008
775862	JD243M	16	22/04/2008
775869	MS002M	26	18/04/2008

Tabela 11: Ordens de Produção

A tabela esta ordenada pelo campo Ordem de Produção, sendo que o campo Data de Produção apresenta a data para qual a mesma foi programada, isso se deve ao fato de que o programador do PCP já fez as devidas alterações para atender as necessidades de produção. Como não é conhecida qual tarefa pode ter a sua data de produção postergada, o algoritmo foi construído para não aceitar soluções que apresentem atrasos na entrega das tarefas, restringindo assim a busca por melhores soluções.

Novamente a heurística EDD será utilizada para ordenar as tarefas, onde a data de produção é usada como critério principal, sendo a família de tipo de processo como segundo critério e o tempo de produção das tarefas como terceiro critério. Após a ordenação, que pode ser vista na **Tabela 12**, o método construtivo está pronto para ser iniciado.

Antes de fazer a inserção de uma tarefa na LRC é necessário que uma função avaliativa verifique se existem machos prontos na quantidade necessária para a confecção da mesma. Caso não existam machos prontos, a tarefa não será inserida na LRC até que essa restrição seja atendida. Como o GRASP, para essa etapa, foi construído para não aceitar soluções com atrasos como sendo válidas, isso devido ao contexto citado, é assumido que para essa situação, no momento da construção da LRC todos os machos necessários já foram entregues. Numa situação normal, onde atrasos são permitidos, a não disponibilidade dos machos irá acarretar no atraso da produção dessa tarefa, podendo até mesmo acarretar o atraso da produção de um modo geral, caso não for possível antecipar a produção de outras tarefas, pelo mesmo motivo, a indisponibilidade de machos.

Os candidatos são inseridos numa Lista Restrita de Candidatos (LRC), sendo o tamanho da lista definido de acordo com a quantidade de tarefas existentes para a data programada, juntamente com a família de processo de fabricação das peças, que nesse caso é o ferro Nodular ou Cinzento. Dessa forma a LRC, será composta somente por peças pertencentes a uma mesma família com uma mesma data de produção.

Ordem P.	Peça	Qtde	Data	Família
778683	CK050M	30	17/04/2008	Cinzento
778888	SL255M	40	17/04/2008	Cinzento
774831	SL406M	92	17/04/2008	Cinzento
776947	CK103M	100	17/04/2008	Cinzento
771513	CK053M	110	17/04/2008	Cinzento
780716	JD137M	140	17/04/2008	Cinzento
778913	SL515M	189	17/04/2008	Cinzento

778684	CK064M	200	17/04/2008	Cinzento
778889	SL265M	13	17/04/2008	Nodular
775959	RN213M	26	17/04/2008	Nodular
778855	SL070M	80	17/04/2008	Nodular
777155	RN176M	136	17/04/2008	Nodular
778843	RN180M	150	17/04/2008	Nodular
778822	RN136M	150	17/04/2008	Nodular
780806	RB074M	200	17/04/2008	Nodular
775947	RN177M	300	17/04/2008	Nodular
778805	RN112M	300	17/04/2008	Nodular
778836	RN176M	300	17/04/2008	Nodular
780730	JD163M	12	18/04/2008	Cinzento
780124	AC043M	25	18/04/2008	Cinzento
775869	MS002M	26	18/04/2008	Cinzento
777199	SL223M	40	18/04/2008	Cinzento
780973	SL774M	50	18/04/2008	Cinzento
777267	SL910M	50	18/04/2008	Cinzento
776961	JD002M	70	18/04/2008	Cinzento
777056	MS003M	120	18/04/2008	Cinzento

Tabela 12: Lista de candidatos ordenados pela data de entrega

Da mesma forma como ocorre no estágio da Macharia, os elementos da LRC são adicionados na solução, de forma que cada máquina contenha somente as tarefas possíveis de sua execução. Escolhe-se aleatoriamente, através de uma distribuição probabilística, uma tarefa candidata a ser inserida na solução.

Na busca local, a inserção das tarefas em outras máquinas deve ser feita juntamente com as tarefas da família a qual pertence. Isso é necessário para que as peças de uma mesma família tenham uma produção contínua conseguindo com isso um maior aproveitamento da capacidade dos fornos. A capacidade dos fornos é levada em conta como uma restrição à programação, de forma que não seja excedida a capacidade produtiva dos mesmos. No **Capítulo 3** é explicado o motivo pelo qual a programação da produção não é feita em função dos fornos.

Antes de validar a inserção de uma tarefa em outra máquina, é verificado se a mesma não irá causar atrasos na produção, bem como é verificado, no caso da antecipação da produção de uma tarefa, se os machos necessários para a produção da mesma estão disponíveis para a data desejada. Para validar a antecipação da produção de uma tarefa é chamada à mesma função avaliativa utilizada na fase construtiva, que verifica se existem machos prontos. O movimento de inserção somente será válido se as restrições acima citadas forem respeitadas.

5 RESULTADOS COMPUTACIONAIS

A linguagem de programação escolhida para o desenvolvimento da meta-heurística GRASP foi o Visual Basic Aplicado (VBA), versão 2.0, sendo que o sistema operacional é o Windows XP. Os testes foram realizados em um AMD Turion 64 X2 1.61GHZ com 1024 MB de RAM.

Assim como a abordagem ao problema de programação da produção é feita de forma individualizada tanto para a Macharia como para a Moldagem, também os resultados são analisados em separado, de forma que se possa fazer uma melhor avaliação dos mesmos.

Primeiramente são analisados os resultados encontrados com o sequenciamento da produção para a Macharia, mais especificamente as máquinas que utilizam os tipos de processo de fabricação dos machos, conhecidos como Caixa Quente e Cura Fria e posteriormente são analisados os resultados encontrados para a Moldagem.

Para a definição dos parâmetros de execução do GRASP, foram feitas várias simulações, conforme pode ser visto na **Tabela 13**, onde vários valores foram testados.

Ite ra.	$\gamma = 0$		$\gamma = 1$									
			$x = 10$		$x = 20$		$x = 30$		$x = 40$		$x = 50$	
	$t(s)$	Cm	$t(s)$	Cm	$T(s)$	Cm	$t(s)$	Cm	$t(s)$	Cm	$t(s)$	Cm
5	48	9.387,20	51	9.535,60	53	9.387,20	50	9.262,80	54	9.387,20	53	9.873,20
10	108	9.106,40	114	9.387,20	112	9.337,60	103	8.962,20	113	9.317,20	114	9.607,20
20	196	9.079,20	215	9.387,20	220	9.337,60	209	8.936,80	212	9.317,20	216	9.387,20
30	297	9.079,20	307	9.288,40	299	9.284,80	307	8.936,80	315	9.317,20	304	9.368,40

Tabela 13: Testes dos parâmetros do GRASP

Os valores dos parâmetros que apresentaram os melhores resultados, num tempo computacional viável são: $\gamma = 1$, $x = 30$ e o número de iterações igual a 10, onde o tempo ($t(s)$) de execução é igual a 103 segundos e o *makespan* (Cm) é igual a 8.962,20. Os testes foram feitos com 198 tarefas.

Para a realização dos testes, tanto da Macharia como da Moldagem é utilizado os parâmetros que apresentaram os melhores resultados, num tempo computacional viável. Um número maior de iterações se torna proibitivo pelo tempo computacional envolvido e pela pouca melhora na função objetiva que é o *makespan* (Cm).

Com relação a Macharia, cabe ressaltar, novamente, que o programador do PCP não programa a programação da produção desse setor, conforme visto no

Capítulo 3. Devido a esse fato, não existe no sistema informatizado, utilizado pela empresa em estudo, uma possibilidade de comparar o que foi programado com o que foi executado, ficando assim, prejudicado a comparação dos resultados obtidos através da execução do GRASP, com os resultados obtidos pela produção do setor. Diante desse impasse são propostas duas comparações, a fim de que seja possível comprovar os resultados obtidos.

As comparações são feitas a partir das informações fornecidas pela empresa estudada, sendo que para a macharia os seguintes dados são usados para a criação das instâncias: número de Ordens de Produção, ou tarefas (n), a serem seqüenciadas; data de entrega (d); máquina preferencial (M), quantidade a ser produzida; tempo de produção de uma peça; tempo de setup, tipo de processo; família de processo, quantidade de ferramental, máquinas possíveis para fabricação (M). Atualmente existem 827 peças fabricadas pela macharia. Também foi conseguido junto ao programador da produção, da Macharia, uma relação contendo as peças e as possíveis máquinas que podem ser utilizadas para sua fabricação. Essa relação apresenta 2.328 possibilidades de trocas, entre a máquina preferencial e as máquinas possíveis para sua execução. A instância construída pode ser vista no **Anexo A**, sendo que existem 89 tarefas (n) a serem seqüenciadas, onde 42 são para o tipo de processo Caixa Quente e 47 para o tipo de processo Cura Fria.

A primeira comparação é feita com os resultados do seqüenciamento da produção obtidos a partir da máquina preferencial e data de início, informados nas Ordens de Produção (OP).

A segunda comparação é feita com os resultados obtidos pela versão gulosa da heurística construtiva utilizada na primeira fase da meta-heurística GRASP. Resultados similares a esses, também poderiam ser obtidos pelo responsável pela programação da produção do setor, pois o mesmo sabe em quais máquinas é possível produzir as peças, bem como, analisa qual máquina está menos carregada, para depois inserir a tarefa nela. Isso permite dizer que, os resultados apresentados emulam o que é feito manualmente na fundição estudada.

Para realizar as comparações propostas é utilizado o melhor resultado encontrado pela meta-heurística GRASP após dez iterações. A **Tabela 14** apresenta os resultados encontrados para o tipo de processo chamado de Caixa Quente, já a

Tabela 15 apresenta os resultados encontrados pelo tipo de processo chamado de Cura Fria.

1° Resultado			2° Resultado			GRASP		
<i>M</i>	<i>Cm</i>	<i>N</i>	<i>M</i>	<i>Cm</i>	<i>N</i>	<i>M</i>	<i>Cm</i>	<i>N</i>
5	3.331.18	7	9	2.519.28	3	9	1.877.88	1
2	1.406.50	6	7	1.286.30	4	2	1.145.80	2
7	1.403.50	5	5	1.142.59	6	8	1.017.32	3
1	1.239.07	8	1	902.28	5	7	988.58	4
4	812.69	8	8	815.42	2	5	924.40	6
3	492.95	5	6	783.09	5	3	886.68	5
8	375.92	1	2	690.70	5	4	886.50	7
6	373.60	2	4	674.00	6	6	865.05	7
9	-	-	3	621.75	6	1	843.20	7

Tabela 14: Sequenciamento da produção - Caixa Quente.

1° Resultado			2° Resultado			GRASP		
<i>M</i>	<i>Cm</i>	<i>N</i>	<i>M</i>	<i>Cm</i>	<i>N</i>	<i>M</i>	<i>Cm</i>	<i>N</i>
13	5.725.05	14	13	3.576.88	22	13	3576.88	22
10	4.419.19	15	11	2.906.50	9	11	2681.24	8
12	1.964.72	15	10	2.395.65	10	10	2581.15	11
11	1.163.10	3	12	2.249.86	14	12	2284.62	14

Tabela 15: Sequenciamento da produção – Cura Fria.

Ao ser comparado o melhor resultado encontrado, para o tipo de processo de fabricação da Macharia chamado de Caixa Quente, com o 1° resultado, verifica-se que houve uma melhora com a utilização do GRASP, na programação da produção, em relação á função objetivo de 43,63%. Comparando o melhor resultado com o 2° resultado, onde é feito uma analogia ao raciocínio utilizado pelo programador da produção, obteve-se um melhora em relação á função objetivo de 25,45%. Também é possível verificar que no melhor resultado encontrado, houve uma distribuição equilibra com relação ao tempo de ocupação das máquinas, preocupação muito pertinente num ambiente de produção.

Já ao compararmos o melhor resultado encontrado, para o tipo de processo de fabricação da Macharia chamado de Cura Fria, com o 1° resultado, verifica-se que houve uma melhora com a utilização do GRASP, na programação da produção, em relação á função objetivo de 37,52%, isso para a máquina Ma13, que é considerada não relacionada quanto á velocidade de processamento, e como pode ser visto nos **Capítulos 3 e 4**, a mesma apresenta um funcionamento diferente das demais. Já para as máquinas idênticas a melhora foi de 39,33%. Comparando o melhor resultado obtido para as máquinas idênticas, com o 2° resultado encontrado, obteve-se um melhora em relação á função objetivo de 7,75%. Também é possível verificar que no melhor resultado encontrado, houve uma distribuição equilibra com relação ao tempo de ocupação das máquinas.

A **Tabela 16** apresenta os resultados do seqüenciamento da produção fornecidos pela fundição estudada, onde o programador do PCP já fez os ajustes necessários para priorizar e otimizar a produção, bem como apresenta o melhor resultado obtido pela execução do GRASP.

A comparação do resultado da moldagem, obtido junto à empresa, é feita com o melhor resultado obtido pela meta-heurística GRASP após dez iterações.

As instâncias foram criadas a partir dos dados fornecidos pela empresa estudada. Atualmente existem 966 peças fabricadas pela moldagem, sendo que existem 837 trocas possíveis entre a máquina preferencial e as máquinas possíveis de executar a produção da peça. A instância é construída com 198 tarefas (n) a serem seqüenciadas nas sete máquinas existentes, sendo que a mesma pode ser vista no **Anexo B**.

Resultados Fundição			GRASP		
<i>M</i>	<i>Cm</i>	<i>N</i>	<i>M</i>	<i>Cm</i>	<i>N</i>
4	9.420.40	25	5	8.962.20	31
5	9.363.60	33	7	8.962.00	42
9	8.657.20	31	4	8.881.20	21
7	8.545.60	40	8	8.864.60	27
8	8.326.80	27	2	8.804.80	33
2	8.058.40	28	9	7.927.20	30
1	2.139.20	14	1	2139.20	14

Tabela 16: Seqüenciamento da produção para a moldagem.

Ao comparar os resultados, pode-se verificar que houve uma melhora de 4,86% com relação à função objetiva que é o *makespan* (*Cm*). A melhora encontrada é aparentemente pequena e isso se deve ao fato de não ser possível gerar uma solução com atrasos. Mas considerando que em 7 dias de produção obteve-se uma economia de tempo de 7 horas e 38 minutos, o que equivale a 32 horas e 40 minutos em 30 dias ou de 392 horas e 24 minutos em um ano, essa economia de tempo passa a ser considerável, pois se tem um ganho de mais de 16 dias de produção. Se for considerado que a produção é em média de 100 ton/dia, pode-se dizer que temos um aumento de produtividade em torno de 133,33 ton/mês e de 1.600 ton/ano, ou seja, foi conseguido através do GRASP um aumento de produtividade e conseqüentemente de lucratividade significantes.

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos tanto para a macharia como para a moldagem provam que a utilização da meta-heurística GRASP melhora a programação da produção. Essa melhora é muito difícil de mensurar, pois para cada semana de produção, existe uma nova instância de dados, ou seja, um novo conjunto de Ordens de Produção a ser seqüenciado. Embora os resultados obtidos com uma nova instância de dados podem ser melhores ou piores que os apresentados no **Capítulo 5**, eles sempre serão iguais ou melhores que a programação da produção feita pelo programador do PCP e da Macharia.

Com isso pode-se dizer que a utilização da meta-heurística GRASP trouxe ganhos significativos de tempo, sendo que os resultados mostram que a utilização da mesma resolve o problema proposto num tempo computacional viável.

Para que a empresa estudada consiga ter uma boa programação da produção seria necessário primeiramente inserir no sistema de gestão um módulo para a programação da produção da macharia, e que esse módulo fosse interligado com a programação da moldagem e posteriormente fosse incorporado á meta-heurística apresentada ao sistema informatizado da empresa.

Como trabalho futuro é sugerido a utilização de técnicas que possibilitem priorizar a produção de determinadas Ordens de Produção, permitindo assim, que as demais OP possam ser antecipadas ou postergadas dentro do período avaliado. Com isso seria possível utilizar técnicas de re-sequenciamento da produção e da construção de um simulador para a programação da produção, permitindo ao programador da produção montar vários cenários, a fim de escolher o que apresenta o melhor resultado no contexto avaliado. Também poderia ser inserido nesse contexto, técnicas de otimização robusta, pois não é possível fazer uma análise estocástica sobre o tempo de produção de uma peça, que variam de operador para operador.

BIBLIOGRAFIA

- ABIFA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. A indústria de fundição no Brasil. Disponível em: <http://www.abifa.com.br/indices_de_mercado05.php> Acesso em 30 mai 2008.
- AGOSTINHO, O. L.; VILLELA, R. C.; BUTTON, S. T. **Processos de Fabricação e Planejamento de Processos**. Unicamp, Faculdade de Engenharia Mecânica, Introdução à Engenharia de Fabricação, 2004.
- ALLAHVERDI, A.; GUPTA, J. N. D.; ALDOWAISAN, T. A Review of Scheduling Research Involving Setup Considerations. Omega, **International Journal of Management Science**, v. 27, p. 219-239, 1999.
- ARAÚJO, S. A.; ARENALES, M. N. Dimensionamento de Lotes e programação do forno numa fundição automatizada de porte médio. **Pesquisa Operacional**, v.23, n.3, p.403-420, 2003.
- ARAÚJO, S. A. **Modelos e Métodos para o planejamento e programação da produção aplicados no setor de fundições**. Tese de Doutorado, ICMC-USP, 2003.
- ARAÚJO, S. A.; ARENALES, M. N.; CLARK, A. R. Dimensionamento de lotes e programação do forno numa fundição de pequeno porte. **Gestão & Produção**, v.11, n.2, p. 165-176, mai.-ago, 2004.
- ARROYO, J. E. C.; VIANNA, D. S. Algoritmos genéticos para o Problema de programação de tarefas em máquinas paralelas idênticas com dois critérios. **Anais do XXVII Congresso da SBC**, 30 de junho de 2007.
- BAKER, K. R. **Introduction to sequencing and scheduling**. New York: John Wiley and Sons, 1974.
- BAKER, K. R. Elements of Sequencing and Scheduling. **Dartmouth College**. 1995
- BLAZEWICZ, J.; ECKER, K. H.; PESCH, E.; SCHIMDT, G.; WEGLARZ, J. **Scheduling Computer and Manufacturing Processes**. Springer – Verlag, Berlin, 1996.
- CAMPOS, F. M. P.; DAVIES, G. J. **Solidificação e fundição de metais e suas ligas**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo: p. 129-154, 1978.
- CHENG, T. C. E.; GUPTA, J. N. D.; WANG, G. A Review Of Flowshop Scheduling Research With Setup Times. **Production And Operations Management** Vol. 9, No. 3, Fall 2000.
- ERDMANN, R. H. **Organização de sistemas de produção**. Florianópolis: Insular, 1998.
- ERDMANN, R. H. **Administração da produção: planejamento, programação e controle**. Florianópolis: Papa Livros, 2000.
- FERNANDES, F. C.; LEITE, R. Automação industrial e sistemas informatizados de gestão da produção em fundições de mercado. **Gestão & Produção**, v. 9, n. 3, p. 313-344, 2002.
- FINK, C. A programação da produção em fundições de pequeno porte: modelagem matemática e métodos de solução. Dissertação de Mestre. **ICMC-USP**, 2007.

FINN, G.; HOROWITZ, E., “**A linear time approximation algorithm for multiprocessor scheduling**”, BIT, Vol. 19, pp. 312-320, 1979.

FUCHIGAMI, H., Y. Métodos heurísticos construtivos para o problema de programação da produção em sistemas flow shop híbridos com tempo de preparação das máquinas assimétricos e dependentes da seqüência. Dissertação de Mestre. **Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo**, 2005.

GAREY, M. R.; JOHNSON, D. S., “**Computers and Intractability: a Guide to the Theory of NP-Completeness**”, Freeman, San Francisco, 1979.

GRAHAM, R. L., “**Bounds on multiprocessing timing anomalies**, **SIAM Journal on Applied Mathematics**”, Vol. 17, pp. 416-429, 1969.

GRAHAM, R. L., LAWLER E. L., LENSTRA J. K., KAN A. H. G. R. **Optimization and Approximation in Deterministic Sequencing and Scheduling Theory: A Survey**. Discrete Math. 5, 1979.

LANDMANN, R. Um modelo heurístico para a programação da produção em fundições com a utilização da lógica fuzzy. Tese de Doutorado, **UFSC**, 2005.

LEITE, M.; ARROYO, J. E. C. Algoritmo busca tabu para a minimização do tempo de processamento e atrasos de entrega em sistemas de produção flowshop permutacional. **XXVI ENEGEP** - Fortaleza, CE, Brasil, 9 a 11 de Outubro de 2006.

MACCARTHY, B.L.; LIU, J. Addressing the gap in scheduling research: a review of optimization and heuristic methods in production scheduling. **International Journal of Production Research**, v. 31, n. 1, p. 59-79, 1993.

MACHADO, I. **Processos de Fundição e Sinterização**. Introdução à Manufatura Mecânica, Escola Politécnica da USP, 2002.

MORTON, T.E.; PENTICO, D.W. **Heuristic scheduling systems**. John Wiley & Sons, N.Y., 1993.

MÜLLER, F. M. “Algoritmos heurísticos e exatos para resolução do problema de sequenciamento em processadores paralelos”. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica, **Universidade Estadual de Campinas. Campinas**, 1993.

MÜLLER, F. M.; LIMBERGER, S. J. “Uma heurística de trocas para o problema de seqüenciamento de tarefas em processadores uniformes”, **Pesquisa Operacional**, 20(1), pp. 31-42, 2000.

MÜLLER, F. M.; CAMOZZATO, M. M.; ARAÚJO, O. C. B. “Exact algorithms for the imbalanced time minimizing assignment problem”, **Brazilian Symposium on Graphs**, Algorithms and Combinatorics, Fortaleza-Brasil, pp. 172-175, 2001.

MÜLLER, F. M.; ARAÚJO, O. C. B. “Neighbourhood constraint for a tabu search algorithm to schedule jobs on unrelated parallel machines”, 4th **Metaheuristics International Conference**, Porto-Portugal, pp. 551-555, 2001.

PINEDO, M. **Scheduling Theory, Algorithm and System**. Englewood Cliffs, NJ. Prentice Hall, 1995.

RAVETTI, M. G. **Problemas de seqüenciamento com máquinas paralelas e tempos de preparação dependentes da seqüência**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Ciência da Computação do Instituto de Ciências Exatas, p. 6, 2003.

- RESENDE M.G.C.; FEO T. A. **Greedy Randomized Adaptive Search Procedures**. Journal of Global Optimization, 6, p:109-133, 1995.
- SANTOS, H. C. M.; FRANÇA, P. M. Meta-heurística para programação da produção com tempos de preparação dependentes da seqüência. São Carlos. **Gestão & Produção**, v.2, n.3, p. 228-243, dez. 1995.
- SANTOS-MEZA, E.; SANTOS, M. O.; ARENALES, M.N. , A Lot-Sizing Problem in an Automated Foundry, **European Journal of Operational Research**, v.139, n.2, p.490-500, 2002.
- SIEGEL, M. **Curso de fundição**. São Paulo: Associação Brasileira de Metais,1963.
- SILVA, R. J. **Programação de cargas de forno em uma fundição de mercado**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia de Produção, São Carlos, 2001.
- SILVA, R. J.; MORABITO, R. Otimização da Produção em Cargas de Fornos em uma fábrica de fundição em aço-inox. **Gestão da Produção** vol.11 no.1 São Carlos Jan./Apr.2004.
- SOUNDERPANDIAN, J.; BALASHANMUGAM, B.. Multiproduct, Multifacility scheduling Using the Transportation Model: a Case Study. **Production and Inventory Management Journal**, 32(4), 69-73, 1991.
- SLACK, N.; S.; CHAMBERS, R. J. **Administração da Produção**. Segunda Edição, editora Atlas. Brasil, 1999.
- TONAKI, V. S. Uma heurística para o problema de dimensionamento de lotes em fundições de mercado. Dissertação de Mestre. **ICMC-USP**, 2006
- TUBINO, D. F. **Manual de Planejamento e Controle da Produção**. São Paulo: Editora Atlas 2000.
- VIANA, V. **Meta-Heurísticas e Programação Paralela em Otimização Combinatória**. (UFC) Universidade Federal do Ceará. Fortaleza 1998.

ANEXO A

A matriz abaixo apresenta a instância utilizada para a realização dos testes da meta-heurística GRASP para a Macharia.

O 1º campo é o código da OP, o 2º campo é o código da peça a ser produzida, o 3º campo é a quantidade a ser produzida, o 4º campo é a máquina a preferencial, o 5º campo é o nome da máquina, o 6º campo é o tipo de processo de fabricação, o 7º campo é a descrição de tipo de processo, 8º campo é o código da família, o 9º campo é a descrição da família, o 10º campo é o tempo de produção, 11º campo é o tempo de setup, o 12º campo é a quantidade de ferramental e o 13º campo é a data da OP.

000000	RN112M	200	12/08/20	13	SM1	2	Frio	1	Ecolotec	1,33	10	2
000000	RB089M	190	12/08/20	10	SM1	2	Frio	1	Ecolotec	1,4	10	1
000000	SL265M	25	12/08/20	3	SM0	1	Quent	3	Shell 3%	1,15	30	1
000000	CK096M	354	12/08/20	5	SM0	1	Quent	3	Shell 3%	1,10	30	1
000000	SL406M	950	12/08/20	7	SM0	1	Quent	3	Shell 3%	0,35	30	1
000000	JD188M	260	12/08/20	5	SM0	1	Quent	3	Shell 3%	0,38	30	1
000000	SL402M	90	12/08/20	4	SM0	1	Quent	4	Shell	0,25	30	1
000000	CK034M	520	12/08/20	6	SM0	1	Quent	5	Shell 9%	0,28	30	1
000001	SL554M	110	13/08/20	10	SM1	2	Frio	1	Ecolotec	0,83	1	1
000003	RN114M	250	13/08/20	13	SM1	2	Frio	1	Ecolotec	1,88	30	2
000003	RN125M	120	13/08/20	10	SM1	2	Frio	1	Ecolotec	1,5	10	1
000002	RN112M	310	13/08/20	13	SM1	2	Frio	1	Ecolotec	1,33	10	2
000003	JD190M	64	13/08/20	13	SM1	2	Frio	1	Ecolotec	1,25	10	1
000002	RB089M	110	13/08/20	10	SM1	2	Frio	1	Ecolotec	1,4	10	1
000003	SL576M	64	13/08/20	12	SM1	2	Frio	2	Isocure	0,4	10	1
000003	JD212M	24	13/08/20	12	SM1	2	Frio	2	Isocure	0,9	10	1
000003	JD270M	175	13/08/20	11	SM1	2	Frio	2	Isocure	2,9	10	1
000002	AC009M	60	13/08/20	13	SM1	2	Frio	2	Isocure	1,10	10	1
000003	RN180M	20	13/08/20	13	SM1	2	Frio	2	Isocure	1,45	10	1
000002	AC009M	60	13/08/20	13	SM1	2	Frio	2	Isocure	0,73	10	1
000003	SL891M	302	13/08/20	12	SM1	2	Frio	2	Isocure	0,83	1	1
000004	RB060M	130	13/08/20	11	SM1	2	Frio	2	Isocure	1,92	30	1
000003	SL866M	66	13/08/20	10	SM1	2	Frio	2	Isocure	3,5	10	1
000003	SL576M	64	13/08/20	12	SM1	2	Frio	2	Isocure	0,4	10	1
000001	JD133M	70	13/08/20	12	SM1	2	Frio	2	Isocure	2,8	10	1
000001	AC044M	48	13/08/20	3	SM0	1	Quent	3	Shell 3%	0,36	30	1
000000	SL406M	330	13/08/20	7	SM0	1	Quent	3	Shell 3%	0,35	30	1
000001	SL118M	560	13/08/20	1	SM0	1	Quent	3	Shell 3%	0,4	30	1
000001	SL480M	156	13/08/20	2	SM0	1	Quent	3	Shell 3%	0,32	30	1
000001	CK096M	100	13/08/20	5	SM0	1	Quent	3	Shell 3%	1,08	30	1
000002	SL114M	10	13/08/20	1	SM0	1	Quent	3	Shell 3%	0,9	30	1
000002	RN133M	803	13/08/20	1	SM0	1	Quent	4	Shell	0,33	30	1
000001	RN157M	542	13/08/20	2	SM0	1	Quent	4	Shell	0,35	30	1
000002	RN133M	760	13/08/20	2	SM0	1	Quent	4	Shell	0,25	30	1
000002	JD248M	600	13/08/20	7	SM0	1	Quent	4	Shell	0,33	30	1
000002	SL402M	230	13/08/20	4	SM0	1	Quent	4	Shell	0,25	30	1
000004	RN125M	42	14/08/20	10	SM1	2	Frio	1	Ecolotec	1,5	10	1
000005	RB059M	383	14/08/20	10	SM1	2	Frio	1	Ecolotec	2,8	1	1
000006	RN112M	160	14/08/20	13	SM1	2	Frio	1	Ecolotec	1,33	10	2
000005	RN114M	700	14/08/20	13	SM1	2	Frio	1	Ecolotec	1,88	30	2
000005	RB060M	175	14/08/20	11	SM1	2	Frio	2	Isocure	1,92	30	1
000004	JD145M	10	14/08/20	10	SM1	2	Frio	2	Isocure	2,01	10	1
000005	JD262M	16	14/08/20	12	SM1	2	Frio	2	Isocure	0,56	10	1
000005	JD249M	120	14/08/20	12	SM1	2	Frio	2	Isocure	0,56	10	1

000004	SL340M	112	14/08/20	12	SM1	2	Frio	2	Isocure	2,2	10	1
000005	RB060M	150	14/08/20	12	SM1	2	Frio	2	Isocure	0,9	10	1
000005	DA011M	150	14/08/20	12	SM1	2	Frio	2	Isocure	1,60	30	1
000006	CK079M	50	14/08/20	1	SM0	1	Quent	3	Shell 3%	0,4	30	1
000005	SL118M	75	14/08/20	1	SM0	1	Quent	3	Shell 3%	0,4	30	1
000006	SL114M	120	14/08/20	1	SM0	1	Quent	3	Shell 3%	0,9	30	1
000006	SL045M	750	14/08/20	4	SM0	1	Quent	3	Shell 3%	0,08	30	1
000006	AC026M	50	14/08/20	2	SM0	1	Quent	4	Shell	0,31	30	1
000006	DN024M	150	14/08/20	5	SM0	1	Quent	4	Shell	1,28	30	1
000006	RN133M	500	14/08/20	1	SM0	1	Quent	4	Shell	0,33	30	1
000006	RN133M	650	14/08/20	2	SM0	1	Quent	4	Shell	0,25	30	1
000006	AC026M	46	14/08/20	3	SM0	1	Quent	4	Shell	2,02	30	1
000008	RB059M	53	20/08/20	10	SM1	2	Frio	1	Ecolotec	2,8	1	1
000008	RN112M	900	20/08/20	13	SM1	2	Frio	1	Ecolotec	1,33	10	2
000009	JD267M	592	20/08/20	10	SM1	2	Frio	1	Ecolotec	1,07	10	1
000009	JD194M	240	20/08/20	10	SM1	2	Frio	1	Ecolotec	0,45	10	1
000008	SL238M	245	20/08/20	13	SM1	2	Frio	1	Ecolotec	0,95	10	1
000009	RN125M	235	20/08/20	10	SM1	2	Frio	1	Ecolotec	1,5	10	1
000008	DA011M	168	20/08/20	12	SM1	2	Frio	2	Isocure	1,60	30	1
000008	JD211M	123	20/08/20	4	SM0	1	Quent	3	Shell 3%	0,53	30	1
000007	RB059M	300	20/08/20	6	SM0	1	Quent	3	Shell 3%	0,56	30	1
000007	SL594M	48	20/08/20	4	SM0	1	Quent	3	Shell 3%	0,4	30	1
000007	CK096M	171	20/08/20	5	SM0	1	Quent	3	Shell 3%	1,08	30	1
000008	SL594M	60	20/08/20	3	SM0	1	Quent	3	Shell 3%	0,4	30	1
000007	RN189M	910	20/08/20	5	SM0	1	Quent	3	Shell 3%	0,45	30	1
000007	DN018M	630	20/08/20	4	SM0	1	Quent	4	Shell	0,35	30	1
000008	DN018M	600	20/08/20	3	SM0	1	Quent	4	Shell	0,30	30	1
000007	JD194M	250	20/08/20	7	SM0	1	Quent	4	Shell	0,09	30	1
000007	SL512M	184	20/08/20	8	SM0	1	Quent	4	Shell	1,88	30	1
000007	CK096M	100	20/08/20	4	SM0	1	Quent	5	Shell 9%	0,27	30	1
000011	RB059M	326	21/08/20	10	SM1	2	Frio	1	Ecolotec	2,8	1	1
000010	RN125M	26	21/08/20	10	SM1	2	Frio	1	Ecolotec	1,5	10	1
000010	DC009M	13	21/08/20	12	SM1	2	Frio	1	Ecolotec	2,50	10	1
000009	RN114M	260	21/08/20	13	SM1	2	Frio	1	Ecolotec	1,88	30	2
000010	RN112M	520	21/08/20	13	SM1	2	Frio	1	Ecolotec	1,33	10	2
000011	RN113M	10	21/08/20	13	SM1	2	Frio	1	Ecolotec	1,9	10	2
000010	SL052M	35	21/08/20	10	SM1	2	Frio	2	Isocure	0,95	10	1
000010	RB073M	60	21/08/20	12	SM1	2	Frio	2	Isocure	0,6	1	1
000010	DC004M	24	21/08/20	12	SM1	2	Frio	2	Isocure	0,60	10	1
000010	JD262M	400	21/08/20	12	SM1	2	Frio	2	Isocure	0,56	10	1
000009	CK096M	70	21/08/20	5	SM0	1	Quent	3	Shell 3%	1,08	30	1
000010	SL594M	252	21/08/20	4	SM0	1	Quent	3	Shell 3%	0,4	30	1
000009	AC019M	780	21/08/20	7	SM0	1	Quent	4	Shell	0,75	30	1
000010	JD163M	210	21/08/20	2	SM0	1	Quent	5	Shell 9%	0,8	30	1
000009	JD163M	318	21/08/20	1	SM0	1	Quent	5	Shell 9%	0,56	30	1

ANEXO B

A matriz abaixo apresenta a instância utilizada para a realização dos testes da meta-heurística GRASP para a Moldagem.

O 1º campo é o código da OP, o 2º campo é o código da peça a ser produzida, o 3º campo é a quantidade a ser produzida, o 4º campo é a data programada, 5º campo é a máquina a preferencial, 6º campo é o tipo de ferro, o 7º campo é a descrição do tipo de ferro, o 8º campo é o tempo médio de produção, 9º campo é o tempo de setup, o 10º campo é a quantidade de ferramental e o 11º é o peso da pesa.

78071	JD137	140	17/04/2008	7	4	Cinzento	2,40	10	1	8,7
77891	SL515	189	17/04/2008	7	4	Cinzento	2,40	10	1	15,6
77151	CK053	110	17/04/2008	7	4	Cinzento	2,40	10	1	11,36
77694	CK103	100	17/04/2008	5	4	Cinzento	2,40	10	1	31,42
77868	CK064	200	17/04/2008	4	4	Cinzento	2,40	10	1	21,47
77888	SL255	40	17/04/2008	1	4	Cinzento	2,40	10	1	8,25
77483	SL406	92	17/04/2008	5	4	Cinzento	2,40	10	1	18,2
77868	CK050	30	17/04/2008	2	4	Cinzento	2,40	10	1	35
77595	RN213	26	17/04/2008	2	3	Nodular	2,40	10	1	40,15
78080	RB074	200	17/04/2008	4	3	Nodular	2,40	10	1	25,47
77594	RN177	300	17/04/2008	5	3	Nodular	2,40	10	1	27,9
77884	RN180	150	17/04/2008	4	3	Nodular	2,40	10	1	47,55
77880	RN112	300	17/04/2008	2	3	Nodular	2,40	10	1	40,16
77885	SL070	80	17/04/2008	1	3	Nodular	2,40	10	1	8,53
77888	SL265	13	17/04/2008	1	3	Nodular	2,40	10	1	8
77882	RN136	150	17/04/2008	2	3	Nodular	2,40	10	1	34,3
77883	RN176	300	17/04/2008	8	3	Nodular	2,40	10	1	38,7
77715	RN176	136	17/04/2008	8	3	Nodular	2,40	10	1	38,7
77370	DN016	100	17/04/2008	5	3	Nodular	2,40	10	1	19,45
78097	SL774	50	18/04/2008	2	4	Cinzento	2,40	10	1	98
77696	JD002	70	18/04/2008	2	4	Cinzento	2,40	10	1	32,1
77705	MS003	120	18/04/2008	8	4	Cinzento	2,40	10	1	60,25
78012	AC043	25	18/04/2008	9	4	Cinzento	2,40	10	1	40
78073	JD163	12	18/04/2008	2	4	Cinzento	2,40	10	1	74,58
77726	SL910	50	18/04/2008	2	4	Cinzento	2,40	10	1	108,4
77719	SL223	40	18/04/2008	2	4	Cinzento	2,40	10	1	45
77586	MS002	26	18/04/2008	8	4	Cinzento	2,40	10	1	72,12
78073	SL015	250	18/04/2008	9	3	Nodular	2,40	10	1	14,2
77590	RN121	170	18/04/2008	5	3	Nodular	2,40	10	1	17,4
77883	RN156	250	18/04/2008	7	3	Nodular	2,40	10	1	18,95
77584	JD194	200	18/04/2008	7	3	Nodular	2,40	10	1	16
77884	RN201	7	18/04/2008	9	3	Nodular	2,40	10	1	38
77888	SL162	100	18/04/2008	2	3	Nodular	2,40	10	1	40,95
78067	DN032	25	18/04/2008	7	3	Nodular	2,40	10	1	18,6
78078	JD336	90	18/04/2008	8	3	Nodular	2,40	10	1	81
78066	DN022	20	18/04/2008	7	3	Nodular	2,40	10	1	22
78065	DA014	80	18/04/2008	8	3	Nodular	2,40	10	1	55,8
77588	RB099	40	18/04/2008	5	3	Nodular	2,40	10	1	22,55
77974	RN114	320	18/04/2008	4	3	Nodular	2,40	10	1	47,7
77589	RN113	300	18/04/2008	4	3	Nodular	2,40	10	1	40
77894	SL957	120	18/04/2008	9	3	Nodular	2,40	10	1	13,5
77893	SL878	50	18/04/2008	7	3	Nodular	2,40	10	1	36
77707	RB058	33	18/04/2008	8	3	Nodular	2,40	10	1	64,4
77889	SL289	20	18/04/2008	1	3	Nodular	2,40	10	1	8,5
77878	RB059	100	18/04/2008	2	3	Nodular	2,40	10	1	43,55
77874	JD171	48	18/04/2008	9	3	Nodular	2,40	10	1	28

77871	JD065	108	18/04/2008	1	3	Nodular	2.40	10	1	12
77486	SL902	45	18/04/2008	9	3	Nodular	2.40	10	1	56
77581	DN030	40	18/04/2008	5	3	Nodular	2.40	10	1	29,95
78084	RN135	250	18/04/2008	8	3	Nodular	2.40	10	1	35
77720	SL232	23	18/04/2008	1	3	Nodular	2.40	10	1	5,7
77597	SL328	50	18/04/2008	5	3	Nodular	2.40	10	1	15,6
77471	DA026	45	18/04/2008	5	3	Nodular	2.40	10	1	24
77598	SL341	181	18/04/2008	1	3	Nodular	2.40	10	1	8,65
78091	SL110	50	18/04/2008	7	3	Nodular	2.40	10	1	39,9
77692	CK034	100	19/04/2008	4	4	Cinzento	2.40	10	1	21
77723	SL556	60	19/04/2008	8	4	Cinzento	2.40	10	1	63,6
77726	SL897	300	19/04/2008	7	4	Cinzento	2.40	10	1	17,01
78097	SL774	70	19/04/2008	2	4	Cinzento	2.40	10	1	98
77890	SL463	259	19/04/2008	7	4	Cinzento	2.40	10	1	16
78077	JD269	186	19/04/2008	8	4	Cinzento	2.40	10	1	54,95
77582	JD108	18	19/04/2008	2	4	Cinzento	2.40	10	1	29,94
77891	SL546	100	19/04/2008	2	4	Cinzento	2.40	10	1	75,8
77692	CK034	100	19/04/2008	4	4	Cinzento	2.40	10	1	21
77692	CK034	100	19/04/2008	4	4	Cinzento	2.40	10	1	21
77580	CK063	300	19/04/2008	8	4	Cinzento	2.40	10	1	42,5
77868	SL162	157	19/04/2008	2	3	Nodular	2.40	10	1	40,95
77595	RN194	200	19/04/2008	9	3	Nodular	2.40	10	1	56
77889	SL279	40	19/04/2008	1	3	Nodular	2.40	10	1	4,2
77885	SL052	440	19/04/2008	2	3	Nodular	2.40	10	1	39,5
77875	JD182	25	19/04/2008	5	3	Nodular	2.40	10	1	7
77723	SL603	35	19/04/2008	5	3	Nodular	2.40	10	1	16
77715	RN167	100	19/04/2008	5	3	Nodular	2.40	10	1	36,65
77725	SL868	150	19/04/2008	9	3	Nodular	2.40	10	1	17,5
76979	JD186	250	19/04/2008	5	3	Nodular	2.40	10	1	15,85
77594	RN177	200	19/04/2008	5	3	Nodular	2.40	10	1	27,9
77482	SL268	110	19/04/2008	9	3	Nodular	2.40	10	1	43,4
77473	JD049	55	19/04/2008	9	3	Nodular	2.40	10	1	28,2
77472	DN024	75	19/04/2008	5	3	Nodular	2.40	10	1	34
77471	CK104	100	19/04/2008	4	3	Nodular	2.40	10	1	18
77723	SL506	20	20/04/2008	9	4	Cinzento	2.40	10	1	38
78069	JD099	70	20/04/2008	7	4	Cinzento	2.40	10	1	18,56
77728	SL990	20	20/04/2008	9	4	Cinzento	2.40	10	1	27,8
78096	SL543	70	20/04/2008	9	4	Cinzento	2.40	10	1	42,3
77718	SL114	25	20/04/2008	9	4	Cinzento	2.40	10	1	25,36
78097	SL779	19	20/04/2008	5	4	Cinzento	2.40	10	1	20,53
77699	JD148	21	20/04/2008	9	4	Cinzento	2.40	10	1	55
77697	JD120	43	20/04/2008	5	4	Cinzento	2.40	10	1	25
78100	SL950	85	20/04/2008	7	4	Cinzento	2.40	10	1	17,55
78065	DA011	150	20/04/2008	5	4	Cinzento	2.40	10	1	25,3
77698	JD124	135	20/04/2008	5	4	Cinzento	2.40	10	1	20,5
78075	JD248	30	20/04/2008	4	4	Cinzento	2.40	10	1	25,5
78085	RN151	250	20/04/2008	4	3	Nodular	2.40	10	1	20,6
77481	SL180	40	20/04/2008	9	3	Nodular	2.40	10	1	29,25
77480	SL014	164	20/04/2008	9	3	Nodular	2.40	10	1	32,55
77805	SL093	80	20/04/2008	2	3	Nodular	2.40	10	1	42
77714	RN161	200	20/04/2008	7	3	Nodular	2.40	10	1	19,05
78090	SL082	37	20/04/2008	7	3	Nodular	2.40	10	1	11,19
77726	SL900	64	20/04/2008	2	3	Nodular	2.40	10	1	44,41
77876	JD228	33	20/04/2008	7	3	Nodular	2.40	10	1	19
77702	JD259	225	20/04/2008	9	3	Nodular	2.40	10	1	20
77703	JD266	60	20/04/2008	4	3	Nodular	2.40	10	1	17,5
77471	CK104	100	20/04/2008	4	3	Nodular	2.40	10	1	18
77714	RN157	100	20/04/2008	2	3	Nodular	2.40	10	1	36,5
77892	SL816	100	20/04/2008	1	3	Nodular	2.40	10	1	7
78067	DN031	30	20/04/2008	5	3	Nodular	2.40	10	1	28
77888	SL183	60	20/04/2008	2	3	Nodular	2.40	10	1	23,5
77879	RB092	100	20/04/2008	4	3	Nodular	2.40	10	1	30,3
77883	RN176	300	20/04/2008	8	3	Nodular	2.40	10	1	38,7
78079	RB046	110	20/04/2008	8	3	Nodular	2.40	10	1	35,5
78079	RB032	27	20/04/2008	8	3	Nodular	2.40	10	1	85,19
78094	SL383	92	22/04/2008	1	4	Cinzento	2.40	10	1	7,71
77697	JD097	20	22/04/2008	5	4	Cinzento	2.40	10	1	16,7
77586	JD243	16	22/04/2008	5	4	Cinzento	2.40	10	1	12,63

78096	SL535	150	22/04/2008	2	4	Cinzento	2.40	10	1	36,2
77694	CK104	100	22/04/2008	4	3	Nodular	2.40	10	1	18
78085	RN150	40	22/04/2008	8	3	Nodular	2.40	10	1	46
77889	SL321	50	22/04/2008	7	3	Nodular	2.40	10	1	13,4
77886	SL094	253	22/04/2008	8	3	Nodular	2.40	10	1	44
78100	SL969	24	22/04/2008	7	3	Nodular	2.40	10	1	22,08
78066	DN002	50	22/04/2008	5	3	Nodular	2.40	10	1	29,96
78084	RN126	140	22/04/2008	8	3	Nodular	2.40	10	1	48,6
77878	JD323	250	22/04/2008	5	3	Nodular	2.40	10	1	21
77889	SL342	30	22/04/2008	1	3	Nodular	2.40	10	1	8,2
78067	DN033	20	22/04/2008	7	3	Nodular	2.40	10	1	7
77712	RN113	300	22/04/2008	4	3	Nodular	2.40	10	1	40
78098	SL838	58	22/04/2008	1	3	Nodular	2.40	10	1	8
77710	RB089	50	22/04/2008	2	3	Nodular	2.40	10	1	76,2
77710	RB089	50	22/04/2008	2	3	Nodular	2.40	10	1	76,2
77710	RB089	50	22/04/2008	2	3	Nodular	2.40	10	1	76,2
77710	RB089	50	22/04/2008	2	3	Nodular	2.40	10	1	76,2
77710	RB089	50	22/04/2008	2	3	Nodular	2.40	10	1	76,2
78066	DN019	30	22/04/2008	7	3	Nodular	2.40	10	1	13
77880	RN113	300	22/04/2008	4	3	Nodular	2.40	10	1	40
78088	RN192	11	22/04/2008	5	3	Nodular	2.40	10	1	54,09
78078	MS001	13	22/04/2008	9	3	Nodular	2.40	10	1	28,62
78100	SL956	141	22/04/2008	9	3	Nodular	2.40	10	1	14,2
77883	RN161	200	22/04/2008	7	3	Nodular	2.40	10	1	19,05
77883	RN168	90	22/04/2008	2	3	Nodular	2.40	10	1	44,46
77889	SL321	50	22/04/2008	7	3	Nodular	2.40	10	1	13,4
77868	AC024	40	22/04/2008	7	3	Nodular	2.40	10	1	16,4
78077	JD291	50	22/04/2008	5	3	Nodular	2.40	10	1	33,6
77715	RN172	15	22/04/2008	7	3	Nodular	2.40	10	1	15,13
78077	JD271	50	22/04/2008	8	3	Nodular	2.40	10	1	28,5
78090	SL087	10	22/04/2008	7	3	Nodular	2.40	10	1	13,9
78064	AX011	40	22/04/2008	8	3	Nodular	2.40	10	1	64,15
77725	SL867	305	22/04/2008	9	3	Nodular	2.40	10	1	16,2
78093	SL232	10	22/04/2008	1	3	Nodular	2.40	10	1	5,7
78093	SL289	38	22/04/2008	1	3	Nodular	2.40	10	1	8,5
78068	JD015	100	22/04/2008	5	3	Nodular	2.40	10	1	18,7
77721	SL321	50	22/04/2008	7	3	Nodular	2.40	10	1	13,4
78085	RN143	20	22/04/2008	5	3	Nodular	2.40	10	1	21,05
77694	CK080	300	23/04/2008	2	4	Cinzento	2.40	10	1	40,1
77878	PG103	300	23/04/2008	5	4	Cinzento	2.40	10	1	10,95
78095	SL466	140	23/04/2008	7	4	Cinzento	2.40	10	1	16
78097	SL774	50	23/04/2008	2	4	Cinzento	2.40	10	1	98
78068	JD006	16	23/04/2008	7	4	Cinzento	2.40	10	1	38
77580	CK095	250	23/04/2008	5	4	Cinzento	2.40	10	1	17,35
78090	SL107	60	23/04/2008	7	4	Cinzento	2.40	10	1	17,55
78088	SL006	72	23/04/2008	7	4	Cinzento	2.40	10	1	14
77868	AC050	10	23/04/2008	7	4	Cinzento	2.40	10	1	11,7
78097	SL774	50	23/04/2008	2	4	Cinzento	2.40	10	1	98
78078	JD340	100	23/04/2008	5	3	Nodular	2.40	10	1	19,15
78088	RN200	150	23/04/2008	9	3	Nodular	2.40	10	1	56,4
78085	RN151	250	23/04/2008	4	3	Nodular	2.40	10	1	20,6
78085	RN151	250	23/04/2008	4	3	Nodular	2.40	10	1	20,6
78079	RB039	96	23/04/2008	8	3	Nodular	2.40	10	1	52
78071	JD130	158	23/04/2008	9	3	Nodular	2.40	10	1	46,8
78064	AX013	20	23/04/2008	8	3	Nodular	2.40	10	1	51,6
77894	SL968	230	23/04/2008	7	3	Nodular	2.40	10	1	19,2
77883	RN176	300	23/04/2008	8	3	Nodular	2.40	10	1	38,7
77882	RN125	250	23/04/2008	8	3	Nodular	2.40	10	1	51,3
77875	JD187	250	23/04/2008	9	3	Nodular	2.40	10	1	30
77711	RB092	100	23/04/2008	4	3	Nodular	2.40	10	1	30,3
77880	RN112	300	23/04/2008	2	3	Nodular	2.40	10	1	40,16
78098	SL831	10	24/04/2008	7	4	Cinzento	2.40	10	1	19,4
77701	JD244	57	24/04/2008	8	4	Cinzento	2.40	10	1	46,81
77720	SL249	40	24/04/2008	5	3	Nodular	2.40	10	1	24,25
78100	SL955	23	24/04/2008	9	3	Nodular	2.40	10	1	15
78099	SL919	22	24/04/2008	7	3	Nodular	2.40	10	1	9,14
78089	SL052	15	24/04/2008	2	3	Nodular	2.40	10	1	39,5
78089	SL045	55	24/04/2008	7	3	Nodular	2.40	10	1	15

78087	RN169	150	24/04/2008	8	3	Nodular	2,40	10	1	44,45
77476	JD190	229	24/04/2008	5	3	Nodular	2,40	10	1	32,28
78086	RN156	171	24/04/2008	7	3	Nodular	2,40	10	1	18,95
78084	RN120	100	24/04/2008	5	3	Nodular	2,40	10	1	21,5
77717	SL081	30	24/04/2008	5	3	Nodular	2,40	10	1	33,1
78084	RN135	36	24/04/2008	8	3	Nodular	2,40	10	1	35
78084	RN135	150	24/04/2008	8	3	Nodular	2,40	10	1	35
77882	RN133	250	24/04/2008	9	3	Nodular	2,40	10	1	59,5
77720	SL268	52	24/04/2008	9	3	Nodular	2,40	10	1	43,4
77727	SL955	5	24/04/2008	9	3	Nodular	2,40	10	1	15
78068	JD005	10	24/04/2008	7	3	Nodular	2,40	10	1	10,7
77727	SL955	100	24/04/2008	9	3	Nodular	2,40	10	1	15
77974	RN114	313	24/04/2008	4	3	Nodular	2,40	10	1	47,7
77879	RB059	250	24/04/2008	2	3	Nodular	2,40	10	1	43,55
77593	RN157	100	24/04/2008	2	3	Nodular	2,40	10	1	36,5
78086	RN156	250	24/04/2008	7	3	Nodular	2,40	10	1	18,95