

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**OTIMIZAÇÃO NA PROGRAMAÇÃO DE AÇOS DE UMA
ACIARIA ATRAVÉS DE UM MODELO MATEMÁTICO DE *SETUP*
DEPENDENTE DA SEQUÊNCIA**

ALOÍSIO CELSO SOARES JÚNIOR

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
JOÃO MONLEVADE
Junho, 2015**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

OTIMIZAÇÃO NA PROGRAMAÇÃO DE AÇOS DE UMA ACIARIA
ATRAVÉS DE UM MODELO MATEMÁTICO DE *SETUP*
DEPENDENTE DA SEQUÊNCIA

ALOÍSIO CELSO SOARES JÚNIOR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Ouro Preto, como
exigência parcial para a obtenção do grau de
Bacharelado em Engenharia de Produção.

Orientadora: Prof. Dra. Mônica do Amaral

JOÃO MONLEVADE
Junho, 2015

TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado "**Otimização na Programação de Aços de uma Aciaria Através de um Modelo Matemático de *setup* dependente da sequência**" é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem o devido referenciamento ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 04 de Maio de 2017



Aloisio Celso Soares Júnior



ANEXO VIII – ATA DE DEFESA

Aos 22 dias do mês de junho de 2015, às 21 horas, na sala 1302 deste instituto, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso pelo (a) aluno (a) Alcides Celso Soares Júnior, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Rafael Lourenço Machado Pinto e Thiago Augusto de Oliveira Silva

O (a) aluno (a) apresentou o trabalho intitulado: Otimização na programação de peças de uma aciaria através de um modelo matemático. A comissão examinadora deliberou, pela:
() Aprovação máximo de setup independente da sequência.
(x) Aprovação com Ressalva - Prazo concedido para as correções: até 06/07/2015.
() Reprovação com Ressalva - Prazo para marcação da nova banca: _____
() Reprovação

do(a) aluno (a), com a nota 3,5. Na forma regulamentar e seguindo as determinações da resolução COEP12/2015 foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pelo (a) aluno(a).

João Monlevade, 22 de junho de 2015.

Elisvécio do Carmo
Professor(a) Orientador(a)

Rafael Lourenço M. Pinto
Convidado(a)

Alcides Celso Soares Júnior
Convidado(a)

Alcides Celso Soares Júnior
Aluno (a)

DEDICATÓRIA

Para os meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e minha irmã por serem exemplo de vida para mim e por estarem sempre ao meu lado.

Agradeço a Mônica do Amaral pelo apoio, orientação e paciência.

À todos aqueles, professores e funcionários da UFOP campus João Monlevade e amigos, que contribuíram direta e indiretamente na realização desse trabalho, sou grato igualmente a todos.

Muito obrigado.

RESUMO

O presente trabalho tem como finalidade tratar o problema de programação de produção uma aciaria, local de uma usina siderúrgica onde o ferro gusa é convertido em aço. Este problema é presente na maioria dos processos produtivos, em cada processo possui suas individualidades, como é o caso de uma siderúrgica que conta com difíceis e numerosas restrições, demandando muito tempo e trabalho se feito à mão. O objetivo desta monografia é propor um modelo matemático, através da Pesquisa Operacional dimensionando os pedidos de aço em lotes e alocando-os em uma sequência de produção, que devem obedecer a todas as suas restrições de precedência. Para elaboração do modelo foram consideradas algumas exigências particulares da aciaria como: tempo de vida do distribuidor, tempo de vida dos moldes, atender a demanda dos clientes e restrições gerais da produção de aço. O modelo foi desenvolvido no *software* livre de otimização GNU GLPK 4.8. A solução encontrada no modelo foi ótima, pois atende as restrições do modelo, mostrou-se satisfatória, pois economiza tempo e esforço para quem realiza a programação.

Palavras-Chave: Aciaria, dimensionamento de lotes, sequenciamento de lotes, pesquisa operacional, produção do aço.

ABSTRACT

This study aims on solving a scheduling problem of a steelworks. The problem occurs in most of production processes, but being a steel factory, it has particular constraints, and requires time and hard work to be done by handwriting. The purpose of this paper is to propose a mathematical model through the Operations Research field allocating the steel production in sequence, furthermore it must obey its restrictions of precedence. To develop this model was considered all requirements of the steelworks. The model was developed in *glsol* software. The solution found in the model was not satisfactory since it does not meet the constraints of the model.

Keywords: Lot-sizing, lot scheduling, operation research, steel production.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo de modelagem	11
Figura 2 – Fases de uma pesquisa apoiada em modelagem e simulação.	15
Figura 3 – Modelo geral.	17
Figura 4 – Processo de resolução de um problema.	19
Figura 5 – Cálculo da necessidade líquida.	20
Figura 6 – Representação do MRP I.....	21
Figura 7 – Representação do MRP II.	22
Figura 8 – Etapas de basculamento do convertedor.	26
Figura 9 – Aço líquido vazando na panela.	27
Figura 10 – Máquina de Lingotamento Contínuo (MLC).	28
Figura 11 – Fluxo simplificado da produção.....	29
Figura 12 – Sequências de aço.	41
Figura 13 – Sequência de produção.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos aços em Famílias.....	39
Tabela 2 – Classificação ABC dos aços.	40
Tabela 3 – Classificação dos aços.	42
Tabela 4 – Aços que precisam ser feitos com a lingoteira nova.....	43
Tabela 5 – Número máximo de corridas diferente de 14.	43
Tabela 6 – Explicação da classificação das famílias.	45
Tabela 7 – Nova classificação das famílias de aço.....	46
Tabela 8 – Sequência de aço.....	47
Tabela 9 – Demanda de aços.	49
Tabela 10 – Custo da precedência.	50
Tabela 11 – Demanda por semana.....	51
Tabela 12 – Porcentagem da demanda atendida.....	52

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 Objetivos	12
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i>	12
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i>	12
1.2 Justificativas.....	12
1.3 Organização do trabalho	13
2 METODOLOGIA DE PESQUISA	15
3 REVISÃO DE LITERATURA	17
3.1 Modelo matemático.....	17
3.2 MRP I e II	19
3.3 Dimensionamento de lotes	22
3.4 Sequenciamento de lotes	24
4 PROCESSO PRODUTIVO	25
4.1 Individualidade do processo.....	29
5 DESENVOLVIMENTO.....	31
5.1 Definição do problema de estudo.....	31
5.2 Restrições do processo	31
5.3 Modelagem do problema	33
6 RESULTADO COMPUTACIONAL.....	38
6.1 Coleta e análise de dados	38
6.1.1 <i>Horizonte de planejamento</i>	47
6.1.2 <i>Demanda</i>	49
6.2 Teste computacional	50
6.3 Discussão dos resultados.....	52
7 CONCLUSÃO.....	54

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56
APÊNDICES	58

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o 9º maior produtor de aço do mundo, com uma capacidade instalada de 48,9 milhões de t/ano, e uma produção de aço bruto de 33,9 milhões de t/ano, essa sobre oferta, produzir mais que o necessário, é um problema presente em todos os produtores de aço no mundo (VALIÑO 2009).

O parque industrial brasileiro é relativamente novo, e passa por um processo de atualização constante, segundo o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) as siderúrgicas instaladas recebem investimentos contínuos, e possuem capacidade para produzir diversos produtos, os principais são: o semiacabado, os longos e os planos - todos a partir do aço bruto (VALIÑO 2009).

Atualmente o maior consumidor de aço no mundo é a China, no entanto, segundo a previsão da *World Steel Association* (Associação Mundial de Aço), o país passa por uma desaceleração, e para 2015 é que a Índia ocupe o seu lugar. Ainda que o crescimento da Índia e a recuperação da Europa, Estados Unidos e Japão, não farão com que a demanda de aço chegue ao crescimento de 3,8%, média dos dois últimos anos, ficando em 2% (FORBES e BAHL-SCHNEIDER 2015).

As existências de alguns fatores importantes fazem com que o Brasil perca competitividade no mercado externo e interno, são eles: a taxa de câmbio, elevada carga tributária, cumulatividade dos impostos e a falta de estrutura, principalmente a logística do país (VALIÑO 2009).

Em razão do atual ambiente econômico e da alta competitividade do mercado globalizado, em que a competição acontece com produtores localizados em todas as partes do mundo, as empresas necessitam possuir um sistema de planejamento eficiente, buscando principalmente diminuir os custos e melhorar a qualidade.

Com o objetivo de auxiliar no esclarecimento desse problema, propõe-se a utilização de técnicas da Pesquisa Operacional (PO) que tem como principal aplicação à resolução de problemas reais, levando em conta a racionalidade nesse processo (SOBRAPO, 2015).

Para formular um modelo matemático, simplificações dos sistemas ou problema real precisam ser consideradas e a validação do modelo depende da solução do modelo matemático ser coerente com o contexto original. Com isso o modelo matemático é uma representação simplificada do problema real. Ele deve ser suficientemente detalhado para captar os elementos essenciais do problema, mas suficientemente tratável por métodos de resolução (ARENALES *et al.* 2007).

Conforme Arenales *et al.* (2007), a PO soluciona problemas que tentam representar um sistema real em que variáveis são definidas e as relações matemáticas entre elas são

formalizadas para descrever o comportamento do sistema. O modelo matemático é resolvido, e o passo seguinte consiste na validação do modelo, isto é, verificar se as soluções obtidas são compatíveis com a realidade. O modelo não deve substituir os tomadores de decisão, pois outros fatores pouco tangíveis também devem ser levados em consideração para a decisão final. Este processo que é representado pela Figura 1.

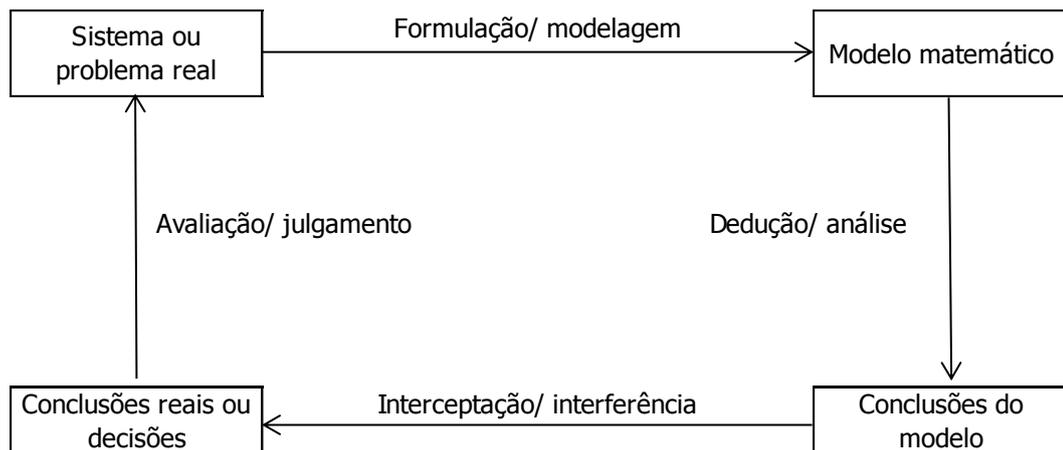


Figura 1 – Processo de modelagem
Fonte: Adaptada de Arenales et al. (2007)

Dimensionamento de lotes (*lot-sizing*) é um problema de planejamento da produção que consiste em determinar a quantidade de itens a ser produzida, em cada período ao longo do horizonte de planejamento finito, de modo a atender certa demanda e a otimizar uma função objetivo (ARAÚJO 2003).

Sequenciamento da produção (*scheduling*) é definido como um problema de programação da produção que consiste em, com um planejamento preestabelecido, sequenciar determinadas tarefas, de forma a otimizar uma função objetivo (ARAÚJO 2003).

O problema de planejamento e programação da produção pode ser desmembrado em dois problemas distintos, mas que na prática estão relacionados. Sendo resolvido primeiramente o dimensionamento de lotes, e em seguida o sequenciamento (ARAÚJO 2003).

O problema de sequenciamento de produção consiste em modelar uma carteira de aços que represente a rotina que deve ser produzida ao longo do mês de uma determinada aciaria de uma usina siderúrgica qualquer. Mais especificamente o problema consiste em distribuir um conjunto p de “famílias de aços” ao longo de um conjunto t de períodos, mês de uma aciaria, atendendo uma série de requisitos e restrições do próprio processo e dos clientes.

Ao final, se espera encontrar um modelo que ajude a resolver esse problema, pois da forma como ele é tratado na usina siderúrgica estudada, de maneira manual, se gasta várias horas de trabalho, e a solução encontrada pode não ser satisfatória ou a melhor possível.

1.1 Objetivos

São apresentados, a seguir, os objetivos geral e específicos desse trabalho.

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral modelar o problema da empresa utilizando um modelo de sequenciamento de lotes multíniveis com *setup* dependente da sequência, com a finalidade de minimizar os custos de produção de uma carteira de famílias de aços e melhorar o nível de serviço no atendimento do cliente.

1.1.2 Objetivos Específicos

Mais especificamente, o trabalho conta com os seguintes objetivos específicos:

- a) Estudar o problema real da empresa;
- b) Pesquisar os principais modelos relacionados na literatura;
- c) Adaptar um modelo às especificidades da empresa;
- d) Implementar o modelo formulado usando uma linguagem de modelagem;
- e) Testar os parâmetros da metodologia utilizada de forma a obter aquele que melhor se adapte ao problema;
- f) Coletar e analisar os dados reais da empresa e
- g) Analisar a situação real da empresa utilizando os modelos.

1.2 Justificativas

Uma usina siderúrgica oferece uma grande quantidade de aços diferentes em sua carteira, para atender as necessidades dos diversos clientes que ela possui. A demanda mensal não é constante e nem previsível, e o planejamento da produção da aciaria, que é bastante

complexo, é uma atividade que realizada mensalmente. O grande tempo gasto na programação da produção faz com que o planejamento da produção torne-se lento e demorado se feito manualmente. Para resolução desse problema, o presente trabalho irá desenvolver um modelo matemático com a intenção de atender aos requisitos do problema, que ao fim do modelo uma sequência viável seja encontrada, e que o tempo gasto no planejamento da produção seja minimizado.

1.3 Organização do trabalho

O estudo está dividido em sete capítulos, incluindo a Introdução, que trataram das seguintes questões.

O capítulo 2 descreve a metodologia utilizada durante o desenvolvimento desse trabalho, no caso modelagem e simulação. Aponta também qual o tipo de pesquisa realizada, classificada como sendo uma pesquisa empírica normativa.

No capítulo 3 é feita uma breve revisão da literatura necessária para estudo do tema, como o uso de modelos matemáticos na resolução de problemas, *Material Requirement Planning* e *Manufacturing Resources Planning* (MRP I e II), dimensionamento e sequenciamento de lotes. Neste capítulo é apresentado os principais temas e assuntos abordados no trabalho.

No capítulo 4 é explicado resumidamente como é o processo de transformação do minério de ferro em fio máquina, focando na produção do aço em uma usina siderúrgica, em que a aciaria seja LD, (LD deve-se ao fato do aço ser produzido no conversor de oxigênio).

No capítulo 5 evidencia a construção do modelo, é definido o problema e apresenta as restrições do processo e seus reflexos no mesmo.

No capítulo 6 apresenta a realização da coleta de dados bem como seu tratamento a fim de facilitar a formulação do modelo. Define o horizonte de planejamento e também, apresenta como uma demanda para que essa seja programada e sequenciada como exemplo. Apresenta como os parâmetros dão entrada no modelo e quais são os resultados obtidos com o mesmo.

O capítulo 7 consiste nas conclusões do trabalho, perspectivas de pesquisas futuras e qual a principal contribuição desse trabalho.

Por fim, seguem as referências utilizadas para o desenvolvimento da pesquisa e o apêndice contendo o modelo, os dados e os resultados em linguagem *AMPL*.

2 METODOLOGIA DE PESQUISA

A metodologia utilizada nessa pesquisa é a modelagem e simulação, em que são utilizados modelos para melhor compreender o ambiente em questão. Ele deve ser suficientemente detalhado e ao mesmo tempo simplificado, para representar o sistema real e ser tratável por métodos de análise e solução conhecidos. São descritos em linguagem matemática e computacional que pode ser calculado através de técnicas analíticas ou experimentais (MORABITO e PUREZA, 2012).

Ainda segundo Morabito e Pureza (2012), essa pesquisa pode ser classificada como sendo uma pesquisa empírica normativa. Em uma pesquisa empírica é importante garantir que os dados observados e as restrições do sistema real estejam representados no modelo proposto. Sendo preciso testar a validade dos modelos científicos em pesquisas teóricas em processos reais, ou seja, teoria e prática devem estar alinhadas. Essa pesquisa é considerada assim, pois como conclusão deverá apresentar insumos que auxiliem para o desenvolvimento de políticas, estratégias e ações que melhorem a situação estudada.

De acordo com Bertrand e Fransoo (2002), o protocolo de pesquisa que descreve as fases de desenvolvimento de uma pesquisa apoiada em modelagem e simulação, além das principais interações entre elas, pode ser representado pela Figura 2.

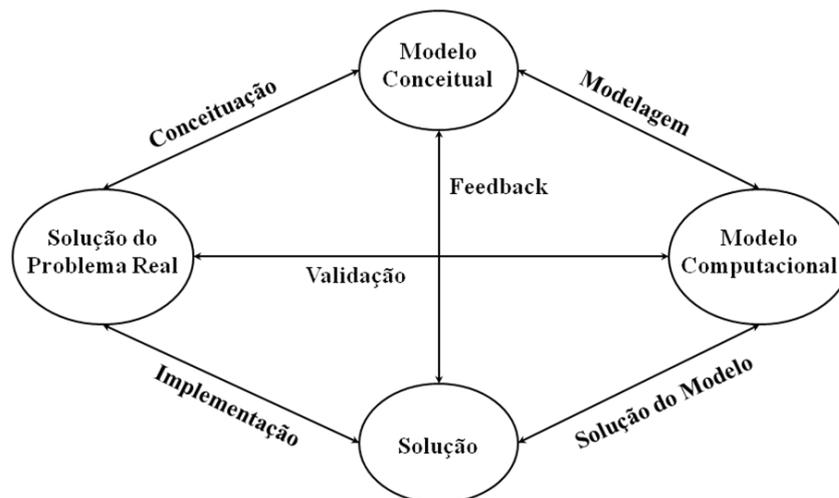


Figura 2 – Fases de uma pesquisa apoiada em modelagem e simulação.
Fonte: Mitroff *et al.* (1974) *apud* Bertrand e Fransoo (2002).

Quando se trata de uma pesquisa empírica, o problema pode ser resolvido seguindo as seguintes fases (MORABITO e PUREZA, 2012):

- a) Definição do problema;
- b) Construção do modelo;

- c) Solução do modelo;
- d) Validação do modelo e
- e) Implementação do modelo.

A fase de definição do modelo se dá a partir do escopo do problema estudado, as decisões de interesse e os objetivos, e o modelo conceitual do problema. São descritas as premissas do sistema real que se adequem a uma área de pesquisa e as alternativas de decisões e as limitações do modelo.

As informações coletadas na primeira fase são utilizadas e respeitadas na segunda, fase de construção e avaliação do modelo matemático do problema. No caso de uma pesquisa empírica, em geral, o modelo matemático específico é construindo a partir de outros já descritos na literatura. Também é comum nessa fase a realização de análise e experimentos preliminares com o modelo, que o intuito de verificar e validar o modelo ao sistema real.

Para a resolução do modelo, métodos de solução de algoritmos são utilizados. Nessa fase é comum realizar testes preliminares para identificar erros e verificar a adequação e o desempenho da implementação computacional dos algoritmos. Também é verificada a consistência e robustez das soluções quando os parâmetros do modelo não podem ser estimados com precisão.

Na fase de validação, verifica se o modelo representa adequadamente o comportamento do sistema real, levando em conta as hipóteses admitidas na definição do problema. Um método utilizado para verificar a validade de um modelo é comparar seus resultados com os dados históricos do problema. Atualmente a empresa não conta com nenhum sistema que auxilie a resolutiva do problema, sendo ele resolvido de maneira manual, e as programações anteriores são arquivadas, deste modo, uma maneira de verificar o modelo e sua aplicabilidade, poderia ser comparar a programação feita a mão de uma demanda passada, com como ela seria utilizando o modelo.

Por fim, a solução prática é implementada, fase que pode demandar bastante tempo, traduzindo os resultados do modelo em conclusões e possíveis decisões.

Dessa forma, a formulação de um modelo matemático nem sempre ocorre de uma vez só, podendo haver retrocesso entre uma etapa e outra. As soluções do modelo devem servir como apoio ao processo de tomada de decisão, onde também deve ser levado em conta fatores pouco tangíveis.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Modelo matemático

Segundo Lachtermacher (2009), a Pesquisa Operacional (PO), pode auxiliar na resolução de diversos tipos de problemas.

De acordo com Goldbarg e Luna (2005), os modelos são representações simplificadas da realidade onde, para determinadas situações e enfoques, preservam-se a equivalência adequada. Taha (2008) representa o modelo geral de PO no seguinte formato:



Figura 3 – Modelo geral.
Fonte: Taha (2008).

A solução do problema, para ser considerada viável, deverá satisfazer todas as restrições, e ótima, se além de ser viável, resultar no melhor valor (máximo ou mínimo) da função objetivo. Os modelos de PO são formulados para otimizar uma função objetivo específica com um conjunto de restrições, por sua vez, a qualidade da solução depende de quanto o modelo representa o sistema real. E sua conclusão ótima é particular, sendo melhor especificamente somente para aquele modelo (TAHA, 2008). O modelo não é igual à realidade, mas deve ser suficientemente similar para que suas conclusões sejam estendidas para a realidade (GOLDBARG e LUNA, 2005).

O processo de modelagem se baseia quando uma decisão deve ser tomada em uma série de alternativas conflitantes e concorrentes, com isso, surgem duas possíveis soluções, usar apenas a intuição ou realizar um processo de modelagem das situações de maneira a estudar mais profundo o sistema. Para que o processo de tomada de decisão seja realizado com maior eficiência, é recomendado o uso das duas opções em conjunto. Que pode ser entendida como o processo de identificação de um problema (quando o estado atual de uma situação é diferente do desejado) ou de uma oportunidade (chance de alterar os objetivos ou metas) e de seleção de uma linha de ação para resolvê-lo (LACHTERMACHER, 2009).

Segundo Lachtermacher (2009), os fatores que afetam na tomada de decisão são:

- a) Tempo disponível, algumas decisões devem ser tomadas instantaneamente e algumas dispõem de um tempo maior;
- b) Importância da tomada de decisão, geralmente está associada ao custo ou ao prejuízo que a decisão pode ocasionar;
- c) Ambiente, local onde a decisão é tomada;
- d) Grau de certeza que se tem sobre os parâmetros relevantes para a tomada de decisão;
- e) Quem toma a decisão, que pode levar em conta a opinião individual ou de um grupo e
- f) Conflito ou interesse, já que algumas decisões afetam de maneiras distintas dois grupos.

De acordo com Taha (2008) a técnica mais utilizada na resolução de modelos de PO é a programação linear, sendo aplicada quando a função objetivo e as restrições são lineares. Outras técnicas são: Programação inteira, Programação dinâmica, Otimização em redes, Programação não linear.

No caso de modelos que são muito complexos, tornam-se impossível a resolução por qualquer algoritmo de otimização disponível. Um algoritmo fornece um conjunto de regras de cálculos fixas que são aplicadas repetidamente, cada repetição é chamada de iteração, sendo que a cada iteração a solução fica mais próxima de se tornar ótima. Assim a busca por uma solução ótima é abandonada, buscando-se apenas uma boa solução através da heurística ou regras praticas (TAHA, 2008).

Segundo Lachtermacher (2009) o processo de resolução de um problema consiste basicamente em cinco etapas consecutivas, esse processo é cíclico (podendo retroceder etapas), todas as etapas são importantes, mas a principal é a identificação do problema, caso o problema seja mal identificado não levará a lugar algum, além de perder tempo e esforço.

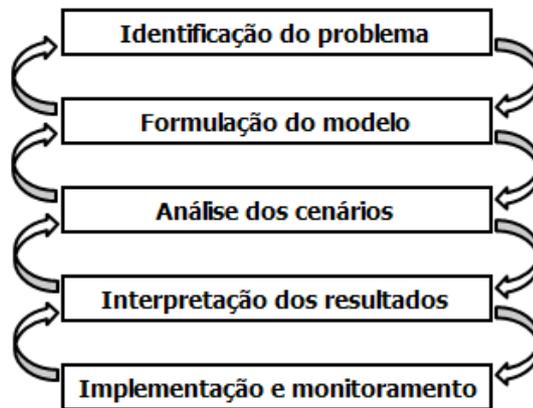


Figura 4 – Processo de resolução de um problema.
 Fonte: Lachtermacher (2009).

Goldbarg e Luna (2005) entendem a análise dos cenários como a validação, reformulação e a simulação do modelo.

A definição do problema envolve determinar primeiramente o seu escopo, sendo importante identificar três elementos: a descrição das alternativas de solução, o objetivo de estudo e a especificação das limitações sob as quais o modelo funciona. A solução do problema/modelo é a fase mais simples, pois se baseia na utilização de algoritmos de otimização bem definidos (TAHA, 2008).

3.2 MRP I e II

O *Material Requirement Planning* (MRP) surgiu da necessidade de se planejar o atendimento da demanda dependente, aquela que se deriva da demanda independente, originada nas necessidades do consumidor e se refere basicamente aos produtos acabados, ou seja, que está fora do controle imediato da empresa (MARTINS *et al.*, 2006).

O conceito do MRP se baseia no conhecimento de todos os componentes de determinado produto e os tempo de obtenção de cada um deles, com base na visão de futuro pode-se calcular o momento e a quantidade que devem ser obtidas, para que não ocorra falta e ou sobra de cada um deles. Com o objetivo de produzir e/ou comprar apenas o necessário no momento necessário (CORRÊA *et al.*, 2001).

Plano mestre de produção (*Master Production Schedule – MPS*) representa a demanda a ser atendida, aquilo que deve ser efetivamente produzido, itens acabados ou pedidos de clientes. Por se tratar de uma previsão, reconhece as incertezas que fazem parte do futuro, o

MRP deve considerar as possibilidades de alterações nas demandas previstas. (MARTINS *et al.*, 2006). De acordo com Gaither *et al.* (2008), o MRP supõe que o MPS possa ser produzido dentro das restrições da capacidade de produção, se essa necessidade não puder ser satisfeita, o MPS precisará ser alterado dando origem a um novo.

Segundo Gaither *et al.* (2008), o MRP atua da seguinte maneira: primeiro, com o MPS ele determina o número de itens finais necessários em cada período de tempo, em seguida ele atualiza os dados de estoque. O MPS e as peças de reposição são explodidos (desdobrar o produto, até que chegue ao menor dos seus componentes) em necessidades brutas para todos os materiais por período de tempo no futuro, chamada lista de materiais (*Bill of Material – BOM*). Posteriormente as necessidades brutas dos materiais são alteradas pela quantidade de materiais disponíveis e os já pedidos em cada período. As necessidades líquidas são computadas da seguinte forma:

$$\text{necessidade líquida} = \text{necessidade bruta} - \left[\text{estoque disponível} - \text{estoque de segurança} - \text{estoque alocado para outros usos} \right]$$

Figura 5 – Cálculo da necessidade líquida.
Fonte: Adaptada de Gaither *et al.* (2008).

Se a necessidade líquida for maior que zero o pedido das necessidades é feito. Por fim, os pedidos são contrabalançados para períodos de tempo mais antecipados para levar em conta os *lead times* de cada etapa e dos fornecedores.

Segundo Corrêa *et al.* (2001), o MRP possui uma lógica chamada de *backward scheduling*, ou programação de trás para frente. A partir da visão de futuro da necessidade dos produtos acabados ela vem desmembrando as informações, ou “explodindo” as necessidades de cada componente nível a nível, para trás no tempo. Cada componente necessário à produção deve chegar na hora exata para produzir os itens finais no MPS (GAITHER *et al.*, 2008).

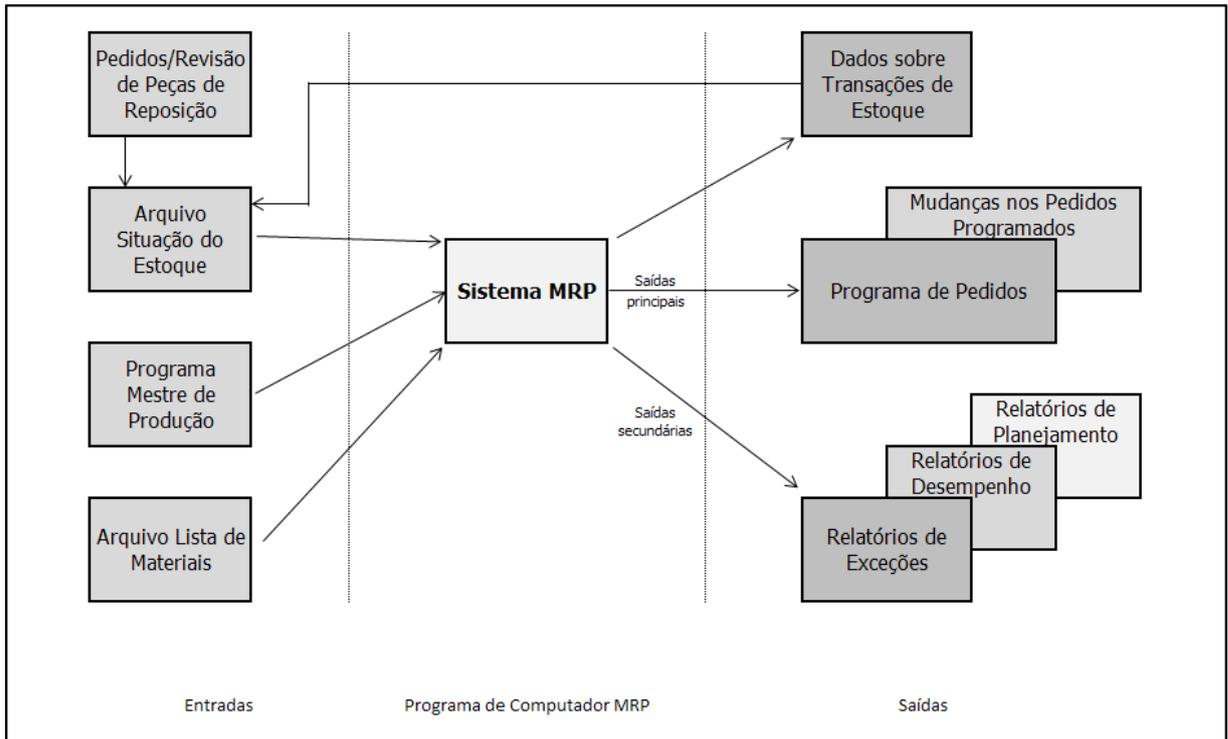


Figura 6 – Representação do MRP I.

Fonte: Gaither *et al.* (2008).

De acordo com Gaither *et al.* (2008) os objetivos do MRP são:

- a) Melhorar o serviço do cliente, pois para garantir o cliente satisfeito, deve-se primeiramente cumprir as promessas de entrega e tentar abreviar os prazos de entrega, com o MRP as datas de entrega prometidas tornam-se metas a serem cumpridas pela organização, por isso devem se atendidas e melhoradas;
- b) Redução do investimento em estoque, pois as matérias primas são programadas para chegar o mais próximo possível do tempo em que ele é necessário e
- c) Melhorar a eficiência operacional da fabrica, pois controla a quantidade e os tempos de entrega dos componentes e se são entregues à produção na hora exata.

O conceito do MRP foi ampliado, devido ao desenvolvimento da capacidade de processamento e popularização dos computadores. Assim, além dos materiais que já eram tratados, a extensão do MRP para o MRP II, passou a incluir também outros insumos, como: mão-de-obra, equipamentos, espaços disponíveis para estocagem, instalações entre outros. Os *softwares* com tais capacidades de processamento passaram a ser denominados sistemas de *Manufacturing Resources Planning* (MRP II), para diferenciar do *Material Requirement Planning* (MRP) (MARTINS *et al.*, 2006).

Segundo Martins *et al.* (2006) as principais vantagens do MRP são:

- a) Permitir o planejamento de compras, de contratações ou demissões de pessoal, a necessidade de capital de giro, necessidade de equipamentos e demais insumos produtivos;
- b) Permitir a simulação de diferentes cenários de demanda que podem ter seus efeitos analisados e
- c) O MRP baseia-se na explosão dos produtos, levando ao conhecimento detalhado de todos os seus componentes e o MRP II de todos os demais insumos necessários para a fabricação, auxiliando na estimativa do custo detalhado do produto.

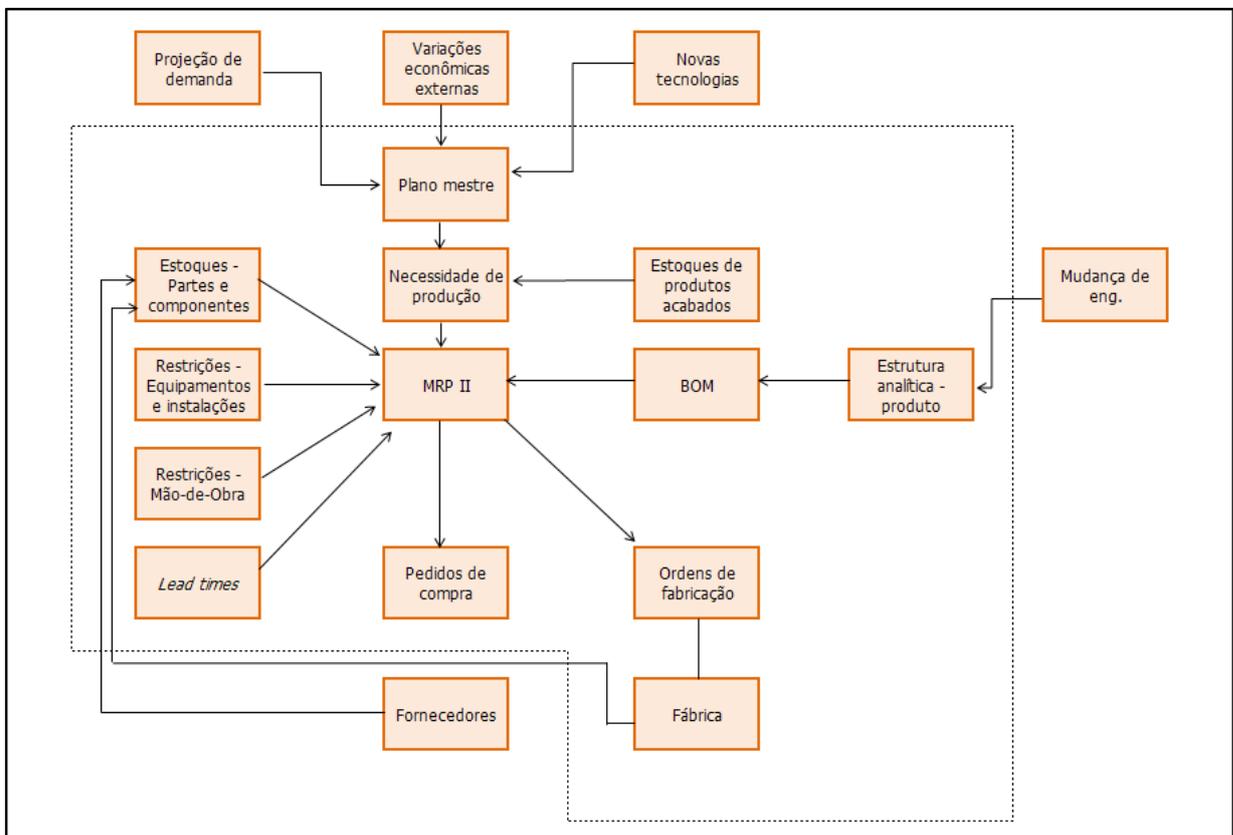


Figura 7 – Representação do MRP II.

Fonte: Martins *et al.* (2006).

3.3 Dimensionamento de lotes

Buscando atender aos prazos estabelecidos pelos clientes externos e internos, levando em conta a capacidade de produção, que é limitada, os custos de armazenamento, quando

antecipa um item, ou de falta quando o item não é produzido no prazo certo, e os custos de produção, considerando o tempo de *setup* das máquinas (TOLEDO *et al.*, 2000).

Segundo Machado (2003), o problema de dimensionamento de lotes geralmente está baseado na lógica de planejamento do *Material Requirement Planning* (MRP).

Dimensionamento de lotes é um problema que ocorre na programação da produção e que consiste em determinar o tamanho dos seus lotes e de cada produto a ser produzido em uma ou mais máquinas, em cada período ao longo do horizonte de planejamento finito, visando atender à demanda, minimizando os custos, ou seja, deve-se mostrar quando produzir de cada produto em cada período (KUIK *et al.*, SALOMON e WASSENHOVE, KARIMI *et al.* e BRAHIMI *et al.* *apud* FERREIRA, 2007).

As pesquisas de dimensionamento de lote tiveram início com o modelo clássico de Lote Econômico (*Economic Order Quantity* – EOQ) (ERLENKOTTER e HARRIS *apud* MACHADO 2003). Considerando um item individual, sem restrição de capacidade e com demanda estacionária (constante) ao longo do horizonte de fabricação infinito (ARAUJO 2003).

Devido a suas restrições surgiram outros modelos, como o *Economic Lot Scheduling Problem* (ELSP), onde o problema é programar a produção de mais de um produto em uma única máquina. Com capacidade disponível limitada, é um modelo monoestágio (produção de um item não depende da produção de outro), com custos de *setup* e tempo independentes da sequência e com taxas de produção e demanda constantes no horizonte de tempo infinito (ARAUJO, 2003 e FERREIRA, 2007).

O próximo modelo surgiu quando passaram a considerar a demanda dinâmica Wagner e Whitin (1958 *apud* TOSO, 2008 e ARAUJO, 2003). É um modelo monoestágio (produção de um item não depende da produção de outro), sem restrição de capacidade, com custo de preparação, com os horizontes de planejamento dividido em subperíodos discretos, com a demanda dinâmica (conhecida e podendo sofrer variações em cada período), podendo produzir um único lote por período, onde o problema é determinar o tamanho do lote que minimiza os custos.

Segundo Ferreira (2007), a demanda pode ser constante (estacionária), quando permanece constante no horizonte de planejamento, e dinâmica quando variar. Normalmente quando o horizonte de planejamento é finito ela é dinâmica.

Na maioria dos estudos de dimensionamento de lotes, usam-se modelos que consideram vários itens, com demanda constante e restrição da capacidade. Eles podem ser divididos em dois grupos: modelos multiestágios, em que para produzir um item é necessário

que outros itens tenham sido produzidos e modelos monoestágio, na qual produção de um item não depende da produção de outros itens. Quando não existe restrição de capacidade, o problema de monoestágio, com vários itens, pode ser decomposto em N subproblemas, um para cada item, e cada um desses subproblemas pode ser resolvido por um algoritmo de programação dinâmica (ARAUJO, 2003).

3.4 Sequenciamento de lotes

Os problemas de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção, embora bastante relacionados, são normalmente tratados separadamente na literatura. Segundo Araujo (2003), a tendência é se passar a tratar de forma conjunta esses problemas.

No entanto, a solução a ser encontrada nesse problema consiste em definir qual a ordem e quando produzir os lotes, para não perder capacidade produtiva e minimizar os tempos de preparação entre os lotes (JOHNSON E MONTGOMERY, HAX E CANDEA, GRAVES *et al.*, GERSHWIN, NAHMIAS *apud* TOSO, 2008).

O método mais utilizado na prática para resolver o problema é o *Manufacturing Resource Planning* (MRP II), acontecendo da seguinte forma: primeiro o tamanho dos lotes são calculados para todos os itens em todos os níveis da estrutura, começando pelos itens finais e não levando em conta ainda a restrição de capacidade. Em seguida, é feito balanceamento de capacidade nos períodos, transferindo os lotes dos períodos sobrecarregados para os mais folgados, buscando encontrar um plano de produção possível dentro da capacidade, ainda sem levar em conta as relações de precedência. Por fim, a decisão de sequenciamento é definida e os pedidos são liberados para o chão de fábrica (TOSO 2008 e ARAUJO 2003).

Segundo Toso (2008), outra ferramenta muito utilizada pelas empresas de manufatura são os sistemas de gerenciamento *Enterprise Resource Planning* (ERP), que além do MRP, disponibilizam um módulo para a previsão de demanda dos clientes, entre outros.

4 PROCESSO PRODUTIVO

O processo começa com a chegada do minério de ferro à usina, ao chegar, o mesmo passa por um processo de beneficiamento, onde são removidos os minerais que não são aproveitáveis do minério, e é armazenado em silos, retirado de lá somente quando o alto forno - etapa posterior - necessita. Após a retirada do minério do silo, ele é pré-homogeneizado para ser levado a um misturador, onde é adicionado água e outros materiais, dando origem ao bolo de sinter. Em seguida, essa mistura é aquecida e levada ao britador para que chegue à granulometria desejada, já que há uma restrição do alto forno que não aceita granulometria inferior a 4 mm, pois dificulta a passagem de ar.

A formação do ferro gusa é feita no alto forno. Este é transformado com a redução ou perda de oxigênio do minério de ferro, gerando como subproduto a escória. A carga composta por minério de ferro, coque (carvão com alto rendimento utilizado na siderurgia) e fundentes é inserida na parte superior do forno. O coque quando entra em combustão, produz calor e monóxido de carbono ao processo, auxiliando na fusão do minério. Já os fundentes têm o papel de deixar a mistura fluida e auxiliar na formação da escória líquida. O aquecimento destes compostos ocorre a uma média de 1.700°C. Assim é formado o ferro gusa que, posteriormente, é despejado nos carros torpedo para sofrer dessulfuração (remoção do enxofre). A escória, que também é subproduto desse processo, é resfriada e refinada, essa tem como principal destino indústrias de cimento, pois faz parte da produção do mesmo.

Na aciaria, o ferro gusa produzido no alto forno dá origem ao aço líquido. A primeira etapa deste processo é a adição de sucata e fundentes no convertedor - uma espécie de recipiente/forno revestido por material refratário. Logo após, o ferro gusa também é inserido neste local. Em seguida, tem-se o sopro, momento em que a lança de oxigênio desce e atua injetando oxigênio no convertedor (este sopro dura em média 18 minutos, porém esse tempo pode variar de acordo com o tipo de aço produzido). Ao final tem-se a formação do aço líquido. Em geral, neste processo prioriza-se a descarburagem e a desfosforagem, visando diminuir o nível de carbono e fósforo, para que seja possível atender às especificações do aço programado. O refino primário é feito ainda no convertedor e o secundário no forno panela. Este processo pode ser visto na Figura 8.

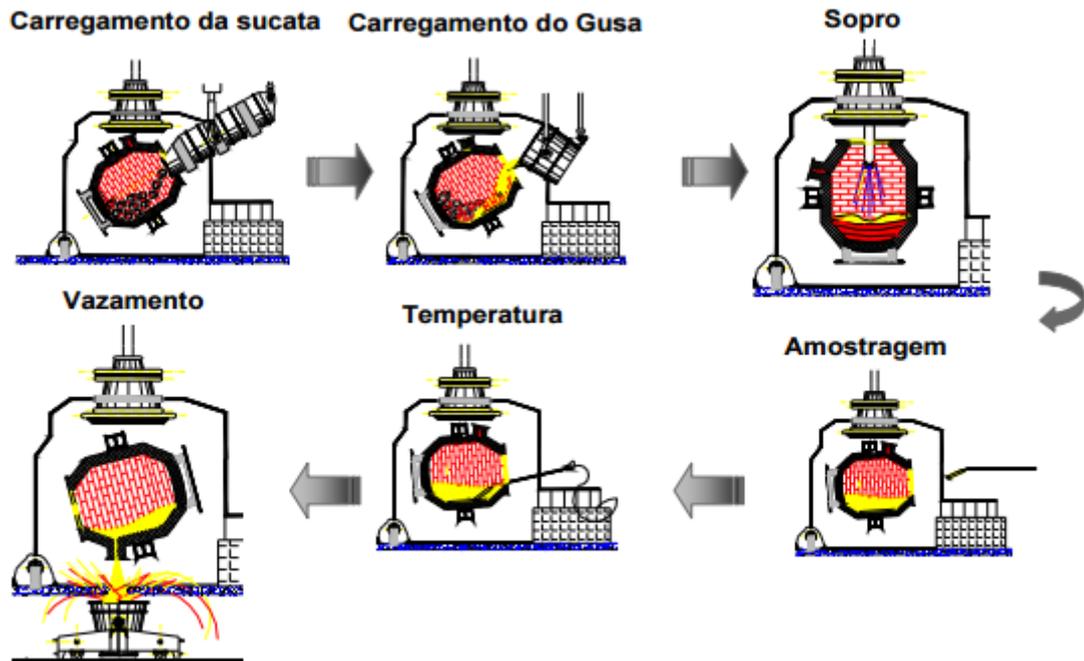


Figura 8 – Etapas de basculamento do convertedor.
Fonte: Fracalossi (2013)

A sucata, que é enfiada durante a produção, é estocada em um hall na própria aciaria. Esta é transportada através de caixas (chamadas de caixas de sucata) até o convertedor. Todo este transporte - da caixa e da panela de ferro gusa - é feito através de pontes rolantes que fazem a movimentação da carga durante todo o fluxo de produção.

Após o sopros, é enviada uma amostra para o laboratório para que seja feita a análise da composição química. Apenas depois da aprovação da amostra o aço é vazado em uma panela. Durante o vazamento são adicionadas ligas para a correção química. Parte da escória formada durante o sopros é despejada em um pote e, com o restante, é feito o *slag splashing* (processo que através de um jato de nitrogênio faz com que escória seja incrustada nas paredes do convertedor para proteção do refratário).

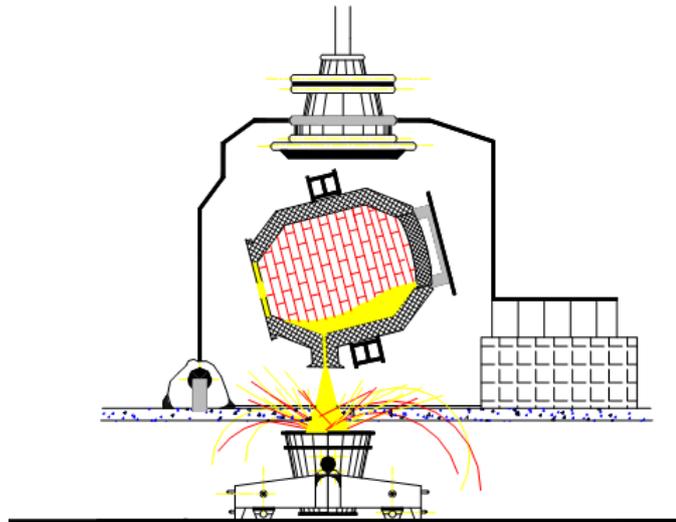


Figura 9 – Aço líquido vazando na panela.
Fonte: Fracalossi (2013)

O aço líquido vazado na panela é levado do forno panela para o refino secundário. Nesta etapa, há uma melhor homogeneização, além da retirada de impurezas e acerto de temperatura. Ainda no forno panela, tem-se a adição de palha de arroz na parte superior da panela. A palha, por densidade, flutua e tem a função de manter a temperatura e evitar a oxidação do aço. Ao final, a panela com aço está preparada para ser direcionada à Máquina de Lingotamento Contínuo (MLC).

Ao chegar à MLC, a panela é posicionada na torre - estrutura com dois suportes, chamados de braços, que sustentam a panela. Ao rotacionar a torre, o operador faz com que a panela vazia, que acabou de ser lingotada, seja trocada pela panela cheia (vinda do forno panela), minimizando perda de tempo no processo, pois durante a rotação da torre, o final do aço da panela anterior ainda está armazenado no distribuidor - equipamento responsável por intermediar a passagem do aço da panela para a MLC - proporcionando um espaço de tempo suficiente para que a panela seja trocada sem exigir a parada da máquina.

Após aberta a panela, o aço desce através de um tubo - denominado tubo longo - para o distribuidor. O aço armazenado desce por mecanismos instalados no fundo do distribuidor para que seja transferido até a válvula submersa e, posteriormente, até o molde. A velocidade dessa transferência é controlada pela válvula gaveta, que retém ou libera a passagem do aço.

No molde, o aço toma forma através da lingoteira - material de cobre com seção quadrada. Nele também o aço passa por um intenso resfriamento. É nesta etapa que o aço líquido começa a passar pelo processo de solidificação, de fora para dentro, formando inicialmente uma casca.

O aço com a casca formada desce pelo “raio da máquina”, puxado pela extratora, através dos rolos de pé. Durante o percurso, também tem-se um resfriamento intenso, dividido em zonas. Ao final é feito o corte (a base de oxigênio) do aço já solidificado, pela Máquina de Oxi-Corte (MOC). As dimensões do corte dependem de cada tipo de aço. A Figura 10 representa a máquina de lingotamento contínuo e todos seus componentes.



Figura 10 – Máquina de Lingotamento Contínuo (MLC).
Fonte: Fracalossi (2013)

Por fim, o tarugo já formado vai para a laminação, onde é feita a sua conformação mecânica. Para que o processo seja facilitado, esse tarugo é reaquecido e só depois por compressão direta, passando por várias fases de deformação plástica, consegue-se chegar ao diâmetro específico do fio máquina desejado.

Resumidamente o processo é representado na Figura 11.

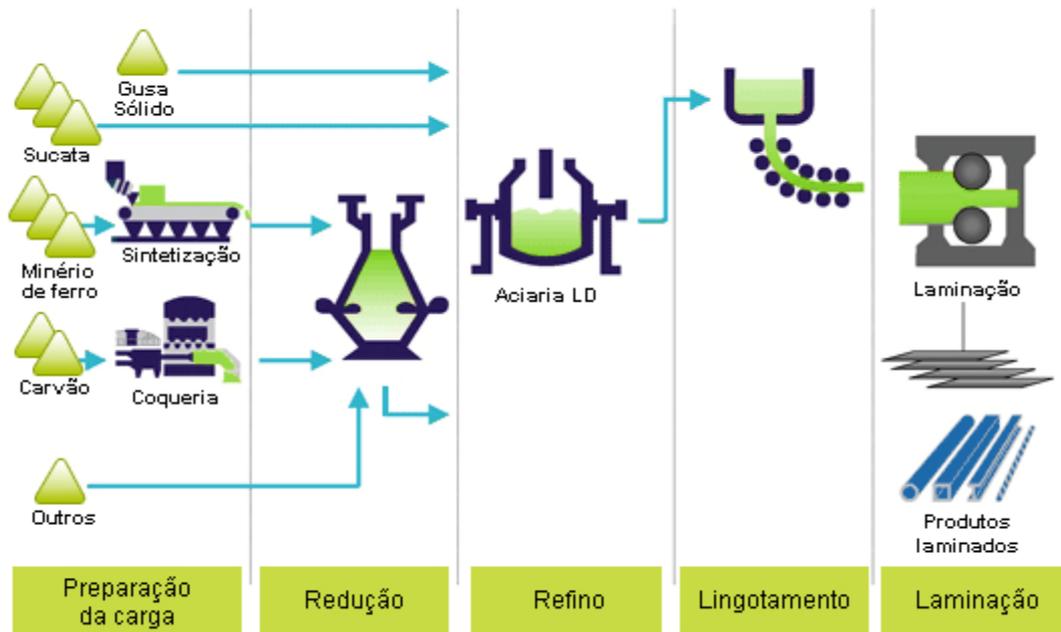


Figura 11 – Fluxo simplificado da produção.

Fonte: <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/index.asp>

4.1 Individualidade do processo

No presente trabalho é realizado um estudo em uma usina siderúrgica com uma aciaria do tipo LD (processo em que o aço é produzido no conversor de oxigênio).

Para tanto, foi recortada apenas uma etapa do processo da fabricação do fio máquina, produto final, etapa esta que é a aciaria. Esta, por sua vez, é a parte da usina que transforma o ferro gusa em aço líquido, que é o produto imediato da fundição do minério de ferro, adicionados de outros elementos e diferentes tipos de aço, que são (ligas metálicas entre ferro e carbono).

A solidificação do aço líquido acontece na máquina de lingotamento contínuo e pode dar origem ao tarugo, bloco, *beam blank* ou placa. Na aciaria do estudo, o produto final é o tarugo de face quadrangular.

O tarugo possui 12 metros de comprimento, pesa aproximadamente 2,198 toneladas (no estudo, arredondado para 2,2 toneladas). Cada corrida possui a duração de 51 minutos e 50 segundos, e sua quantidade é de 125 toneladas (definição de corrida no tópico 5.2 Restrições do processo).

O distribuidor tem vida útil de 14 corridas, e o ideal que o mínimo seja de 6 corridas para ser viável economicamente. A lingoteira tem vida útil de 400 corridas, podendo variar 10% para mais ou para menos, e é considerada nova até 250, podendo variar 10% para mais (explicações de distribuidor e lingoteira no tópico 5.2 Restrições do processo).

5 DESENVOLVIMENTO

5.1 Definição do problema de estudo

- a) Minimizar as trocas de distribuidor;
- b) Minimizar as trocas de molde;
- c) Minimizar os atrasos;
- d) Atender à demanda dos clientes e
- e) Fazer todos os aços planejados, considerando suas restrições.

5.2 Restrições do processo

O processo de fabricação de aços acontece com algumas propriedades e restrições características, as quais dificultam a realização do planejamento da produção, algumas serão apresentadas a seguir, podendo existir algumas simplificações para melhor entendimento e compreensão.

Cada cliente deve enviar seu pedido na penúltima semana do mês anterior ao que deseja ter a sua entrega, ou seja, caso o cliente queira o produto para ser entregue no mês x , independente da semana, o mesmo deverá ser solicitado na penúltima semana do mês $x - 1$. Esse tempo é necessário, pois para enviar uma resposta ao cliente de quando seu produto será entregue, primeiro é preciso programar a produção dos aços na aciaria, após a sequência das bitolas nos laminadores, para depois enviar para o cliente a confirmação do pedido e a data de entrega. O pedido enviado pelo cliente é em unidades de fio máquina, que é uma combinação de aço e bitola (grossura do fio máquina), o pedido é convertido em aço e toneladas, pois para programar a aciaria é o que importa.

Para definir a programação, todos os pedidos de aços em comum são somados e então é apresentada a demanda do mês em total de toneladas (t) daquele aço. A programação estipulada é enviada para a aciaria, determinando quais tipos de aço e quando deverão ser produzidos.

Na aciaria, uma panela produz um tipo de aço. O termo “corrida” designa a produção de uma panela. A capacidade média da mesma é de aproximadamente 125 toneladas. Para estipular quantas corridas deverão ser produzidas de determinado aço, é necessário calcular a

quantidade total de toneladas desejada dividido por 125 t, por exemplo, se a demanda do aço s no mês for de 1.000 t, o número de corridas será equivalente a 8 (1.000 dividido por 125). Este cálculo funciona para quase todos os aços. Para os aços que por motivos de garantia de qualidade possuem seus primeiros e últimos tarugos da sequência reclassificados, o cálculo deve ser modificado para a tonelada aproveitada da corrida.

Um fator importante a ser considerado no planejamento da produção são as misturas de aços no distribuidor. Como já visto, o distribuidor armazena o aço da panela. Após o fim do aço na panela x , temos a rotação da torre posicionando a panela y em posição de abertura. Ao abrir, o aço da panela y se mistura com o aço da panela x , que ainda resta no distribuidor, acontecendo então uma mistura. Essa mistura é permitida para aços que possuem propriedades semelhantes (a principal delas, a porcentagem de carbono), determinadas por parâmetros regidos por norma, criando então “famílias de aços” que possuem condição de ajuntamento, ou seja, que permitem tal mistura sem problemas em qualidade. Caso aconteça uma mistura de aços que não possuem condição de ajuntamento, são tomadas medidas para restringir e separar os tarugos afetados (geralmente os últimos da corrida anterior e os primeiros da corrida atual), mesmo assim há perda econômica, pois são desclassificados (classificados para um aço inferior em relação à qualidade) para um aço de menor valor econômico. Essa reclassificação é estipulada de acordo com a quantidade de aço que se mistura no distribuidor.

Então, um conjunto de corridas no mesmo distribuidor é denominado “sequência”. O ideal é que aços de uma mesma família sejam produzidos na mesma sequência, evitando misturas fora das restrições de ajuntamento.

Devido ao desgaste do distribuidor e garantia da qualidade do aço, o número máximo em uma sequência, estipulado pelo setor de programação em conjunto com a aciaria, é de 14 corridas, podendo ser menos caso a programação não necessite de grande quantidade daquele aço, evitando estoques e priorizando os próximos aços a serem produzidos. O número mínimo estipulado é de 6 corridas, para aproveitar o mínimo da vida útil do distribuidor, abaixo disso o processo fica cada vez mais inviável economicamente. Ao fim da sequência, o distribuidor é desmontado e reformado. Com isso surge um dos objetivos do modelo que é minimizar o número de troca de distribuidores, aproveitando ao máximo a vida útil de cada um deles.

Outra restrição na programação é a vida da lingoteira. Como já visto, o aço após sair do distribuidor, vai para o molde e tem seu formato definido pela lingoteira, conseqüentemente ela apresenta evolução no desgaste com o decorrer da produção. Para medir esse desgaste, foi criado um indicador nomeado “vida de lingoteira”. A cada corrida

produzida na mesma lingoteira, se acrescenta uma unidade no indicador. Ou seja, produzindo 200 corridas, temos uma vida de lingoteira de 200. A vida máxima para sua troca é estipulada por norma, e varia de acordo com cada tipo de aço, na maioria das vezes é de 400 corridas. O tempo de vida da lingoteira pode variar 10% para mais ou para menos.

Para alguns aços, com maiores restrições de qualidade, tem-se uma limitação, em que o aço ou família não pode ser produzido quando a lingoteira atinge um número maior que 250 corridas, com esse valor podendo variar 10% para mais ou para menos. Apenas um tipo de aço desse estudo, o SP01_C, deve ser produzido obrigatoriamente quando a lingoteira já ultrapassou o número de 250 corridas.

Ao atingir o limite estipulado de corridas, é necessário fazer a troca da lingoteira. Como a lingoteira fica acoplada no molde, é necessário retirar o mesmo da máquina de lingotamento contínuo (sendo assim substituído por um molde novo com lingoteira nova). Essa parada de máquina é nomeada como parada para “troca de molde”. A lingoteira velha é sucateada e uma nova é colocada em seu lugar no molde reformado, que voltará futuramente na próxima troca de molde.

Surge então a outra restrição do modelo, que é adequar o número de trocas de molde de acordo com a vida de lingoteira de cada aço, aproveitando ao máximo a vida útil da lingoteira.

Cada aço deve ser entregue em uma data já definida para o cliente, então atrasos devem ser penalizados. O *setup* da produção de diferentes tipos de aço possui característica bastante homogênea, não havendo necessidade de diferenciar os seus custos relativos, mas existem algumas proibições em relação a sequência, em que uma família de aço somente pode ser feita após outra específica. Não é levado em conta o custo de estoque, portanto para completar o número mínimo de corridas por sequência podem ser feitas corridas a mais que o realmente necessário.

5.3 Modelagem do problema

A partir das análises dos dados da siderúrgica foi possível determinar as restrições do problema e o objetivo do modelo. A seguir, tem-se o modelo matemático do problema em estudo, que tem os seguintes conjuntos e parâmetros.

Conjuntos:

- T : Períodos de planejamento;
- P : Tipos de produtos fabricados.

Parâmetros:

- s_{pr} : Custo de *setup* do produto p , a ser feito depois do produto r ;
- h_p : Custo de estoque do produto p ;
- d_{pt} : Demanda do produto p no período t ;
- I_{0p}^+ : Estoque inicial do produto p ;
- I_{0p}^- : Falta inicial do produto p ;
- sp_p : Tempo de *setup* do produto p ;
- b_p : Tempo de produção de uma unidade do produto p ;
- C_t : Tempo disponível para a produção no período t ;
- Δ_p : Custo de falta do produto p ;
- a_{ij} = 1 se o aço p pode ser feito depois do aço j devido às restrições de panela limpa ou suja e “0”, caso contrário;
- k : Número máximo de distribuidores que podem ser usados durante o horizonte de planejamento;
- α : Custo de uso de um distribuidor;
- m_0 : Quantidade de corridas já realizadas no molde no início do horizonte de planejamento;
- β : Custo de uso de um molde;
- g_p = 1 se o produto p precisa ser feito até 206 corridas realizadas com o molde e “0”, caso contrário;
- u : Limite superior para o número de corridas feitas em um distribuidor;
- l : Limite inferior para o número de corridas feitas em um distribuidor;

f : Número máximo de corridas que se deve iniciar a ultima sequência antes da troca do molde.

Variáveis:

- y_{pt} = 1 se houve a produção do produto p no período t e “0”, caso contrário;
- w_{pt} = 1 se o estado de preparação do produto p continua de $t-1$ a t e “0”, caso contrário;
- q_t = 1 se não houve preparação do período t , mas houve preservação de $t-1$ até $t+1$ e “0”, caso contrário;
- r_{pt} = 1 se o *setup* para o produto p pode ser feito no período t em função do número de corridas já realizadas com o molde e “0”, caso contrário;
- I_{pt}^+ : Estoque do produto p ao final do período t ;
- I_{pt}^- : Falta do produto p ao final do período t ;
- x_{pt} : Número de corridas fabricadas do produto p no período t ;
- z : Quantidade de distribuidores utilizados durante o horizonte de planejamento;
- m : Variável inteira que indica a quantidade de moldes trocados durante o horizonte de planejamento.

Modelo:

$$\text{Minimizar } \sum_{p \in P} \sum_{j \in P} \sum_{t \in T} s_{pj} y_{pt} + \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} h_p I_{pt}^+ + \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \Delta_p I_{pt}^- + \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \alpha (y_{pt} + w_{pt}) + \beta m \quad (1)$$

Sujeito à:

$$I_{pt}^+ - I_{pt}^- = I_{0p}^+ - I_{0p}^- + x_{pt} - d_{pt} \quad \forall p \in P, \forall t \in T : t=1 \quad (2)$$

$$I_{pt}^+ - I_{pt}^- = I_{p,t-1}^+ - I_{p,t-1}^- + x_{pt} - d_{pt} \quad \forall p \in P, \forall t \in T : t > 1 \quad (3)$$

$$\sum_{p \in P} (s p_p y_{pt} + b_p x_{pt}) \leq C_t \quad \forall t \in T \quad (4)$$

$$x_{pt} \leq u (y_{pt} + w_{pt}) \quad \forall p \in P, \forall t \in T \quad (5)$$

$$x_{pt} \geq l(y_{pt} + w_{pt}) \quad \forall p \in P, \forall t \in T \quad (6)$$

$$z = \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} y_{pt} \quad (7)$$

$$w_{pt} \leq 1 \quad \forall p \in P, \forall t \in T \quad (8)$$

$$w_{pt} \leq y_{pt-1} + w_{pt-1} \quad \forall p \in P, \forall t \in T : t > 1 \quad (9)$$

$$w_{pt-1} + w_{pt} \leq 1 + q_t \quad \forall p \in P, \forall t \in T : t > 1 \quad (10)$$

$$y_{pt} + q_t \leq 1 \quad \forall p \in P, \forall t \in T \quad (11)$$

$$I_{pt}^- = 0 \quad \forall p \in P, \forall t \in T : p = 30 \quad (12)$$

$$y_{it} \leq a_{ij} y_{jt-1} + w_{jt-1} \quad \forall i \in P, \forall j \in P, \forall t \in T : t > 1 \quad (13)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{t \in T} (y_{pt} + w_{pt}) \leq k \quad (14)$$

$$m_0 + \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} x_{pt} \leq fm \quad (15)$$

$$fm - \left(m_0 + \sum_{i \in P} \sum_{f \in T} x_{if} \right) \leq g_p r_{pt} \quad \forall p \in P, \forall t \in T \quad (16)$$

$$y_{pt} \leq r_{pt} \quad \forall p \in P, \forall t \in T \quad (17)$$

$$I_{pt}^+, I_{pt}^-, x_{pt} \geq 0 \quad \forall p \in P, \forall t \in T \quad (18)$$

$$z, m \geq 0 \quad (19)$$

$$y_{pt}, w_{pt}, r_{pt} \in \{0,1\} \quad \forall p \in P, \forall t \in T \quad (20)$$

$$q_t \in \{0,1\} \quad \forall t \in T \quad (21)$$

A expressão (1) minimiza a função objetivo do problema, contemplando o custo de *setup*, o custo de estoque, o custo da falta do produto, custo do distribuidor e o custo da troca de molde. As equações em (2) e (3) são referentes ao atendimento da demanda. Na inequação (4) a soma dos tempos de *setup* e processamento dos produtos não pode exceder à capacidade. Em (5) e (6) faz com que o número de corridas realizadas pro distribuidor seja entre 6 e 14.

Em (7) é controlado o número de distribuidores utilizados durante o horizonte de planejamento. O conjunto de inequações de (8) a (11) controlam a preservação dos *setups*. Na equação (12) faz com que não tenha falta do produto ao final do período. Na inequação (13) a relação de precedência entre os aços devido ao fato de alguns aços sujarem a panela, limparem a panela ou exigirem a panela limpa. Em (14) limita o número de distribuidores utilizados. Em (15) é feita a contagem do número de moldes utilizados durante o horizonte de planejamento. Em (16) verifica se o aço p pode ter sua produção iniciada com a vida do molde atual, devido ao número de corridas já realizadas nesse molde. Em (17) faz com que o *setup* do aço p só possa ser feito se o molde tem um número de corridas que suporta a fabricação desse aço p . O domínio das variáveis é definido entre (18) e (21).

6 RESULTADO COMPUTACIONAL

6.1 Coleta e análise de dados

Inicialmente foram levantados todos os aços que são produzidos na aciaria da siderúrgica no estudo, nos últimos quatro anos, onde foi gerada uma lista com 137 aços diferentes, desses, alguns aços deixaram de ser feitos, dando origem a novos aços, e alguns foram feitos apenas em caráter experimental, sendo eliminados da lista e restando 124 aços diferentes sendo produzidos.

Foi pesquisada em um documento da norma de produção de aço, da própria empresa, onde são apresentadas todas as famílias de aços (definidas devido a restrições de qualidade), quais aços que poderiam ser feitas na mesma sequência. Mas esse documento encontrava-se desatualizado, onde não constavam alguns aços de criação recente. Foi feita uma conferência, e aqueles aços que não apareciam documentados a qual família pertenciam, foram pesquisados com conhecedores do processo da própria empresa. Definindo assim as 43 famílias de aços, divisão utilizada na empresa, assim como na Tabela 1.

Os nomes dos aços não serão apresentados, pois essa classificação é sigilosa para a empresa, e a sua divulgação pode gerar desvantagens em relação aos seus concorrentes.

Tabela 1 – Classificação dos aços em Famílias.

	Aço	Família		Aço	Família		Aço	Família
1	EA01 A	1	43	LB01 A	8	84	SB03 A	21
2	EA02 A	1	44	LB02 A	8	85	SB04 A	21
3	EB01 A	2	45	LB03 A	8	86	SB05 A	21
4	EB02 A	2	46	LC01 A	9	87	SC01 A	22
5	EB03 A	2	47	LC02 A	9	88	SC02 A	22
6	EB04 A	2	48	LC03 A	9	89	SC03 A	22
7	EB05 A	2	49	LC04 A	9	90	SC04 A	22
8	EB06 A	2	50	LD01 A	10	91	SD01 B	23
9	EB07 A	2	51	LE01 A	11	92	SD02 B	23
10	EB08 A	2	52	LF01 A	12	93	SE01 B	24
11	EB09 A	2	53	LF02 A	12	94	SE02 B	24
12	EB10 A	2	54	LF03 A	12	95	SF01 B	25
13	EB11 A	2	55	LG01 A	13	96	SG01 B	26
14	EB12 A	2	56	LG02 A	13	97	SG02 B	26
15	EB13 A	2	57	LG03 A	13	98	SG03 B	26
16	EB14 A	2	58	LH01 B	14	99	SG04 B	26
17	EB15 A	2	59	LH02 B	14	100	SH01 B	27
18	EB16 A	2	60	LH03 B	14	101	SI01 B	28
19	EC01 A	3	61	LH04 B	14	102	SJ01 B	29
20	EC02 A	3	62	LH05 B	14	103	SK01 B	30
21	EC03 A	3	63	LH06 B	14	104	SL01 B	31
22	EC04 A	3	64	LH07 B	14	105	SM01 B	32
23	EC05 A	3	65	LH08 B	14	106	SM02 B	32
24	EC06 A	3	66	LI01 B	15	107	SM03 B	32
25	EC07 A	3	67	LI02 B	15	108	SM04 B	32
26	EC08 A	3	68	LI03 B	15	109	SN01 C	33
27	EC09 A	3	69	LI04 B	15	110	SN02 C	33
28	EC10 A	3	70	LJ01 B	16	111	SN03 C	33
29	EC11 A	3	71	LK01 C	17	112	SO01 C	34
30	EC12 A	3	72	LK02 C	17	113	SO02 C	34
31	ED01 A	4	73	LL01 C	18	114	SP01 C	35
32	ED02 A	4	74	LM01 C	19	115	SQ01 C	36
33	ED03 A	4	75	SA01 A	20	116	SR01 C	37
34	ED04 A	4	76	SA02 A	20	117	SS01 C	38
35	ED05 A	4	77	SA03 A	20	118	ST01 C	39
36	ED06 A	4	78	SA04 A	20	119	ST02 C	39
37	EE01 A	5	79	SA05 A	20	120	SU01 C	40
38	EF01 C	6	80	SA06 A	20	121	SU02 C	40
39	LA01 A	7	81	SA07 A	20	122	SV01 C	41
40	LA02 A	7	82	SB01 A	21	123	SW01 C	42
41	LA03 A	7	83	SB02 A	21	124	SX01 C	43
42	LA04 A	7						

Fonte: Elaborado pelo autor.

Essas famílias foram classificadas de acordo com a demanda dos clientes externos e do laminador, em relação à quantidade que era necessitada pelos clientes durante os meses, e o quanto o aço era presente em diferente bitolas (grossura do fio máquina), pois, se o aço pudesse ser feito em várias bitolas, esse contribuiria para que o laminador não ficasse ocioso,

facilitando na programação do mesmo. Essas famílias de aços foram classificadas em A, B, C, onde as famílias que são classificadas como A, devem ser produzidos toda semana, os classificadas como B, a cada dez dias, e como C os aços que devem ser feitos a cada quinze dias, assim como na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação ABC dos aços.

	Aço	Família	Classificação ABC		Aço	Família	Classificação ABC		Aço	Família	Classificação ABC
1	EA01 A	1	A	43	LB01 A	8	A	84	SB03 A	21	A
2	EA02 A	1	A	44	LB02 A	8	A	85	SB04 A	21	A
3	EB01 A	2	A	45	LB03 A	8	A	86	SB05 A	21	A
4	EB02 A	2	A	46	LC01 A	9	A	87	SC01 A	22	A
5	EB03 A	2	A	47	LC02 A	9	A	88	SC02 A	22	A
6	EB04 A	2	A	48	LC03 A	9	A	89	SC03 A	22	A
7	EB05 A	2	A	49	LC04 A	9	A	90	SC04 A	22	A
8	EB06 A	2	A	50	LD01 A	10	A	91	SD01 B	23	B
9	EB07 A	2	A	51	LE01 A	11	A	92	SD02 B	23	B
10	EB08 A	2	A	52	LF01 A	12	A	93	SE01 B	24	B
11	EB09 A	2	A	53	LF02 A	12	A	94	SE02 B	24	B
12	EB10 A	2	A	54	LF03 A	12	A	95	SF01 B	25	B
13	EB11 A	2	A	55	LG01 A	13	A	96	SG01 B	26	B
14	EB12 A	2	A	56	LG02 A	13	A	97	SG02 B	26	B
15	EB13 A	2	A	57	LG03 A	13	A	98	SG03 B	26	B
16	EB14 A	2	A	58	LH01 B	14	B	99	SG04 B	26	B
17	EB15 A	2	A	59	LH02 B	14	B	100	SH01 B	27	B
18	EB16 A	2	A	60	LH03 B	14	B	101	SI01 B	28	B
19	EC01 A	3	A	61	LH04 B	14	B	102	SJ01 B	29	B
20	EC02 A	3	A	62	LH05 B	14	B	103	SK01 B	30	B
21	EC03 A	3	A	63	LH06 B	14	B	104	SL01 B	31	B
22	EC04 A	3	A	64	LH07 B	14	B	105	SM01 B	32	B
23	EC05 A	3	A	65	LH08 B	14	B	106	SM02 B	32	B
24	EC06 A	3	A	66	LI01 B	15	B	107	SM03 B	32	B
25	EC07 A	3	A	67	LI02 B	15	B	108	SM04 B	32	B
26	EC08 A	3	A	68	LI03 B	15	B	109	SN01 C	33	C
27	EC09 A	3	A	69	LI04 B	15	B	110	SN02 C	33	C
28	EC10 A	3	A	70	LJ01 B	16	B	111	SN03 C	33	C
29	EC11 A	3	A	71	LK01 C	17	C	112	SO01 C	34	C
30	EC12 A	3	A	72	LK02 C	17	C	113	SO02 C	34	C
31	ED01 A	4	A	73	LL01 C	18	C	114	SP01 C	35	C
32	ED02 A	4	A	74	LM01 C	19	C	115	SQ01 C	36	C
33	ED03 A	4	A	75	SA01 A	20	A	116	SR01 C	37	C
34	ED04 A	4	A	76	SA02 A	20	A	117	SS01 C	38	C
35	ED05 A	4	A	77	SA03 A	20	A	118	ST01 C	39	C
36	ED06 A	4	A	78	SA04 A	20	A	119	ST02 C	39	C
37	EE01 A	5	A	79	SA05 A	20	A	120	SU01 C	40	C
38	EF01 C	6	C	80	SA06 A	20	A	121	SU02 C	40	C
39	LA01 A	7	A	81	SA07 A	20	A	122	SV01 C	41	C
40	LA02 A	7	A	82	SB01 A	21	A	123	SW01 C	42	C
41	LA03 A	7	A	83	SB02 A	21	A	124	SX01 C	43	C
42	LA04 A	7	A								

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a classificação dos aços em relação à demanda, foi feita outra classificação: a dos aços que exigem a panela limpa, aços que limpam a panela e aços que sujam a panela.

O carbono fora da especificação é prejudicial ao aço e, por isso, o seu controle é importante. Alguns aços possuem limites de percentual de carbono mais toleráveis, por isso podem ser produzidos em qualquer momento, mas, depois de produzidos, deixam a panela “suja”, com alta faixa de carbono. Esses são os classificados como os que “sujam panela”.

Existem aços que podem ser produzidos em qualquer faixa de carbono, ou em qualquer momento, mas, após serem produzidos eles diminuem a porcentagem de carbono da panela, deixam a panela “limpa”. São os classificados como os que “limpam a panela”.

E, por fim, os aços que exigem a “panela limpa”, são os que possuem uma menor tolerância ao carbono, e por isso só podem ser feitos quando a panela está limpa (após uma sequência de aços que limpam ou uma sequência de aços que a exigem limpa).

Resumindo, a sequência de como os aços podem ser feitos é representada da seguinte maneira:

Aço	Amarelo	Verde	Vermelho
Amarelo	1	1	0
Verde	1	1	1
Vermelho	1	1	1

Amarelo	Aço que exige limpa
Verde	Aço que limpa
Vermelho	Aço que suja

Figura 12 – Sequências de aço.
Fonte: Elaborado pelo autor

Atribuindo valor 1, afirma-se que é possível produzir os aços representados nas linhas após os aços ditos nas colunas da tabela. Quando 0, não deve ser produzido o aço representado na linha após o que está na coluna. O ideal seria programar uma sequência com um aço que suja a panela, depois um que limpa e após um que exige limpa e assim sucessivamente, mas por restrições da demanda, não é viável.

Juntando as restrições do processo e a individualidade de cada família, dá-se origem a Tabela 3, que representa os aços agrupados por família e classificado pela sequência.

Tabela 3 – Classificação dos aços.

	Aço	Família	Classificação ABC		Aço	Família	Classificação ABC		Aço	Família	Classificação ABC
1	EA01 A	1	A	43	LB01 A	8	A	84	SB03 A	21	A
2	EA02 A	1	A	44	LB02 A	8	A	85	SB04 A	21	A
3	EB01 A	2	A	45	LB03 A	8	A	86	SB05 A	21	A
4	EB02 A	2	A	46	LC01 A	9	A	87	SC01 A	22	A
5	EB03 A	2	A	47	LC02 A	9	A	88	SC02 A	22	A
6	EB04 A	2	A	48	LC03 A	9	A	89	SC03 A	22	A
7	EB05 A	2	A	49	LC04 A	9	A	90	SC04 A	22	A
8	EB06 A	2	A	50	LD01 A	10	A	91	SD01 B	23	B
9	EB07 A	2	A	51	LE01 A	11	A	92	SD02 B	23	B
10	EB08 A	2	A	52	LF01 A	12	A	93	SE01 B	24	B
11	EB09 A	2	A	53	LF02 A	12	A	94	SE02 B	24	B
12	EB10 A	2	A	54	LF03 A	12	A	95	SF01 B	25	B
13	EB11 A	2	A	55	LG01 A	13	A	96	SG01 B	26	B
14	EB12 A	2	A	56	LG02 A	13	A	97	SG02 B	26	B
15	EB13 A	2	A	57	LG03 A	13	A	98	SG03 B	26	B
16	EB14 A	2	A	58	LH01 B	14	B	99	SG04 B	26	B
17	EB15 A	2	A	59	LH02 B	14	B	100	SH01 B	27	B
18	EB16 A	2	A	60	LH03 B	14	B	101	SI01 B	28	B
19	EC01 A	3	A	61	LH04 B	14	B	102	SJ01 B	29	B
20	EC02 A	3	A	62	LH05 B	14	B	103	SK01 B	30	B
21	EC03 A	3	A	63	LH06 B	14	B	104	SL01 B	31	B
22	EC04 A	3	A	64	LH07 B	14	B	105	SM01 B	32	B
23	EC05 A	3	A	65	LH08 B	14	B	106	SM02 B	32	B
24	EC06 A	3	A	66	LI01 B	15	B	107	SM03 B	32	B
25	EC07 A	3	A	67	LI02 B	15	B	108	SM04 B	32	B
26	EC08 A	3	A	68	LI03 B	15	B	109	SN01 C	33	C
27	EC09 A	3	A	69	LI04 B	15	B	110	SN02 C	33	C
28	EC10 A	3	A	70	LJ01 B	16	B	111	SN03 C	33	C
29	EC11 A	3	A	71	LK01 C	17	C	112	SO01 C	34	C
30	EC12 A	3	A	72	LK02 C	17	C	113	SO02 C	34	C
31	ED01 A	4	A	73	LL01 C	18	C	114	SP01 C	35	C
32	ED02 A	4	A	74	LM01 C	19	C	115	SQ01 C	36	C
33	ED03 A	4	A	75	SA01 A	20	A	116	SR01 C	37	C
34	ED04 A	4	A	76	SA02 A	20	A	117	SS01 C	38	C
35	ED05 A	4	A	77	SA03 A	20	A	118	ST01 C	39	C
36	ED06 A	4	A	78	SA04 A	20	A	119	ST02 C	39	C
37	EE01 A	5	A	79	SA05 A	20	A	120	SU01 C	40	C
38	EF01 C	6	C	80	SA06 A	20	A	121	SU02 C	40	C
39	LA01 A	7	A	81	SA07 A	20	A	122	SV01 C	41	C
40	LA02 A	7	A	82	SB01 A	21	A	123	SW01 C	42	C
41	LA03 A	7	A	83	SB02 A	21	A	124	SX01 C	43	C
42	LA04 A	7	A								

	Aços que exigem limpa
	Aços que limpam
	Aços que sujam

Fonte: Elaborado pelo autor.

Destacam-se os aços que precisam ser feitos com lingoteira nova, os quais devem ser produzidos com a vida de lingoteira menor que 250 corridas.

Tabela 4 – Aços que precisam ser feitos com a lingoteira nova.

	Aço	Família	Classificação ABC
37	EE01 A	5	A
55	LG01 A	13	A
56	LG02 A	13	A
57	LG03 A	13	A
96	SG01 B	26	B
97	SG02 B	26	B
98	SG03 B	26	B
99	SG04 B	26	B
100	SH01 B	27	B
101	SI01 B	28	B
102	SJ01 B	29	B
103	SK01 B	30	B
104	SL01 B	31	B
105	SM01 B	32	B
106	SM02 B	32	B
107	SM03 B	32	B
108	SM04 B	32	B
118	ST01 C	39	C
119	ST02 C	39	C
120	SU01 C	40	C
121	SU02 C	40	C
122	SV01 C	41	C
123	SW01 C	42	C
124	SX01 C	43	C

Fonte: Elaborado pelo autor.

Destacam-se também os aços que o número máximo de corridas não é igual a 14, os quais a sequência possui número máximo de corrida igual ao número da Tabela 5.

Tabela 5 – Número máximo de corridas diferente de 14.

	Aço	Família	Máximo de corridas
37	EE01 A	5	13
38	EF01 C	6	6
104	SL01 B	31	7
105	SM01 B	32	8
106	SM02 B	32	8
107	SM03 B	32	8
108	SM04 B	32	8

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para facilitar na elaboração do modelo, uma nova classificação é proposta, levando em conta as características semelhantes das famílias nas classificações anteriores: demanda, se exige limpa, suja ou limpa a panela, e em qual tempo de vida da lingoteira à família pode ser feita, além de considerar o número máximo de corridas que podem ser feitas em sequência.

Por exemplo, se duas famílias de aço exigem que a panela esteja limpa para serem produzidas, se classificação por demanda das duas é A e, se as duas não são restritas em relação ao molde, então essas serão, segundo a nova classificação proposta apenas no trabalho, como uma nova família. Assim como foi feito com a família 1, 2, 3 e 4, da Tabela 1, serão classificadas como uma mesma família por apresentarem semelhanças.

A nova classificação foi pensada e melhor explicada de acordo com a Tabela 6. As famílias 31 e 32 por possuírem número máximo de corridas muito próximos, serão classificadas como a mesma família, e número máximo de corrida igual a 8.

Tabela 6 – Explicação da classificação das famílias.

Família antiga	ABC	Sequência	Lingoteira nova	Máximo de corridas	Nova Família
1	A	Exige limpa			1
2	A	Exige limpa			
3	A	Exige limpa			
4	A	Exige limpa			
5	A	Exige limpa	X	13	2
6	C	Exige limpa		6	3
7	A	Limpa			4
8	A	Limpa			
9	A	Limpa			
10	A	Limpa			
11	A	Limpa			
12	A	Limpa			
13	A	Limpa	X		5
14	B	Limpa			6
15	B	Limpa			
16	B	Limpa			
17	C	Limpa			7
18	C	Limpa			
19	C	Limpa			
20	A	Suja			8
21	A	Suja			
22	A	Suja			
23	B	Suja			9
24	B	Suja			
25	B	Suja			
26	B	Suja	X		10
27	B	Suja	X		
28	B	Suja	X		
29	B	Suja	X		
30	B	Suja	X		
31	B	Suja	X	7	11
32	B	Suja	X	8	
33	C	Suja			12
34	C	Suja			
35	C	Suja			
36	C	Suja			
37	C	Suja			
38	C	Suja			
39	C	Suja	X		13
40	C	Suja	X		
41	C	Suja	X		
42	C	Suja	X		
43	C	Suja	X		

Fonte: Elaborado pelo autor.

O estudo que antes contava com 43 famílias, após essa nova classificação, contará com 13 famílias, representado na Tabela 6. Com a representação de quais aços são classificados em cada família.

Tabela 7 – Nova classificação das famílias de aço.

	Aço	Família antiga	Nova família
1	EA01 A	1	1
2	EA02 A	1	1
3	EB01 A	2	1
4	EB02 A	2	1
5	EB03 A	2	1
6	EB04 A	2	1
7	EB05 A	2	1
8	EB06 A	2	1
9	EB07 A	2	1
10	EB08 A	2	1
11	EB09 A	2	1
12	EB10 A	2	1
13	EB11 A	2	1
14	EB12 A	2	1
15	EB13 A	2	1
16	EB14 A	2	1
17	EB15 A	2	1
18	EB16 A	2	1
19	EC01 A	3	1
20	EC02 A	3	1
21	EC03 A	3	1
22	EC04 A	3	1
23	EC05 A	3	1
24	EC06 A	3	1
25	EC07 A	3	1
26	EC08 A	3	1
27	EC09 A	3	1
28	EC10 A	3	1
29	EC11 A	3	1
30	EC12 A	3	1
31	ED01 A	4	1
32	ED02 A	4	1
33	ED03 A	4	1
34	ED04 A	4	1
35	ED05 A	4	1
36	ED06 A	4	1
37	EE01 A	5	2
38	EF01 C	6	3
39	LA01 A	7	4
40	LA02 A	7	4
41	LA03 A	7	4
42	LA04 A	7	4

	Aço	Família antiga	Nova família
43	LB01 A	8	4
44	LB02 A	8	4
45	LB03 A	8	4
46	LC01 A	9	4
47	LC02 A	9	4
48	LC03 A	9	4
49	LC04 A	9	4
50	LD01 A	10	4
51	LE01 A	11	4
52	LF01 A	12	4
53	LF02 A	12	4
54	LF03 A	12	4
55	LG01 A	13	5
56	LG02 A	13	5
57	LG03 A	13	5
58	LH01 B	14	6
59	LH02 B	14	6
60	LH03 B	14	6
61	LH04 B	14	6
62	LH05 B	14	6
63	LH06 B	14	6
64	LH07 B	14	6
65	LH08 B	14	6
66	LI01 B	15	6
67	LI02 B	15	6
68	LI03 B	15	6
69	LI04 B	15	6
70	LJ01 B	16	6
71	LK01 C	17	7
72	LK02 C	17	7
73	LL01 C	18	7
74	LM01 C	19	7
75	SA01 A	20	8
76	SA02 A	20	8
77	SA03 A	20	8
78	SA04 A	20	8
79	SA05 A	20	8
80	SA06 A	20	8
81	SA07 A	20	8
82	SB01 A	21	8
83	SB02 A	21	8

	Aço	Família antiga	Nova família
84	SB03 A	21	8
85	SB04 A	21	8
86	SB05 A	21	8
87	SC01 A	22	8
88	SC02 A	22	8
89	SC03 A	22	8
90	SC04 A	22	8
91	SD01 B	23	9
92	SD02 B	23	9
93	SE01 B	24	9
94	SE02 B	24	9
95	SF01 B	25	9
96	SG01 B	26	10
97	SG02 B	26	10
98	SG03 B	26	10
99	SG04 B	26	10
100	SH01 B	27	10
101	SI01 B	28	10
102	SJ01 B	29	10
103	SK01 B	30	10
104	SL01 B	31	11
105	SM01 B	32	11
106	SM02 B	32	11
107	SM03 B	32	11
108	SM04 B	32	11
109	SN01 C	33	12
110	SN02 C	33	12
111	SN03 C	33	12
112	SO01 C	34	12
113	SO02 C	34	12
114	SP01 C	35	12
115	SQ01 C	36	12
116	SR01 C	37	12
117	SS01 C	38	12
118	ST01 C	39	13
119	ST02 C	39	13
120	SU01 C	40	13
121	SU02 C	40	13
122	SV01 C	41	13
123	SW01 C	42	13
124	SX01 C	43	13

Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma nova tabela é elaborada, onde se apresentam as famílias de aço e quais podem ser predecessores dos outros ou não. Atribuindo valor 1, afirma-se que é possível produzir os aços representados nas linhas após os aços ditos nas colunas da tabela. Quando 0, não deve ser produzido não deve ser produzido o aço representado na linha após o que está na coluna. Para essa tabela já foi levado em conta a nova classificação proposta de 13 famílias para o estudo.

Tabela 8 – Sequência de aço.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
3	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fonte: Elaborada pelo autor.

Até aqui, toda organização proposta com os dados foi para deixar as famílias de aços que se comportamentos de maneira parecida juntas, para facilitar a modelagem do problema, pois se trabalha com menos dados, 13 famílias ao invés das 43 iniciais. Quanto menor a quantidade de dados, mais fácil a formulação do modelo.

6.1.1 Horizonte de planejamento

Como é um processo contínuo, o que define a velocidade com que uma corrida é lingotada é a velocidade com a qual ele passa pelo MLC, que é o limitante dessa produção.

No mesmo levantamento dos aços produzidos, consta também a velocidade na qual o aço foi produzido e qual a velocidade visada, que consta na norma que define como ele deveria ser produzido. Levando em conta essas duas velocidades de lingotamento, foram feitas duas médias ponderadas, levando em consideração a demanda de cada aço para saber o quanto um aço impactava nessa média, uma com a velocidade real e a outra com a velocidade visada, as médias encontradas foram de 2,224 e 2,223 metros lingotados a cada minuto respectivamente. Como são velocidades muito parecidas é feita uma aproximação, e uma simplificação do modelo, para que as velocidades de todos os aços sejam a mesma, então, é adotada a média da velocidade real de 2,224 metros/minuto, como a velocidade de lingotamento para todos os aços.

Essa velocidade informa que, a cada minuto, 2,224 metros de tarugo passam pela máquina de lingotamento contínuo. O tarugo tem o tamanho de 12 m e pesa 2,2 toneladas na maioria dos casos e, como já definido e adotado no trabalho. Como já informado, cada corrida

tem 125 toneladas aproximadamente, o que resulta em 57 tarugos por corrida, como os veios, caminho por onde passa o aço que depois de resfriado dará origem ao tarugo, são seis, cada veio recebe 9,5 tarugos por corrida, um número não inteiro, mas que será considerado assim para efeito de cálculo. Como não é feita somente uma corrida na sequência, esse número tende a ficar inteiro por veio. Como cada tarugo tem 12 m, por corrida passa por cada veio 114 m, fazendo com que o tempo de uma corrida seja de 51,07 minutos.

Nesse tempo está levando em consideração o tempo de junção, que é emendar o final de uma corrida no início da outra, isso acontece com aços de sequência diferentes, pois aços da mesma família, simplesmente passam pelo distribuidor se misturando a cada panela despejada no mesmo. O tempo que se gasta para fazer a junção é de 7,47 minutos, a forma que esse tempo foi encontrado é explicado a seguir. Então o tempo exato de uma corrida é de 44,23 minutos.

Para definir o horizonte de planejamento, é adotado um mês de 30 dias em que, inicialmente, a produção é ininterrupta. Como um dia tem 24 horas, 1.440 minutos, um mês possui 43.200 minutos, é possível produzir aproximadamente em um dia 28,19 corridas e 845 corridas por mês.

A aciaria funcionaria a todo instante se não fossem as paradas que causam as perdas de produção. As paradas são divididas em três: acidental, programada e improdutiva. Paradas acidentais são aquelas que não agregam ao processo e não estão planejadas, são aquelas que devem ser evitadas, mas acontecem acidentalmente durante um mês de operação, o tempo total delas em média é de 1.201 minutos, ou seja, 2,78% de perda de tempo produtivo por mês referente a esse tipo de parada. Paradas programadas são aquelas já definidas previamente e que devem acontecer para um melhor funcionamento da aciaria, acontece uma vez por mês e é para manutenção da aciaria, leva em média 1.700 minutos, ou seja, 3,94% de perda por mês referente a esse tipo de parada. Geralmente essa parada acontece em conjunto com a parada do alto forno, pois quando o alto forno para, conseqüentemente, a aciaria para pela falta de ferro gusa, então as paradas são programadas para o mesmo dia, o que gera uma economia para empresa, evitando que a aciaria pare mais de uma vez durante o mês e que o alto forno jogue ferro gusa fora, o que acontece quando a aciaria para e o alto forno não. Paradas improdutivas são aquelas que devem acontecer, mas não agregam nada ao processo, geralmente são os tempos gastos na perda pela junção. Como a emenda do final de uma sequência ao começo da próxima já foi desconsiderada do tempo total da corrida no parágrafo anterior, só é calculado o tempo de troca de molde, o tempo total da soma destas paradas e de, em média, 578 minutos, sendo 289 minutos por troca de molde, já que geralmente acontecem

duas durante o mês, ou seja, 1,34% de perda por mês referente a esse tipo de parada. Os dados apresentado anteriormente correspondem a uma média de todas as paradas da aciaria durante um ano.

Portanto, para um mês, num horizonte de planejamento possível, devem ser desconsiderados 2.479 minutos, ou 8,05% da disponibilidade. O que deixa o horizonte de planejamento com 3.971 minutos por mês e média de aproximadamente 1.324 minutos por dia. Logo a quantidade de corridas que podem ser produzidas é de aproximadamente 778 corridas em um mês e 26 corridas por dia.

6.1.2 Demanda

A demanda apresentada nesse trabalho corresponde a uma demanda real de um mês qualquer, indicando quais aços devem ser programados na aciaria. Para alguns aços demandados, os tarugos são comprados de terceiros, caso de aços mais simples e que a produção não agrega tanto valor, pois são produzidos por meio de processos simples e de baixa rentabilidade econômica para a usina siderúrgica estudada, podendo ser comprados de concorrentes sem o menor problema. Esses aços já foram retirados da lista, então na Tabela 4 estão apresentados os aços que devem ser programados para serem produzidos na aciaria.

Tabela 9 – Demanda de aços.

Aço	Demanda (ton)	Demanda (cor)
EA01 A	250	2
EA02 A	3250	26
EB01 A	6500	52
EC01 A	375	3
EC02 A	1375	11
EC03 A	625	5
EC04 A	3750	30
EC05 A	880	11
EC06 A	2750	22
EC07 A	3875	31
EC08 A	3250	26
EC09 A	0	0
EC10 A	0	0
EC11 A	0	0
EC12 A	0	0
EC13 A	0	0
EC14 A	0	0
EC15 A	0	0
EC16 A	0	0
ED01 A	875	7
ED02 A	0	0
ED03 A	2000	16
ED04 A	0	0
ED05 A	0	0
ED06 A	500	4
ED07 A	0	0
ED08 A	0	0
ED09 A	625	5
ED10 A	500	4
ED11 A	0	0
ED12 A	1000	8
EE01 A	1250	10
EE02 A	0	0
EE03 A	0	0
EE04 A	0	0
EE05 A	375	3
EE06 A	125	1
EF01 C	750	6
LA01 A	500	4
LA02 A	1000	8
LA03 A	0	0
LB01 A	1625	13

Aço	Demanda (ton)	Demanda (cor)
LB02 A	0	0
LB03 A	0	0
LB04 A	0	0
LC01 A	1375	11
LC02 A	0	0
LC03 A	0	0
LD01 A	4875	39
LD02 A	0	0
LD03 A	0	0
LD04 A	0	0
LE01 A	2250	18
LF01 A	1500	12
LG01 A	0	0
LG02 A	0	0
LG03 A	0	0
LH01 B	0	0
LH02 B	0	0
LH03 B	0	0
LH04 B	0	0
LH05 B	2500	20
LH06 B	0	0
LH07 B	0	0
LH08 B	0	0
LI01 B	250	2
LI02 B	1000	8
LI03 B	0	0
LI04 B	0	0
LJ01 B	750	6
LK01 C	750	6
LK02 C	1875	15
LL01 C	0	0
LM01 C	0	0
SA01 A	0	0
SA02 A	3375	27
SA03 A	1375	11
SA04 A	3250	26
SA05 A	125	1
SA06 A	3000	24
SA07 A	125	1
SB01 A	0	0
SB02 A	0	0

Aço	Demanda (ton)	Demanda (cor)
SB03 A	2500	20
SB04 A	375	3
SB05 A	0	0
SC01 A	0	0
SC02 A	2000	16
SC03 A	0	0
SC04 A	0	0
SD01 B	375	3
SD02 B	125	1
SD03 B	250	2
SD04 B	1000	8
SE01 B	250	2
SE02 B	2000	16
SE03 B	375	3
SE04 B	375	3
SF01 B	875	7
SF02 B	375	3
SG01 B	1000	8
SG02 B	1500	12
SH01 B	2500	20
SI01 B	750	6
SJ01 B	1250	10
SK01 B	1500	12
SL01 B	3000	24
SM01 B	1250	10
SN01 C	750	6
SN02 C	125	1
SN03 C	0	0
SO01 C	0	0
SO02 C	0	0
SP01 C	0	0
SP02 C	0	0
SQ01 C	250	2
SQ02 C	750	6
SR01 C	750	6
SS01 C	750	6
ST01 C	1000	8
SU01 C	750	6
SV01 C	0	0
SW01 C	0	0
SX01 C	0	0

Fonte: Elaborada pelo autor com os dados coletados.

Na demanda estudada, se necessita de um total de 95,13 mil toneladas de fio máquina, produto final que o tarugo da origem, ou seja, 765 corridas, trabalhando com números para a aciaria.

6.2 Teste computacional

Os dados que deram entrada para modelar esse problema foram:

Tabela 10 – Custo da precedência.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	1	1	1	1	1	1	99	99	99	99	99	99	99	99
2	1	1	1	1	1	1	99	99	99	99	99	99	99	99
3	1	1	1	1	1	1	99	99	99	99	99	99	99	99
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fonte: Elaborada pelo autor.

Atribuindo valor 1, afirma-se que é possível produzir os aços representados nas linhas após os aços ditos nas colunas da tabela. Quando 99, não deve ser produzido após, já que indica um custo de produção muito alto.

Tabela 11 – Demanda por semana.

Família de aço	Demanda por semana			
	1	2	3	4
1	13	13	13	13
2	57	56	57	55
3	3	0	3	0
4	27	26	27	25
5	12	12	0	12
6	11	0	10	0
7	33	32	33	31
8	5	5	0	4
9	8	8	0	8
10	18	18	0	18
11	16	16	0	14
12	4	4	0	4
13	12	0	11	0
14	9	0	9	0

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 6 é apresentada a demanda de cada família de aço por semana, levando em conta a classificação pela demanda, dos aços que devem ser produzidos toda semana, 10 em 10 dias e de 15 em 15 dias.

Define-se que não existe nenhum estoque ou falta de nenhum produto inicialmente, o horizonte de produção é definido como muito maior que o real, para esse não ser um limitante durante a produção.

Alguns aços, por apresentarem uma maior importância econômica para empresa, devem estar relacionados a uma maior penalização caso os mesmos não sejam produzidos.

Nesse caso, os aços das famílias 1, 2 e 3, são os aços que, caso não produzidos, recebem uma maior penalização no modelo, por isso são prioridades na produção.

6.3 Discussão dos resultados

Como já explicado, cada aço tem suas respectivas características de como deve ser feito, qual aço deve ser seu predecessor.

O modelo foi implementado no *software* livre de otimização GNU GLPK 4.8. O software busca os dados, faz iterações até encontrar a solução ótima e, em seguida, apresenta os resultados em um novo documento do bloco de notas. Os testes foram realizados em um computador com processador Intel Celeron Dual-Core T1400 com velocidade 1.73 GHz, memória de 1,75 GB de RAM e 112 GB de HD com sistema operacional Windows XP versão 5.1, *Service Pack 3*.

Pode-se perceber, após analisar do os resultados do modelo que ele não atingiu algumas restrições por completo.

Nenhum produto foi feito a mais, portanto não houve estoque, mas em compensação nem todos os produtos foram feitos, logo alguns pedidos ficam em atraso. Os produtos que apresentaram maior atraso ou falta foram as famílias que possuíam uma maior demanda de aços.

Tabela 12 – Porcentagem da demanda atendida.

FAMÍLIA DE AÇO	DEMANDA	FALTA	% ATENDIDA
1	52	46	12%
2	225	219	3%
3	6	0	100%
4	105	99	6%
5	36	30	17%
6	21	15	29%
7	129	123	5%
8	14	8	43%
9	24	18	25%
10	54	48	11%
11	46	40	13%
12	12	6	50%
13	23	17	26%
14	18	12	33%

Fonte: Elaborada pelo autor.

O que se pode perceber é que, quanto maior a demanda, mais difícil de atender, as famílias 2, 4 e 7 são as que possuem uma maior demanda, e as que menos foram atendidas. Mesmo a família 2 sendo usado um custo de penalização.

Outro problema é que o tamanho dos lotes não foi atendido, o tamanho do lote de produção era produzir entre 6 e 14 corridas, todas as corridas feitas em dupla ou sozinha. Com a produção ficando ordenada da seguinte maneira, conforme Figura 13:

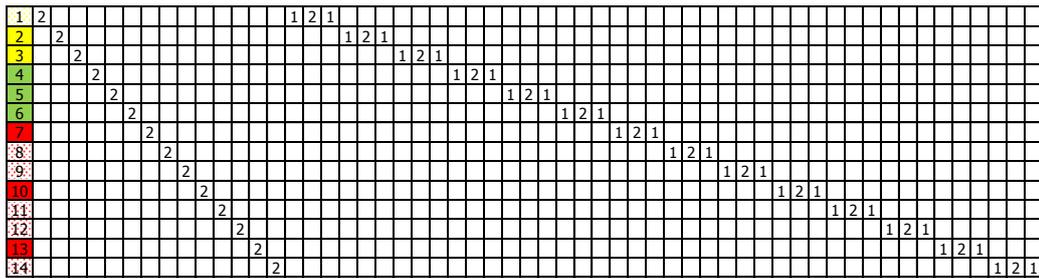


Figura 13 – Sequência de produção.
Fonte: Elaborada pelo autor

Onde na primeira coluna estão apresentadas as famílias de aços e no restante das colunas as quantidades de corridas que devem ser produzidas. Pode-se observar também que a relação de precedência não foi obedecida, pois, quando a família 14 é feita não poderia ser feito em sequência a família 1, o que acontece quando a primeira sequência de 1-2-1 é feita, repetindo a produção da família 1, assim apresentando na tabela acima.

O número de misturadores utilizados foi de 42, um bom número se analisado separadamente, mas não quer dizer muita coisa, já que a uma parte muito pequena da carteira que foi feita, e pela proporção de corridas que foi feito, esse número então fica muito alto.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como tema o problema de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção, que é de grande interesse empresarial, visto que são assuntos abordados separadamente pela literatura e de forma unida pela prática, por isso, apresenta algumas falhas, não gerando assim, uma carteira de produção como esperado.

O assunto proposto no trabalho ainda é pouco explorado, pois não foi encontrado durante a pesquisa nada que relaciona o tema de dimensionamento e sequenciamento de lotes com a produção de aços, sendo assim, um tema que merece maior aprofundamento tanto na bibliografia quanto pela implementação prática.

Durante a realização do trabalho o problema real foi estudado, relacionando um problema bastante utilizado na literatura e nem tanto na prática, por isso foi pesquisado modelos de outros tipos de problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes, para assim construir um modelo adequado, a fim de atender os requisitos da aciaria, onde alguns pontos foram adaptados.

O trabalho sendo justificado, ao final foi desenvolvido um modelo de sequenciamento de lotes multiníveis com *setup* dependente da sequência, que atendeu a todos os requisitos que foram propostos, como: minimizar as trocas de distribuidor e de molde, minimizou os atrasos, fez todos os aços planejados obedecendo as restrições de cada um e, ao final, atendeu a demanda dos clientes de maneira satisfatória, se pensar somente no que foi proposto enquanto aciaria, pois o cliente só ficará atendido quando o fio máquina lhe for entregue, e isso não foi contemplado no trabalho.

A sequência encontrada ao final pode ser considerada viável, já que todas as restrições de produção foram respeitadas, portanto é uma sequência possível de ser feita.

O tempo gasto, para implementar o modelo, considerado razoável, já que durante esse período quem trabalha é a máquina, e o responsável pelo planejamento pode executar outra função enquanto o modelo está otimizando. O tempo que se gasta é somente com o responsável dando entrada com os dados, e se comparado com o tempo que era gasto, se todo o planejamento fosse desenvolvido de maneira manual, ainda é muito menor, gerando uma economia de tempo e esforço. Um ponto que deve ser destacado é que esses dados devem ser atualizados mensalmente já que se trata de demanda variável ao longo dos meses.

A solução viável encontrada pelo modelo atendeu as expectativas desse trabalho, algumas dificuldades durante a elaboração do modelo foram encontradas, mas o que já era esperado devido a sua complexidade, já que possui muitas restrições e de difícil

implementação. Como se tratava de um trabalho acadêmico, nenhum resultado devia ser apresentado à empresa, por isso o principal ganho que se pode ter foi o acadêmico, levando em conta as contribuições de aprendizado.

Para trabalhos futuros seria interessante levar em conta as restrições da trefilação, e assim gerar um modelo mais completo em que todas as necessidades da empresa fossem atendidas. Já que para esse trabalho foram levadas em conta somente as restrições da aciaria.

Outro ponto que é importante levar para um trabalho futuro é a se falta de gusa pode ocorrer, pois com essa minimização de tempos, pode acontecer do alto forno não ser suficiente para abastecer a aciaria, pois esse possui uma produção limitada, e pode influenciar em uma produção que demandar de maior quantidade de ferro gusa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, S. A. **Modelos e métodos para o planejamento e programação da produção aplicados no setor de fundições**. 2003. 135 f. Tese (Doutorado em Ciências de Computação e Matemática Computacional). Universidade de São Paulo, São Carlos 2003.

ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSI, H. **Pesquisa Operacional**. 5. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2007.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, 22 (2), p 241-264, 2002.

CORRÊA, H. L.; CORRÊA, GIANESI, I. G. N. CAON, M. **Planejamento, programação e controle da produção: MRP II / ERP conceitos, uso e implantação**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2001.

FERREIRA, D. **Abordagens para o problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes da produção de bebidas**. 2007. 247 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

FRACALOSSI, E. C. J. **Desenvolvimento do modelo de sopro dinâmico e bloqueios de segurança usando a análise de gás on-line dos convertedores da AM Monlevade**. 2013. 64 f. Tese (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

FORBES, J.; BAHL-SCHNEIDER, U. **Metals Deals - Forging Ahead 2015 outlook and 2014 review**. 2015 - disponível em < www.pwc.com.br>. Acessado em 10/05/2015.

GAITHER, N.; FRAZIER, G. **Administração da produção e operações**. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2008.

GOLDBARG, M. C; LUNA, H. P. L. **Otimização Combinatória e Programação Linear**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

INSTITUTO AÇO BRASIL – disponível em <
<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/index.asp>>. Acessado em 01/09/2014.

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa operacional** na tomada de decisões. 4.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

MACHADO, R.G.N. **Dimensionamento de lotes de produção, estocagem e transporte ao longo de uma cadeia de suprimentos geral multiestágio, sujeita a restrições de capacidade de produção**. 2003. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas). Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2001.

MARTINS, Petrônio G. e LAUGENI, Fernando P. **Administração da Produção**. 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2006.

MORABITO, R.; PUREZA, V. **Modelagem e Simulação**. Em: Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações. P. C. Miguel (ed.). 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

TAHA, H. A. Pesquisa Operacional. 8. ed. São Paulo. Pearson Prentice Hall, 2008.

TOLEDO, C.; FRANÇA, P.M.; MORABITO, R. **Proposta de um modelo conjunto de programação da produção e dimensionamento de lotes à uma indústria de bebidas**. Não publicado. Unicamp. 2002.

TOSO, E.A.V. **Dimensionamento e seqüenciamento de lotes de produção na indústria de suplementos para nutrição animal**. 2008. 191 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008.

VALIÑO, R. Siderurgia no Brasil. 2009 - disponível em < www.pwc.com.br>. Acessado em 10/05/2015.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE PESQUISA OPERACIONAL - SOBRAPO. **Pesquisa Operacional** - <<http://www.sobrapo.org.br>>. Acessado em 10/05/2015.

APÊNDICES

APÊNDICE A

```

set P;                                # Produtos

set T;                                # Períodos de planejamento

set H{t in T};                         # Micro períodos de planejamento

param s{p in P, q in P};               # Custo de setup

param hh{p in P};                     # Custo de estoque

param d{p in P, t in T};               # Demanda do produto p no período t

param Iomais{p in P};                  # Estoque inicial do produto p

param Iomenos{p in P};                 # Falta inicial do produto p

param sp{p in P};                      # Tempo de setup do produto p

param b{p in P};                       # Tempo gasto para processamento de uma
corrida de p

param C{t in T};                       # Tempo disponível para produção no
período t

param a{i in P, j in P};               # 1, se o aço i pode ser feito depois do
aço j devido às restrições de panela limpa ou suja e, 0 caso
contrário

param k;                                # Número máximo de distribuidores que
podem ser usados durante o horizonte de planejamento

param m0;                               # Quantidade de corridas já realizadas no
molde no início do horizonte de planejamento

```

```

param g{p in P};          # 1, se o produto p precisa ser feito até
206 corridas realizadas com o molde e 0, caso contrário

param alfa;

param beta;

param delta{p in P};

var y{p in P, t in T, h in H[t]} >= 0, binary;

var Imais{p in P, t in T} >= 0;      # Estoque do produto p ao final
do período t

var Imenos{p in P, t in T} >= 0;    # Falta do produto p ao final do
período t

var x{p in P, t in T, h in H[t]} >= 0;

var m >= 0, integer;                # Quantidade de moldes trocados
durante o horizonte de planejamento

var r{p in P, t in T, h in H[t]} >= 0, binary; # 1, se o setup para
o produto p pode ser feito no período t em função do número de
corridas já realizadas com o molde e 0, caso contrário

var z{t in T, h in H[t]} >= 0;

var vvv{t in T, h in H[t]} >= 0;

minimize fo: sum{p in P, q in P, t in T, h in H[t]} s[p,q]*y[p,t,h]
+ sum{p in P, t in T} hh[p]*Imais[p,t] + sum{p in P, t in T}
delta[p]*Imenos[p,t] + sum{p in P, t in T, h in H[t]} alfa*y[p,t,h]
+ beta*m + sum{t in T, h in H[t]} vvv[t,h];

s.t. R1a{p in P, t in T: t = 1}: Imais[p,t] - Imenos[p,t] =
Iomais[p] - Iomenos[p] + sum{h in H[t]} x[p,t,h] - d[p,t];

```

```

s.t. R1b{p in P, t in T: t > 1}: Imais[p,t] - Imenos[p,t] =
Imais[p,t-1] - Imenos[p,t-1] + sum{h in H[t]} x[p,t,h] - d[p,t];

s.t. R2{p in P, t in T, h in H[t]}: b[p]*x[p,t,h] <= C[t]*y[p,t,h];

s.t. R3{t in T}: sum{p in P, h in H[t]} b[p]*x[p,t,h] <= C[t];

s.t. R4{p in P, t in T, h in H[t]}: x[p,t,h] >= 6*y[p,t,h];

s.t. R5{p in P, t in T, h in H[t]}: x[p,t,h] <= 14*y[p,t,h];

s.t. R6{t in T, h in H[t]}: sum{p in P} y[p,t,h] <= 1;

# Número máximo de distribuidores que podem ser utilizados

s.t. R7: sum{p in P, t in T, h in H[t]} y[p,t,h] <= k;

# Restrições de troca do molde

# Conta o número de moldes usados durante o horizonte de
planejamento

#s.t. R8: m0 + sum{p in P, t in T, h in H[t]} x[p,t,h] <= 436*m;

# Verifica se o aço p pode ser iniciado com o molde atual, devido ao
número de corridas já realizadas nesse molde

#s.t. R9{p in P, t in T, h in H[t]}: 436*m - (m0 + sum{i in P, f in
T, j in H[f]} x[i,f,j]) <= g[p]*r[p,t,h]; ##### (lado
direito está igual a zero ou um)

# O setup para um produto p só pode ser feito se o molde tem um
número de corridas que suporte a fabricação desse aço p

#s.t. R10{p in P, t in T, h in H[t]}: y[p,t,h] <= r[p,t,h];

s.t. R11{p in P, t in T: t = 4}: Imenos[p,t] = 0;

#s.t. R12{t in T, h in H[t]}: sum{p in P, j in T, f in H[j]: j <= t
&& f <= h} x[p,j,f] = z[t,h];

#s.t. R13{p in P, t in T, h in H[t]}: 206*vvv[t,h] >= z[t,h];

```

#s.t. R14{p in P, t in T, h in H[t]: g[p] = 1}: ### Quando g[p] = 1, é necessário verificar se a idade do molde comporta a produção do aço p

end;