

**UFPB - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO
CCT /DEP/PPGEP**

BRUNO GOMES CUNHA

**OTIMIZAÇÃO NO DIMENSIONAMENTO E
SEQUENCIAMENTO DE LOTES DE PRODUÇÃO:
ESTUDO DE CASO EM UMA FÁBRICA DE BLOCOS
PRÉ-MOLDADOS DE CONCRETO.**

João Pessoa - PB
Agosto 2013

UFPB - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO
CCT /DEP/PPGEP

BRUNO GOMES CUNHA

OTIMIZAÇÃO NO DIMENSIONAMENTO E
SEQUENCIAMENTO DE LOTES DE PRODUÇÃO:
ESTUDO DE CASO EM UMA FÁBRICA DE BLOCOS
PRÉ-MOLDADOS DE CONCRETO.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção (PPGEP), como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Federal da Paraíba – UFPB.

Área de concentração: Aplicações de Modelos de Otimização em Sistemas de Produção

Orientador: Prof. Dr. Roberto Quirino do Nascimento - UFPB

João Pessoa - PB
Agosto 2013

p Cunha, Bruno Gomes
Otimização no Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes de
Produção: Estudo de Caso em uma Fábrica de Blocos Pré-
moldados de Concreto. / Bruno Gomes Cunha.- João Pessoa,
2013.

55f. : il.

Orientador: Roberto Quirino do Nascimento

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) Centro
de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba –UFPB/CT.

1. Otimização. 2. Dimensionamento e sequenciamento de lotes.
3. Métodos exatos. 4. Estoques. 5. Demanda determinística. 5.
Blocos pré-moldados. 6. Pesquisa Operacional.

UFPB/BC

CDU: : . ()

BRUNO GOMES CUNHA

**OTIMIZAÇÃO NO DIMENSIONAMENTO E SEQUENCIAMENTO
DE LOTES DE PRODUÇÃO: ESTUDO DE CASO EM UMA FÁBRICA
DE BLOCOS PRÉ-MOLDADOS DE CONCRETO.**

Dissertação apresentada e aprovada em 30 de agosto de 2013, ao Programa de Pós -
Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal da Paraíba, pela banca
examinadora formada pelos professores.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Roberto Quirino do Nascimento
Orientador/UFPB

Prof. Lucídio dos Anjos Formiga Cabral
Examinador interno/UFPB

Prof^a. Ana Flávia Uzeda dos Santos Macambira
Examinador externo ao Programa/UFPB

Prof. Rodrigo José Guerra Leone
Examinador externo/UnP

Dedico esta conquista aos meus pais e meus irmãos, a minha esposa Mirella e ao meu filho Nicolás que mesmo ainda no ventre de sua mãe já nos é fonte de alegria, de inspiração e motivo pelo qual louvamos a Deus.

AGRADECIMENTOS:

Agradeço a Deus todo poderoso por me conceder a graça e o dom da vida, sabedoria e saúde necessárias para alcançar todos os meus objetivos de vida; sem Ele eu nada seria, nada faria, e nada alcançaria.

Agradeço aos meus pais por terem se dedicado na minha criação e por terem investido todo o seu esforço nos meus estudos e formação profissional; aos meus irmãos que ajudaram aos meus pais a cuidarem da minha formação até o início da minha jornada profissional.

A minha amada e virtuosa esposa Mirella Colbert por estar sempre ao meu lado, me apoiando e incentivando na busca por esta e outras tantas conquistas; e ao meu filho Nicolás que mesmo ainda no ventre de sua mãe já nos é fonte de alegria, de inspiração e motivo pelo qual louvamos a Deus.

Ao Professor Josemar por ter me ajudado na decisão e busca de um orientador para o meu projeto de pesquisa, e que com sua generosa disponibilidade me abriu as portas para a busca contínua do conhecimento e aperfeiçoamento acadêmico.

Ao professor Roberto Quirino por ter me conduzido neste trabalho, mostrando os caminhos, as pessoas, e os recursos que trariam êxito na conclusão deste trabalho de pesquisa.

Aos professores Lucídio e Ana Flávia que na banca de qualificação trouxeram excelentes acréscimos, com correções e sugestões valiosíssimas, lapidando ainda mais este trabalho.

Aos novos e generosos amigos Professor Gilberto e o aluno de computação Lettyeri que dedicaram boa parte do seu tempo e conhecimento me ajudando na conclusão deste trabalho de pesquisa em sua reta final de compilação dos dados e resultados computacionais.

A todos os professores e alunos do PPGEP que de forma direta ou indireta fizeram parte desta conquista e que compartilharam comigo seu conhecimento, tempo, disponibilidade, e que certamente partilham da mesma alegria e sensação de dever cumprido ao término deste trabalho.

Que as bênçãos do nosso Senhor Jesus Cristo estejam sobre todos em todo tempo!

RESUMO:

O trabalho que se apresenta nesta dissertação diz respeito ao problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção, único nível, capacitado (CLSP), em uma fábrica de produtos pré-moldados de concreto usados na construção civil, onde o dimensionamento e sequenciamento dos lotes de produção num período pré-definido, representam um desafio para a empresa; que por sua vez busca minimizar os custos de produção, estoque, setup e melhorar o nível de atendimento das demandas dos clientes. O problema consiste em definir o tamanho dos lotes e sequência de produção de diversos blocos pré-moldados de concreto em uma linha de prensagem, com tempos de setup muito altos. Foi proposto, portanto, um modelo matemático cujo objetivo é minimizar os custos de produção, setup e estoque, envolvidos no processo de fabricação destes produtos através do método exato de Programação Linear Inteira. O modelo apresentado visa resolver o problema proposto e foi aplicado em situação real da empresa para fins de comparação dos resultados atuais com os resultados após aplicação do modelo.

Palavras Chave: Otimização; Dimensionamento e sequenciamento de lotes; métodos exatos; estoques; demanda determinística, blocos pré-moldados, Pesquisa Operacional.

ABSTRACT:

The work presented in this thesis concerns the problem of sizing and sequencing batch production , single level , skilled (CLSP) , in a manufacturing plant precast concrete used in construction, where the sizing and sequencing of lots production in a given period , represent a challenge for the company , which in turn seeks to minimize the costs of production, inventory , setup and improve the level of service customers' demands . The problem consists in defining the size of lots and production sequence of several blocks precast concrete in a press line , with setup times too high . It was proposed , therefore, a mathematical model whose objective is to minimize the costs of production, setup and inventory , involved in the manufacturing process of these products through the exact method of Integer Linear Programming . The presented model aims to solve the problem was proposed and applied to the real situation of the company for the purpose of comparison of current results with the results after application of the model .

Keywords : *Optimization , Scaling and sequencing batch ; exact methods ; inventories ; deterministic demand , precast blocks , Operational Research .*

SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	1
Lista de Tabelas	2
Lista de Abreviaturas.....	3
 CAPÍTULO 1	
1. Introdução.....	4
1.1. Motivação da Pesquisa	4
1.2. Objetivos da Dissertação.....	5
1.2.1. Objetivo Geral.....	5
1.2.2. Objetivos Específicos.....	5
1.3. Organização da Dissertação.....	5
 CAPÍTULO 2	
2. Contextualização.....	6
2.1. A Empresa.....	6
2.2. Os produtos.....	6
2.3. Aplicações do produto.....	7
2.4. O Processo Produtivo e o Problema.....	8
2.5. Caracterização do problema.....	10
 CAPÍTULO 3	
3. Problemas de Dimensionamento de Lotes e Sequenciamento.....	12
3.1. Introdução.....	12
3.2. Abordagem Clássica.....	16
3.3. Estudos sobre dimensionamento de lotes.....	19
3.3.1. Pesquisas sobre Problemas de Dimensionamento de Lotes não Capacitado de nível único.....	19
3.3.2. Pesquisas sobre Problemas de Dimensionamento de Lote não Capacitado de nível múltiplo..	20
3.3.3. Pesquisas sobre Problemas de Dimensionamento de Lotes Capacitado de nível único.....	20
3.3.4. Pesquisa sobre Problemas de Dimensionamento de Lote Capacitado de nível múltiplo.....	22
3.4. Problema de Dimensionamento e sequenciamento de Lotes em máquinas paralelas.....	23
3.5. Problema Discreto de Dimensionamento de Lotes e Sequenciamento.....	25
3.6. Modelos determinísticos de estoque.....	25
3.7. Classificação e Reformulação.....	26
 CAPÍTULO 4	
4. Estudo de Caso: Planejamento da Produção dos blocos pré-moldados.....	28
4.1. Metodologia.....	28
4.2. Introdução.....	29
4.3. Modelagem Matemática.....	32
4.3.1. Parâmetros e Variáveis Utilizados.....	32
4.4. O Modelo – Método exato PLM.....	33
4.4.1. Reformulação do modelo para ambientes com mais de uma linha de produção.....	35
4.5. Obtenção dos dados para aplicação prática do modelo.....	36
4.6. Resultados Obtidos – Implementação do modelo na empresa.....	40
4.6.1. Análise dos resultados.....	43
 CAPÍTULO 5	
5. Conclusões.....	45
5.1. Proposta de trabalhos futuros.....	46
 Referências Bibliográficas.....	47
ANEXO.....	50
APÊNDICE.....	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Portfólio de produtos da empresa estudada.	6
Figura 2 - Aplicação dos blocos pré-moldados tipo paver	7
Figura 3 - Aplicação dos blocos com função estrutural.	7
Figura 4 - Layout representativo da Planta de Blocos Pré-moldados.	8
Figura 5 - Classificação dos problemas de dimensionamento de lotes por grupos.	17
Figura 6 - Gráfico representativo do estoque e ponto de reabastecimento.	26
Figura 7 - Níveis de abstração no desenvolvimento do modelo.	28
Figura 8 - Gráfico de dispersão Volume x Frequência de produção.	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo das formulações presentes na literatura.	13
Tabela 2 - Tempo unitário de produção do bloco tipo b	37
Tabela 3 - Custo unitário de produção do bloco tipo b	37
Tabela 4 - Custo unitário de estocagem do bloco tipo b	37
Tabela 5 - Tempo de setup do bloco tipo b	38
Tabela 6 - Custo de setup do bloco tipo b	38
Tabela 7 - Demanda projetada do bloco tipo b no macroperíodo s	38
Tabela 8 - Capacidade produtiva do bloco tipo b no microperíodo t.	39
Tabela 9 - Capacidade produtiva do bloco tipo b no macroperíodo s.	39
Tabela 10 - Lote mínimo de produção do bloco tipo b.	40
Tabela 11 - Estoque de segurança para o bloco tipo b.	40
Tabela 12 - Plano macro de produção para a semana 1.	41
Tabela 13 - Plano macro de produção para a semana 2.	41
Tabela 14 - Plano e sequencia de produção detalhado da semana 1.	42
Tabela 15 - Plano e sequencia de produção detalhado da semana 2.	42
Tabela 16 - Comparativo de estoque atual e após aplicação do modelo.	43
Tabela 17 - Comparativo de custos do estoque atual e após aplicação do modelo.	43

LISTA DE ABREVIACÕES:

PCP	Programação e Controle da Produção
PO	Pesquisa Operacional
GLSPST	<i>General Lot-sizing and Scheduling Problem with Setup Times</i> - Problema geral de dimensionamento de lotes e sequenciamento simultâneos
MPS	<i>Master Program Schedule</i> - Programa mestre de produção
MRP	<i>Material Requirement Planning</i> - Planejamento de necessidades de materiais
EOQ	<i>Economical Order Quantity</i> - Dimensionamento do lote econômico
ELSP	<i>Economic Lot Scheduling Problem</i> - Problema do dimensionamento de lotes e sequenciamento econômico
CLSP	<i>Capacitated Lot-Sizing Problem</i> - Problema de dimensionamento de lotes capacitado
DLSP	<i>Discrete Lot-Sizing and Scheduling Problem</i> - Problema discreto de dimensionamento de lotes e sequenciamento
CSLP	<i>Continuous Setup Lot-Sizing Problem</i> - Problema de dimensionamento de lotes com <i>setup</i> contínuo
DLSPSD	<i>setup costs and setup times</i> - Problema discreto de dimensionamento de lotes e sequenciamento dependente da sequência com custos e tempos de <i>setup</i>
MTO	<i>Make to Order</i> – Produzido por ordem de produção
MTS	<i>Make to Stock</i> – Produzido para estoque

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1. Motivação da pesquisa:

No cenário atual em que o Brasil se encontra os investimentos em indústrias, infraestrutura, residências, hospitais, etc., têm alavancado o mercado da construção civil e em especial o segmento de produtos pré-fabricados ou mais especificamente os blocos pré-moldados de concreto, que apresentam diversas vantagens construtivas em termos de rapidez, confiabilidade, segurança e praticidade nos canteiros de obra. Sobre este aspecto os investimentos em maquinário, novas plantas industriais e capacitação de mão de obra para atender a demanda destes produtos tem sido consideráveis nos últimos anos. Aliado a este crescimento surge a necessidade de uma maior profissionalização nos processos de fabricação dos produtos pré-moldados, semelhantemente ao que já vem sendo feito em setores industriais como o de calçados, têxtil, de bens de consumo, etc.

A indústria de pré-fabricados está continuamente fazendo esforços para atender as demandas da sociedade, como por exemplo: economia, eficiência, desempenho técnico, segurança, condições favoráveis de trabalho e de sustentabilidade. O uso de concreto pré-moldado em edificações está amplamente relacionado à uma forma de construir econômica, durável, estruturalmente segura e com versatilidade arquitetônica. A evolução construtiva das edificações e das atividades da engenharia civil nas próximas décadas será influenciada pelo desenvolvimento do processo de informação, pela comunicação global, pela industrialização e pela automação. Já existe bastante desta realidade sendo largamente utilizado na Europa e Estados Unidos. Entretanto, há muito mais para ser implementado, especialmente com respeito à eficiência dos processos construtivos atuais, desde o projeto da edificação até o seu acabamento. Para se mudar a base produtiva na construção civil, com uso intensivo da força de trabalho, para um modelo mais moderno como a pré-fabricação, envolveria a aplicação de uma filosofia industrial ao longo de todo o processo construtivo da edificação. A pré-fabricação das estruturas de concreto é um processo industrializado com grande potencial para o futuro. O uso de sistemas de produção e de ferramentas que auxiliem na tomada de decisão do PCP (Planejamento e Controle da Produção) quanto ao que produzir e quando produzir, tem recebido atenção especial e maior visibilidade devido aos exemplos bem sucedidos de empresas que investiram em sistemas de PCP mais modernos, e tornaram-se mais competitivas e mais rentáveis.

Contudo a necessidade de termos maior confiança no atendimento dos prazos solicitados pelos clientes, menores perdas, redução de estoques, e consequentemente menores custos de produção nas indústrias de produtos pré-moldados, justifica e embasa o desenvolvimento deste trabalho de dissertação. Trata-se de um projeto acadêmico mas com potencial comercial e de larga aplicação em processos com características semelhantes aos da empresa estudada.

1.2. Objetivos da dissertação

1.2.1. Objetivo Geral:

Propor um modelo estatístico/matemático, que mais se aproxima de uma representação do problema de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção na indústria estudada com vistas a otimização dos custos e atendimento da demanda.

1.2.2. Objetivos Específicos:

- Conhecer as restrições e variáveis que delimitam o problema proposto;
- Modelar o problema e propor uma solução;
- Testar o modelo em situação real da empresa;
- Analisar os dados obtidos pós-testes.

1.3. Organização da dissertação:

Esta dissertação foi organizada em 05 capítulos como segue abaixo:

O capítulo 1 traz a motivação da pesquisa bem como os objetivos gerais e específicos que norteiam o trabalho realizado. O capítulo 2 apresenta a empresa, o contexto no qual esta se encontra inserida, além de uma descrição do problema a ser tratado. No capítulo 3, é feita uma revisão sobre importantes estudos de modelagem matemática de problemas de dimensionamento de lotes e sequenciamento presentes na literatura. O estudo de caso é apresentado no capítulo 4. Nesse capítulo são conhecidos: a metodologia utilizada para tratamento do problema, o modelo matemático proposto, os dados coletados com os responsáveis pelo processo, os resultados computacionais, e uma comparação dos resultados com a prática atual. Finalmente, no capítulo 5 são apresentadas conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

Contextualização

2.1. A empresa:

No Brasil o segmento da construção civil continua em crescente expansão e se mantém aquecido devido ao aumento da renda média no país e incentivos governamentais à construção, compra e venda de imóveis em todos os níveis sociais. Com isso novas demandas vêm sendo exigidas das empresas que atuam neste mercado e encontram neste contexto uma oportunidade de expansão dos negócios, investimento de médio e longo prazos e melhorias de produtividade em seus processos atuais. De forma particular o nordeste brasileiro tem percebido um aumento considerável de indústrias que montam suas plantas e se instalam principalmente nas cidades do interior, tendo a necessidade do uso de blocos de pré-moldados de concreto para a construção de galpões. De semelhante modo, grandes construtoras investem na edificação de condomínios residenciais, edifícios, shoppingcenter e hipermercados; órgãos do governo realizam obras de pavimentação de ruas e praças e infraestrutura em geral. Todos estes empreendimentos tem em comum o uso cada vez mais frequente de produtos pré-moldados de fácil manuseio e que apresentam ganhos quanto à produtividade nas obras. Inserida neste contexto a empresa estudada, é apresentada como uma indústria com sede localizada na cidade de Campina Grande-PB e há quatro anos atua no mercado com produtos pré-moldados de concreto para a construção civil. Atualmente atende basicamente quatro estados do nordeste: Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco e Alagoas. Possui unidades produtivas nas cidades de Campina Grande e João Pessoa, sendo esta última com processo automatizado. Os blocos de concreto produzidos são utilizados na construção civil, substituindo os tijolos cerâmicos e apresentam vantagens construtivas como: maior resistência à compressão do que os tijolos cerâmicos furados; maior uniformidade, reduzindo a espessura da argamassa e menor influência de fatores climáticos na sua produção. Cimento, areia e brita são as matérias-primas usadas na fabricação dos blocos de concreto.

2.2. Os produtos:

Piso intertravado

Prisma



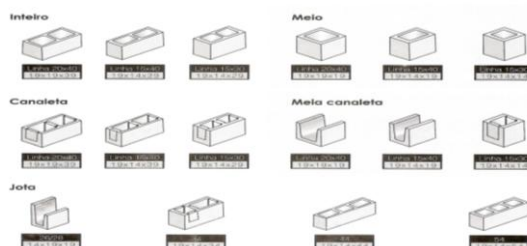
16 Faces



Cores disponíveis:



Blocos com função estrutural



Blocos sem função estrutural

Vedação e Aparente

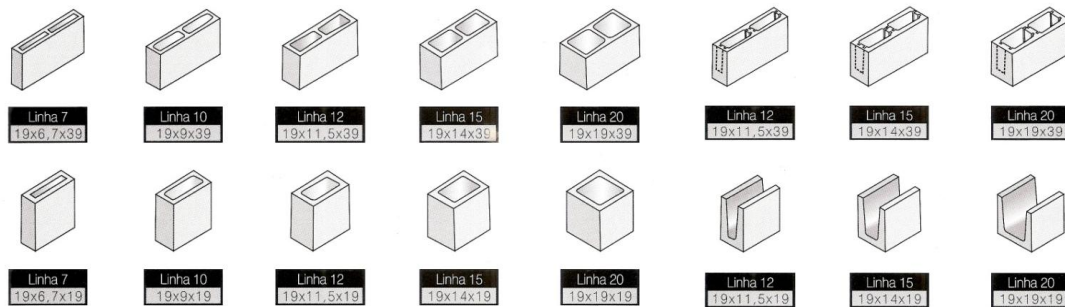


Figura 1: Portfólio de produzidos da empresa estudada.
Fonte: Catálogo de produtos fornecido pela empresa estudada.

2.3. Aplicações do produto:

Os blocos pré-moldados de concreto tipo paver são largamente utilizados na pavimentação urbana, em calçadas, ruas, praças, etc.



Figura 2: Aplicação dos Blocos Pré-moldados tipo paver.
Fonte: Fotos da Internet.

Os blocos com função estrutural são comumente utilizados, na edificação de casas, galpões, muros, edifícios residenciais e comerciais, shopping, supermercados, indústrias, etc.; devido as suas vantagens construtivas quanto a rapidez da obra, padronização da edificação e segurança.



Figura 3: Aplicação dos Blocos com função estrutural.
Fonte: Fotos da Internet.

2.4. O processo produtivo e o problema:

O processo produtivo na indústria de pré-moldados se dá pela transformação do traço, que consiste na mistura do agregado (areia, brita, pó de pedra) com o cimento, a água e aditivos. A mistura destes componentes, seguida da prensagem do traço em matrizes com dimensões predefinidas, cura dos blocos e paletização, constituem as operações de produção dos blocos pré-moldados de concreto. Os blocos produzidos podem ser comercializados após 72 horas, no mínimo, de sua produção, tempo em que é mantido nas prateleiras em área coberta (24 horas) e em processo de secagem ao tempo (48 horas). Este tipo de indústria não é muito exigente quanto a fatores locais; contudo, a indústria estudada tem sua localização próxima do seu mercado consumidor numa região de visível expansão industrial. A mão de obra utilizada neste processo é facilmente treinável. Os blocos de concreto podem ser produzidos nas formas e tamanhos desejados, dependendo das matrizes utilizadas. Todavia existem alguns modelos de uso mais comum que já representam uma padronização no setor da construção civil. Um rigoroso controle de qualidade é a chave para o sucesso do empreendimento. Existem instituições que realizam testes de qualidade dos blocos de concreto, bem como analisam as matérias-primas a serem utilizadas na sua fabricação, de forma a estabelecer o melhor traço (dosagem adequada dos componentes) e as condições ideais de cura.

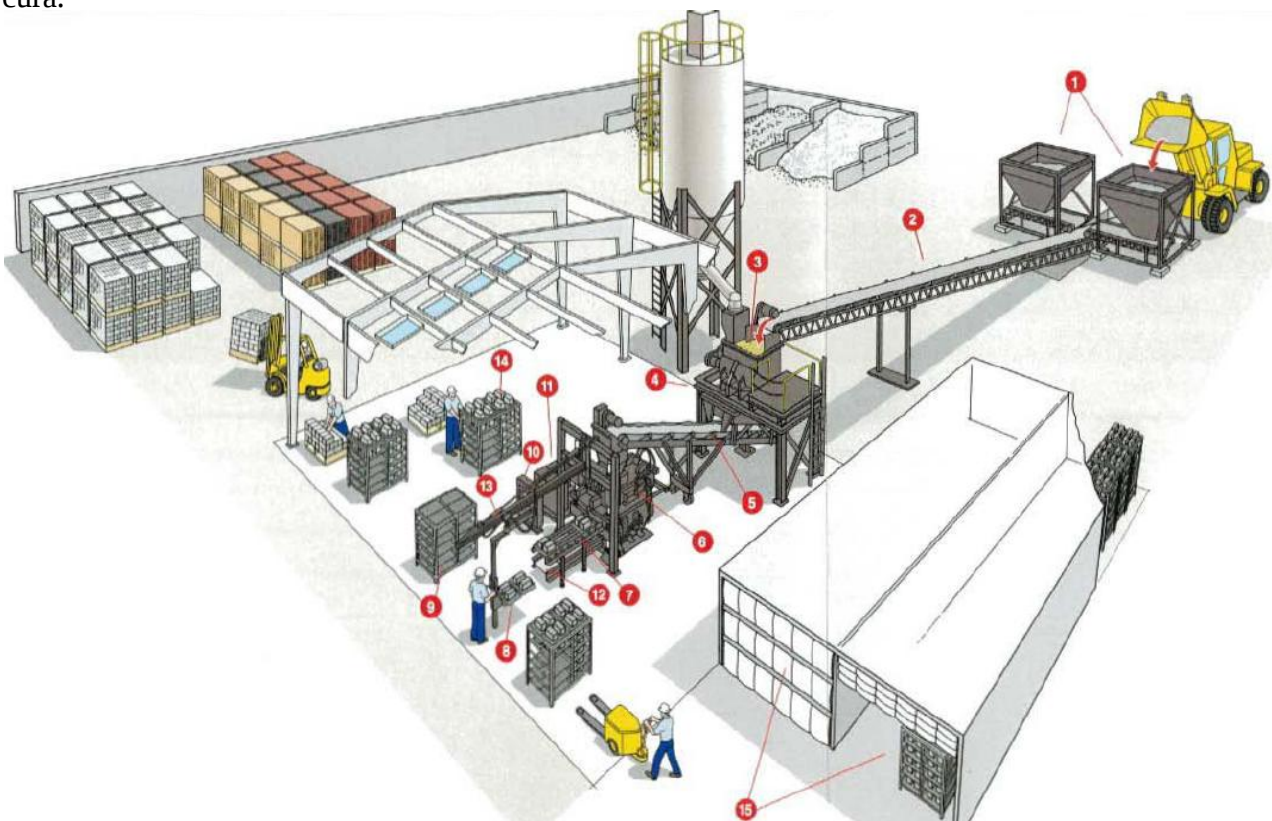


Figura 4: Layout representativo da Planta de Blocos Pré-moldados.

Fonte: Empresa Columbia fabricante de máquinas e equipamentos para a Indústria de Pré-fabricados de concreto.

- 01** – Silos de agregados (areia; brita e pó de pedra);
- 02** – Esteira transportadora de agregados dos silos para o misturador;
- 03** – Misturador de agregados;
- 04** – Saída do traço (massa homogênea formada por cimento, areia, brita, pó de pedra, água e aditivos de liga);
- 05** – Esteira transportadora do traço do misturador para a prensa;
- 06** – Prensa vibratória para compactação do traço nos moldes/matrizes;
- 07** – Rampa de saída das bandejas com blocos pré-moldados prontos;
- 08** – Bandeja para transporte e movimentação dos blocos prontos;
- 09** – Estante/Gaiola para armazenagem das bandejas com blocos prontos;
- 10** –
- 11** – Retorno da bandeja para a prensa;
- 12** – Calha para coleta de resíduos e blocos defeituosos que são reincorporados ao processo;
- 13** – Manípulo para retirada das bandejas da rampa e colocação nas estantes;
- 14** – Estante com blocos prontos retirados da área de descanso/cura;
- 15** – Estufas para controle da cura dos blocos pré-moldados.

A seguir encontram-se descritas todas as etapas necessárias para a construção dos blocos de concreto:

- Preparação do concreto

As matérias-primas são armazenadas em baias e em seguida são transportadas para os silos onde serão dosadas e despejadas na betoneira ou misturador, e misturadora na proporção indicada pelo traço (Exemplo de Traço do concreto: 1:8:4 - 1 medida de cimento; 8 medidas de areia; 4 medidas de brita). O equipamento gira durante 3 minutos ate que a mistura tome a forma de uma massa seca homogênea.

- Vibração e prensagem do bloco

Após a mistura, a massa de concreto é transportada através de esteiras ou *skippers* até o silo da prensa, onde é vibrada e prensada nas formas específicas de cada matriz, durante um ciclo médio de aproximadamente 20 segundos (o tempo de ciclo varia de acordo com cada tipo de produto prensado).

- Retirada do bloco da matriz

Após a prensagem, os blocos são desmoldados e conduzidos para a área coberta de primeira cura, devendo permanecer ao abrigo do tempo durante 24 horas, no mínimo.

- Cura e secagem do bloco

Os blocos são transportados dos estrados para a secagem final ao relento, sofrendo sempre aspersões de água até sua completa cura. Após 48 horas a produção pode ser comercializada.

- Paletização dos blocos

Após a cura completa dos blocos estes estão prontos para serem empilhados em pallets padronizados nas quantidades pré-estabelecidas; em seguida seguem para a armazenagem até que seja expedido para o cliente.

Na empresa estudada o desafio consiste na tomada de decisão eficaz do PCP (Planejamento e Controle da Produção) quanto ao tamanho do lote de produção e o momento certo em que este será produzido, ou seja, quanto e quando programar um determinado produto na linha de produção, de modo que os custos de produção, estocagem, e setup sejam mínimos. Entenda-se setup como sendo o tempo transcorrido na preparação da linha de produção que caracteriza a troca de um produto A por um produto B diferente.

2.5. Caracterização do Problema

O problema de lotes de produção de vários itens diferentes, numa empresa com capacidade de produção pré-definida, onde existem tempos de preparação entre um artigo e outro, e o setup representa um tempo elevado e oneroso; relaciona-se com as decisões de planejamento da produção de curto e médio prazos. Neste problema pretende-se determinar as quantidades (ou tamanho dos lotes) a produzir de um conjunto de produtos finais ao longo de um número finito de períodos de produção, de modo a satisfazer a demanda conhecida de cada produto em cada período, garantindo que a capacidade disponível em nestes períodos seja respeitada. A capacidade disponível é utilizada quer na produção dos produtos quer na preparação da sua produção. O objetivo do problema passa por definir um plano de produção que minimize os custos totais envolvidos, tipicamente custos de preparação e setup, custos de produção e custos de armazenagem. Numa solução para o problema determinam-se as quantidades a produzir de cada produto em cada período e as quantidades a armazenar de cada produto no final de cada período para satisfazer demandas futuras (estoque para

pronta entrega). Frequentemente, nos sistemas de planejamento e controle de produção este problema é designado por Plano Mestre de Produção (MRP).

Na indústria de pré-moldados estudada o problema a ser modelado foi caracterizado como sendo de horizonte de planejamento finito, único nível, onde o produto final não depende de outros subprodutos ou componentes para sua formação; multi-artigo pois vários itens diferentes podem ser produzidos ao longo do período; capacitado pois existem restrições de capacidade, com demanda determinística dinâmica pois os pedidos de produção dos itens são conhecidos e variam com o tempo ao longo do horizonte de planejamento; setup longo uma vez que cada troca de matriz reduz 12,5% da capacidade de produção do dia da linha em que será feita a troca; e não admite-se atrasos de entrega, o que na literatura é conhecido como *backlogging*. Sendo assim dentre os modelos existentes encontrados na literatura, o que mais se assemelha ao problema proposto é o SLCLSP (Single Level Capacitated Lot Size Problem) que assenta na classe de problemas multi-artigo, com capacidades limitadas e com tempos e custos de preparação. É de nível único, já que considera apenas produtos finais, sendo as demandas desses produtos finais determinísticas e dinâmicas.

A modelagem e formulação do problema serão apresentados no capítulo 3 deste trabalho, bem como uma revisão da literatura sobre o problema proposto.

CAPÍTULO 3

Problema de dimensionamento de lotes e sequenciamento

3.1. Introdução:

Os problemas de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção, embora bastante relacionados, são frequentemente tratados separadamente na literatura. Muitos trabalhos antigos publicados a partir dos primeiros estudos sobre dimensionamento de lotes, apresentam diversos modelos e métodos de solução para o problema de dimensionamento de lotes (lot sizing) e programação da produção (scheduling) e podem ser encontrados em Johnson e Montgomery (1974), Hax e Candea (1984). Em Maes e Wassenhove (1988) são tratados apenas problemas de dimensionamento de lotes. Conforme Drexl e Kimms (1997) e Karimi et al. (2003), a tendência mais recente é combinar o problema de dimensionamento de lotes às decisões de programação da produção (lot-sizing and scheduling problems ou lot-scheduling).

Na literatura é possível encontrar proposições de modelos para problemas de vários tipos como: GLSP (General Lot Sizing Problem) em, Herbert Meyr (1996). Diwakar Gupta, Thorkell Magnusson tratam de problemas do tipo CLSP (Capacitated Lot Sizing and Scheduling Problem), que são relacionados aos problemas de dimensionamento de lote capacitado, foco do estudo deste trabalho de pesquisa. Em Rangel e Ferreira (2003) é apresentado um método exato baseado nos métodos de planos de corte e branch and bound (branch and cut). Luche e Morabito (2005) resolvem exemplos reais utilizando o software GAMS/CPLEX.

Em outro tipo de problema, conhecido na literatura como Discrete Lot sizing and Scheduling Problem (DLSP), considera-se a produção em apenas uma máquina. O horizonte de planejamento finito é dividido em subperíodos, normalmente considerado como horas ou turnos de trabalhos. A principal característica do modelo é que se assume a hipótese “tudo ou nada”, ou seja, somente um produto pode ser produzido por subperíodo, e se for, utiliza toda a capacidade disponível. Drexl e Kimms (1997) ressaltam que a maioria dos autores considera que a capacidade não varia como tempo. Essa hipótese é razoável, uma vez que as decisões de dimensionamento e sequenciamento de lotes se encontram no nível operacional/ tático do planejamento, nível que lida com horizontes relativamente curtos de tempo.

Meyr (2000) trata de problemas do tipo GLSPST (General Lot sizing and Scheduling Problem with Sequence-dependent Setup Times) para uma máquina e apresenta um algoritmo para resolver o problema proposto, utilizando meta-heurísticas. Meyr (2002) apresenta a formulação para o General Lot sizing and Scheduling Problem with Parallel Machines (GLSPPL) para vários produtos considerando tempos de setup dependentes da sequência, máquinas operando em paralelo e com taxas de produção diferentes. Não é permitido atraso na entrega de pedidos. Drexler e Haase, (1995) apresentam o modelo PLSP (Proportional Lot Sizing and Scheduling Problem), que consiste num método de solução baseado em programação dinâmica, onde é permitido a utilização de parte da capacidade, além da produção de um segundo item dentro de um mesmo período, podendo ocorrer portanto dois preparos em um mesmo período. Pimentel (2010) apresenta em sua tese um modelo conhecido por MIP (Mixed Integer Programming) que permite resolver de forma exata o problema de dimensionamento de lotes e sequenciamento integrados em máquinas paralelas. Outras referências e citações sobre problemas relacionados a dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção, podem ser vistos nas seções 3.3 a 3.6 deste trabalho. A tabela 1 abaixo apresenta um resumo das formulações apresentadas na literatura considerando apenas os problemas em único nível de produção. Nas colunas estão as características principais mencionadas anteriormente. Nas linhas estão os modelos citados em parágrafos anteriores, divididos entre decisões de dimensionamento e sequenciamento separadas ou integradas. As células em branco indicam que a característica não se aplica ao problema a que se refere.

Tipo de problema		Características						
		Horizonte de planejamento	Demanda	Considera a capacidade	Divisão do horizonte	Estrutura de <i>setup</i>	Máquinas	Particularidades
Decisões separadas	Lote mínimo	Infinito	Estacionária	Não				
	WW	Finito	Dinâmica	Não	Períodos			
	CLSP	Finito	Dinâmica	Sim	Períodos		Única	
Decisões integradas	DLSP	Finito	Dinâmica	Sim	Subperíodos	Simples/complexa	Única	Hipótese "tudo-ou-nada"
	CSLP	Finito	Dinâmica	Sim	Subperíodos	Simples/complexa	Única	<i>Setup carryover</i>
	PLSP	Finito	Dinâmica	Sim	Subperíodos	Simples/complexa	Única	2 produtos por subperíodo
	GLSP	Finito	Dinâmica	Sim	Períodos e subperíodos	Simples/complexa	Única	Horizonte dividido em períodos e estes em subperíodos
	GLSPST	Finito	Dinâmica	Sim	Períodos e subperíodos	Complexa	Única	Estrutura de <i>setup</i> complexa
	GLSPPL	Finito	Dinâmica	Sim	Períodos e subperíodos	Complexa	Várias	Máquinas em paralelo (idênticas ou distintas)

Tabela 1: Resumo das formulações presentes na literatura.

Fonte: Saboia, Paula Lopes de Jesus - Problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção em uma fábrica de produtos de higiene pessoal - São Paulo, 2010.

A complexidade dos problemas de dimensionamento de lote depende das características apresentadas pelo mesmo. As seguintes características afetam a classificação, modelagem e decisões no dimensionamento de lotes.

1. O horizonte de planejamento.

O horizonte de planejamento é o intervalo de tempo em que o cronograma de produção se estende para o futuro, ou seja, é o período onde serão programadas as produções dos itens de acordo com a demanda. O horizonte de planejamento pode ser finito, ou seja com tempo de início e fim predefinidos, sendo geralmente acompanhado por uma demanda dinâmica; ou infinito quando não há um intervalo preestabelecido onde serão alocados os pedidos, estando geralmente relacionado a demanda estacionária. Além disso, o sistema pode ser observado continuamente ou em discretos pontos de tempo, o que, em seguida, classifica-os como um tipo de sistema contínuo ou discreto. Em termos de terminologia de período de tempo, os problemas de dimensionamento de lotes se enquadram nas categorias de problemas de grandes contentores ou contentores pequenos. Grandes contentores são aqueles em que o período de tempo é suficientemente longo para produzir vários itens (em casos de problemas de multi itens), enquanto que para contentores pequenos o período de tempo é tão curto que só um item pode ser produzido em cada período de tempo. Outra variante do horizonte de planejamento é um horizonte rolante, normalmente considerada quando existe a incerteza dos dados.

2. Número de níveis.

Sistemas de produção podem ser único nível ou multi nível. Em sistemas de um único nível, geralmente o produto final é simples. Matérias-primas, após o processamento de uma única operação, tais como forjamento ou fundição de metais por exemplo, são transformados diretamente no produto final. Em outras palavras, o produto final é produzido diretamente a partir de matérias-primas ou comprados materiais sem subconjuntos intermediários. A demanda dos produtos não depende de outros subitens e é avaliada diretamente de encomendas do cliente ou previsões de mercado. Em sistemas multi nível, há uma relação pai-componente entre os itens. As matérias-primas após o processamento por várias operações mudam para os produtos finais. A saída de uma operação (nível) é a entrada para outra operação. Portanto, a demanda em um nível depende da demanda dos seus níveis “pais”. Esse tipo de demanda é chamado demanda dependente. Problemas multi nível são mais difíceis de resolver do que problemas de único nível. Sistemas multi nível são distinguidos mais pelo tipo da estrutura do produto, que inclui montagem, sequenciamento, desmontagem e sistemas gerais ou MRP.

3. Número de produtos.

O número de itens finais ou produtos finais num sistema de produção é outra característica importante que afeta a modelagem e complexidade dos problemas de planejamento de produção. Existem dois tipos principais de sistema de produção em termos do número de produtos. Na produção de um único item existe apenas um produto final para os quais as atividades de planejamento devem ser organizadas. Em contra partida no planejamento da produção de multi itens, existem vários itens finais. A complexidade de problemas de multi-item é muito maior do que a do um único item.

4. Limitações de capacidade ou de recursos.

Recursos ou capacidades de um sistema de produção incluem equipamentos, mão de obra, máquinas, orçamento, etc. Quando não há nenhuma restrição sobre os recursos, o problema é dito ser não capacitado, e quando as restrições de capacidade são apresentadas explicitamente, o problema é denominado capacitado. Restrições de capacidade são importantes, e afetam diretamente na complexidade do problema, pois a resolução destes problemas será mais difícil quando as restrições de capacidade existirem.

5. Deterioração de itens.

No caso em que a deterioração de itens é possível, encontramos restrições no tempo de armazenamento. Isto, por sua vez, é outra característica que afeta a complexidade do problema.

6. Demanda.

O tipo de demanda é considerado como uma entrada para a modelagem do problema e pode ser estática ou dinâmica. Demanda estática significa que seu valor não muda com o tempo; enquanto que demanda dinâmica significa que seu valor muda com o tempo. Se o valor da demanda é conhecido de antemão (estático ou dinâmico), é denominado determinística, mas se não é conhecido com precisão e os valores de demanda são baseados em algumas probabilidades, esta demanda é denominada probabilística. Em casos de demanda independente, os requisitos de um item não dependem de decisões sobre o tamanho de outro item. Esse tipo de demanda pode ser visto em sistemas de um único nível de produção. Em lotes de dimensionamento de multi nível, onde existe uma relação pai-componente entre os itens, no qual a demanda de um nível depende sobre a demanda de seus pais (nível prévio), é chamado dependente. Problemas com demandas dinâmicas e dependentes são muito mais complexos do que os problemas com estático e / ou demandas

independentes. Além disso, problemas com demanda probabilística serão mais complexos do que os problemas com demanda determinística.

7. Estrutura de *setup*.

Estrutura de *setup* é outra característica importante que afeta diretamente a complexidade do problema. Custos e tempos de *setup* são geralmente modelados por introdução de variáveis binárias (zero/um) no modelo matemático do problema. Estas variáveis indicam a troca de produção entre dois produtos de famílias diferentes. A introdução dessas variáveis binárias no problema torna o modelo matemático mais complexo, da mesma forma que as estruturas de *setup* dependentes da sequência também o são, quando comparadas com as independentes. Todavia, mudanças de produção entre diferentes produtos podem incorrer em tempo e custo de *setup*. Existem dois tipos de estrutura de *setup*: *setup* simples quando o tempo e o custo de *setup* em um período são independentes da sequência e das decisões em períodos anteriores; e *setup* complexo quando estes dependem da sequência ou períodos anteriores. As estruturas complexas são mais complicadas, para a modelagem e solução de problemas do dimensionamento de lotes.

8. Falta de estoque.

Falta de estoque é outra característica de modelagem que afeta a complexidade de resolução de problemas. Se a falta é permitida significa que é possível satisfazer a demanda atual em períodos futuros (caso de *backlogging*), ou pode ser admitido que a demanda não seja atendida totalmente (caso de perda de venda). Problemas com falta de estoque são mais difíceis de resolver do que sem falta.

3.2. Abordagem Clássica

A Pesquisa sobre dimensionamento de lotes começa a partir do clássico modelo de quantidade de pedido econômico (EOQ). O modelo EOQ foi desenvolvido para um único nível de processo de produção com um único item e sem restrições de capacidade sob demanda estacionária. Uma vez que os pressupostos do modelo EOQ não parecem ser realistas, outros modelos evoluíram. Um deles é o Problema de Sequenciamento e Dimensionamento do Lote Econômico (ELSP), que atrai muitos dos pesquisadores. O ELSP sequencia a produção de vários itens diferentes na mesma instalação numa base repetitiva, ou seja com ciclos repetitivos de produção (Elmaghraby 1978). Assim, a ELSP é um problema de multi-item e de nível único com restrições de capacidade em demanda estacionária e horizonte de planejamento infinito. Com base nas principais características dos problemas de

dimensionamento de lotes, a literatura atual pode ser classificada conforme proposto por Guner, Tunali e Jans (2010), da seguinte forma (Figura. 2).

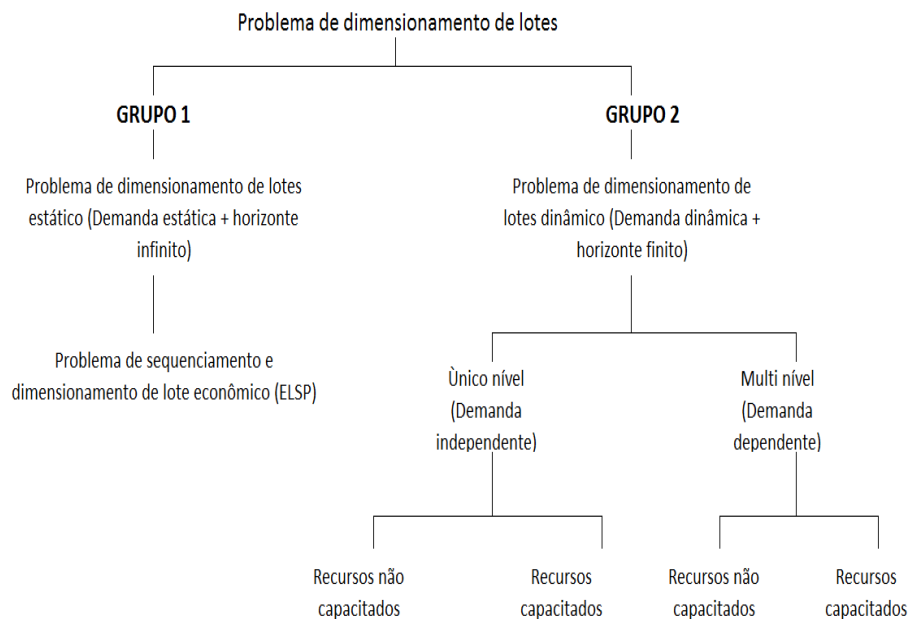


Figura 5: Classificação dos problemas de dimensionamento de lotes por grupos.

Fonte: Adaptação da classificação proposta por Hacer Guner, Semra Tunali e Raf Jans (2010).

O Grupo 1 apresenta problemas de dimensionamento de lote estático, denominado de Problema de Sequenciamento de Lote Econômico (ELSP). O ELSP trata do sequenciamento da produção de um conjunto de itens em uma única máquina para minimizar o longo período médio de espera e custo de preparação, supondo uma demanda constante conhecida e taxas de produção. O objetivo do ELSP é determinar um ciclo de produção de i itens, $i \in \{1, 2, \dots, N\}$, num sequenciamento repetitivo. Um sequenciamento repetitivo é alcançado se existe um período de tempo T_i para cada produto que representa o tempo entre sucessivos ciclos de produção (batches ou "lots") do item i (Chatfield 2007). O sequenciamento repetitivo é sujeito às seguintes condições, relacionadas com a instalação de produção e o mercado, tal como indicado em Bomberger (1966).

1. Apenas um item i pode ser produzido de cada vez.
2. A preparação de um determinado item incorre tanto em um custo específico de preparação (s_i) como em um tempo de preparação (t_i).
3. Tempo de preparação e o custo de preparação são determinados exclusivamente pelo produto quando entra em produção (seqüência independente).
4. A taxa de demanda (r_i) e a taxa de produção (p_i) são conhecidas e constantes para todos os itens.

5. Toda a demanda deve ser cumprida.
6. Custos de estoque (h_i) são determinados pelo valor de itens em estoque.
7. O custo variável total de um item é igual ao custo de preparação médio mais o custo de estoque por um período de tempo específico.
8. O tempo de produção para um lote de item i , σ_i , é igual à soma do tempo de processamento e o tempo de preparação, $\sigma_i = (r_i / p_i) * T_i + t_i$.

Uma solução consiste de um conjunto $T = \{T_1, T_2, \dots, T_N\}$ tal que T_i é suficientemente grande para permitir que a produção do item i no início do ciclo satisfaça a demanda durante todo o ciclo T_i , além de permitir a produção de outros itens no tempo que resta entre o fim da produção do item i e o início do ciclo seguinte. O custo por unidade de tempo para um item i é definido como:

$C_i = (\text{custo de preparação médio} + \text{custo de estoque médio})$

$$C_i = \frac{s_i}{T_i} + \frac{h_i r_i T_i (p_i - r_i)}{2 p_i}$$

Devido às características não-lineares e combinatórias do problema, o ELSP cai na classe de problemas NP-difíceis (problemas não polinomiais difíceis). Muitas pesquisas que tratam do ELSP propõem diferentes abordagens heurísticas que visam encontrar sequenciamentos de baixo custo. Moon et al. (2002) apresenta uma descrição detalhada dessas abordagens.

O Grupo 2 é o de problemas de dimensionamento de lote dinâmico que lida com a demanda dinâmica sob um horizonte de planejamento finito. Ele pode ser formulado para um único nível com a capacidade de produção infinita e um único produto ao longo de períodos T de tempo como se segue:

$$\text{Minimise } \sum_{t=1}^T (S_t Y_t + C_t X_t + h_t I_t) \quad (3)$$

$$\text{s.t. } X_t + I_{t-1} - I_t = d_t \quad (\forall t \in T) \quad (4)$$

$$X_t \leq M_t Y_t \quad (\forall t \in T) \quad (5)$$

$$Y_t \in \{0, 1\} \quad (\forall t \in T) \quad (6)$$

$$X_t, I_t \geq 0 \quad (\forall t \in T) \quad (7)$$

Este problema é conhecido como problema de dimensionamento de lotes de único nível, de único item e não capacitado (Wagner e Whitin 1958), onde ht é o custo de estoque do produto de um período para o próximo, dt representa a demanda do produto no final do período t , Ct é o custo variável de produção da unidade no período t , St é o custo de preparação no período t , e Yt é uma variável binária que assume o valor 1, se o produto é produzido no período t e 0 caso contrário; e Mt é a quantidade máxima a ser produzida. As variáveis de decisão Xt representam a quantidade a ser produzida em cada período t e It representa a variável estoque do produto, no final do período t . A função objetivo, Eq. 3, inclui os custos de estoque total, preparação e produção. A equação de equilíbrio de estoque para cada período é dada na primeira restrição, Eq.4. A eq. 5 permite que exista qualquer produção. Equações 6 e 7 são restrições de não-negatividade.

3.3. Estudos sobre Dimensionamento de Lotes

A tabela do ANEXO A lista cronologicamente exemplos de literatura publicada, de 2000 até o ano de 2012, baseadas em especificações de problemas relacionados a Dimensionamento de lotes.

3.3.1. Pesquisas sobre Problemas de Dimensionamento de Lotes não Capacitado de nível único:

A principal questão sobre esse tipo de problema é determinar o tamanho dos lotes de produção para um horizonte de planejamento de forma que a soma dos custos de preparação, permanência no estoque e de produção sejam minimizados.

B. Karimi et al. (2003) fez uma revisão sobre problemas de dimensionamento de lotes único nível, e suas várias abordagens de solução. Também foram introduzidos em seu artigo, fatores que afetam a modelagem devido à complexidade dos problemas de planejamento de produção, e diferentes variações de problemas de dimensionamento de lotes e programação, juntamente com abordagens exatas e heurísticas para sua solução.

Nadjib Brahimi (2004) traz uma abordagem sobre problemas de dimensionamento de lotes único item, capacitado e não capacitado. Vários métodos de solução para o modelo não capacitado de único item (USILSP) foram revistos. Quatro formulações matemáticas diferentes para o problema clássico também são apresentados em sua pesquisa. Diferentes extensões para aplicações no mundo real destes problemas foram discutidos.

Toso e Morabito (2004) fazem uma aplicação em um estudo de caso de um modelo matemático que é resultado de uma combinação e adaptação do modelo proposto por Meyr (2000), o GLSP-ST (General Lot Sizing Problem – Setup Times), que considera a perda de capacidade resultante dos tempos de preparação dependentes da seqüência. Hax e Candea (1984) apresentam um

modelo de dimensionamento de lotes capacitado que representa bem as considerações de utilização de horas extras para aumentar a capacidade produtiva, penalizando os custos de produção.

Ullah & Parveen (2010) fizeram uma revisão da literatura relacionada ao problema de dimensionamento de lotes de estoque em ambiente único e suas variações capacitado e não capacitado, único item e multi-item.

3.3.2. Pesquisas sobre Problemas de Dimensionamento de Lote não Capacitado de nível múltiplo

O dimensionamento de lotes de multi nível introduz demandas dependentes: existe uma relação de subprodutos que compõem o produto final denominado relação pai-componente, ou pai-filho; onde o dimensionamento de lotes e as decisões de cronometragem de um item filho, em um nível da estrutura do produto, dependem das decisões tomadas para um item pai.

Prasad e Chetty (2001) apresentam uma heurística nova chamada Bit_Mod combinado com um algoritmo genético para o dimensionamento de lote multi nível tanto no âmbito de horizonte fixo quanto no rolante e avalia a influência de diferentes parâmetros, tais como padrão de demanda, regra dimensionamento de lote, estrutura do produto, e modelo de previsão sob horizonte fixo e rolante através de experimentos de simulação. Ikou Kaku & Zhaoshi Li (2007) apresentam uma heurística eficaz para resolver os problemas de dimensionamento de lotes multi níveis, como um importante tomador de decisão nos sistemas de produção, sendo, portanto referência para problemas de otimização combinatória.

3.3.3. Pesquisas sobre Problemas de Dimensionamento de Lotes Capacitado de nível único:

A presença de restrições de capacidade incrementa a complexidade desses problemas.

Araujo et al. (2003) trata de um problema prático de dimensionamento e seqüenciamento de lotes em uma fundição onde existem dois níveis de decisão inter-relacionados: programação do forno, onde um tipo de liga é escolhido para ser produzido em cada período, e planejamento das máquinas de moldagem, que especifica a quantidade de cada item deve ser produzida em cada período, isto é, dimensionamento dos lotes. Um modelo de programação inteira mista é proposto e um método de solução baseado em busca local é desenvolvido. O planejamento da produção é feito usando a técnica de horizonte rolante, em que somente a programação para os períodos imediatos é implementada.

Yao e Huang (2005) resolvem o Problema de Sequenciamento de Tamanho de Lote Económico com itens deteriorados utilizando a aproximação de período básico sob o poder de duas heurísticas. O estudo apresenta um algoritmo genético híbrido com um procedimento de teste de viabilidade e uma heurística de busca binária para resolver eficientemente o problema. Os resultados computacionais mostram que a aproximação híbrida pode ser muito útil para obter eficientemente o sequenciamento da produção e estratégias de dimensionamento de lotes para itens deteriorados na indústria de alimentos.

Duda (2005) apresenta uma aproximação do algoritmo genético com funções de reparação para o problema de dimensionamento de lote capacitado discreto clássico proveniente de um ambiente de produção real, em nível único, onde vários itens são produzidos. Moon et al.

(2006) aplicam os princípios da Tecnologia de Grupo (GT) para o problema de sequenciamento de lote económico. A GT é uma aproximação para a fabricação e gerência de engenharia que busca atingir a eficiência de alta velocidade e produção em massa através da identificação de peças semelhantes e classificando-as em grupos baseados em suas semelhanças. A abordagem GT frequentemente tem muitos benefícios em sistemas de manufatura, tais como tempos de preparação reduzido, redução de estoques em processo, menos manuseio de material, e um melhor planejamento e controle da produção. Os autores modificam a heurística proposta por Kuo e Inman (1990) ao considerar o tamanho do ciclo modificado e ao propor um algoritmo genético híbrido para resolver o problema de sequenciamento de lote económico. Os resultados computacionais mostram que a heurística híbrida proposta supera a heurística de Kuo e Inman (1990).

Toso (2008) traz um estudo detalhado dos modelos e os métodos de solução exatos e heurísticos em um estudo de caso onde foram propostas quatro abordagens para modelar e resolver o problema.

Mariá C.V. Nascimento (2009) aborda em seu artigo um sistema de único estágio, multi planta, multi item, sendo, portanto um problema de dimensionamento de lote multi período capacitado (MPCLSP). O problema considera os custos de transferência das demandas entre plantas, e custos individuais por período. Estes custos de transferência são afetados devido a necessidade de uma planta produzir itens para outra planta. Da mesma forma, é permitido o armazenamento de itens em plantas distintas a partir do momento em que o item é produzido e/ou é exigido. Admitindo-se que os clientes só pagarão o transporte da planta mais próxima até o local de entrega, os eventuais custos de transferência adicionais devem ser contabilizados. Uma vez que o problema de encontrar uma solução viável para o problema de dimensionamento de lote capacitado em única planta com o tempo de setup é NP-completo, este torna-se uma variante de multi-planta.

Métodos exatos têm dificuldades para solucionar instâncias de tamanho moderado. Portanto, o uso de heurísticas como métodos de solução para este problema é justificado. Algumas aplicações destes problemas podem ser encontrados numa ampla gama de setores de fabricas, por exemplo, na fabricação de colchão, de aço inoxidável, e de bebidas, onde as plantas estão espalhadas geograficamente. Como um exemplo, Sambasivan e Yahya (2005) estudaram um problema do mundo real em um fabricante de aço.

Bernardes, Araujo & Rangel (2010) estudaram um Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes, para um processo produtivo em que é necessária a produção de um material bruto que será transformado, posteriormente, em itens finais. Os custos e perdas de capacidade com preparo são considerados dependentes da sequência. Diante da dificuldade de resolução do problema com um pacote computacional, em Araujo et al. (2007) foram desenvolvidas algumas heurísticas e o método relax-and-fix foi usado para resolver o problema num horizonte rolante de planejamento. Com isso foi desenvolvida uma equação estendida e foram propostas novas restrições com o objetivo de obter uma equação mais forte para o modelo proposto em Araujo et al. (2007).

O desenvolvimento de modelos e de métodos para a resolução de problemas de planejamento da produção de médio/curto prazo são apresentados em Pimentel (2010). O trabalho consiste na exploração e comparação de diferentes abordagens, baseadas em programação inteira mista, em modelos/métodos de decomposição e em métodos heurísticos, para os problemas em estudo. Um dos problemas é um problema clássico de dimensionamento de lotes, que está associado às decisões de planejamento da produção de médio-prazo.

O problema consiste na determinação de um plano de produção para vários produtos finais ao longo de um determinado horizonte temporal, que minimize todos os custos envolvidos e respeite restrições de demanda e de capacidade. Para determinar a solução ótima inteira dos modelos de decomposição, aplica-se o método de partição e geração de colunas (branch-and-price). São apresentados resultados computacionais partindo de um conjunto de instâncias da literatura, para os vários modelos e métodos.

3.3.4. Pesquisa sobre Problemas de Dimensionamento de Lote Capacitado de nível múltiplo

A inclusão de restrições de capacidade e demanda dependente entre os itens torna o problema muito mais complicado do que os problemas de dimensionamento de lote não capacitado de multi nível.

Christian Almeder, Karl F. Doerner, Richard F. Hartl (2005) apresentam um algoritmo do tipo colônia de formigas para resolver problemas de dimensionamento de lote multi nível capacitado. Foi aplicada uma abordagem híbrida, para otimizar a decomposição do problema em subproblemas menores contendo apenas alguns itens e períodos, que são resolvidos usando o pacote CPLEX. Uma solução global é obtida através da consolidação das soluções parciais. Esta abordagem híbrida fornece resultados superiores no que diz respeito à qualidade em comparação com as abordagens existentes na literatura.

Mariá (2009) em sua publicação mostrou que o problema de dimensionamento de lote capacitado (CLSP) é uma combinatória de problemas de otimização cujo objetivo é encontrar um plano de produção que minimiza a produção, setup e custos de armazenamento, e atende sem demora, as demandas dos itens nos períodos em um horizonte de planejamento. De acordo com Karimi et al. (2003), o CLSP é um dos problemas mais importantes e difíceis no planejamento tático da produção. Para o caso em que os tempos de preparação são considerados, o problema para encontrar uma solução viável é NP-completo (Maes et al., 1991).

Christian Almeder (2009) desenvolve um método de solução geral para problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes em sistema multi nível capacitado (MLCLSP). Este método de otimização híbrido combina metaheurísticas e soluções exatas LP/MIP para determinar o sequenciamento da produção como parte do processo de Planejamento das necessidades de materiais (MRP).

Recentemente Tamás Kis & András Kovács (2012) propuseram métodos de soluções exatas para problemas de dimensionamento de lotes capacitado, com atrasos (Uncapacitated Lot-Sizing problems with Backlogs - ULSB) em dois níveis; em que dois tomadores de decisão autônomos e com interesses em comum denominados de *leader* e *follower*, constituem uma cadeia de suprimentos em dois escalões atuando sequencialmente. O *leader* corresponde a um “comprador” que compra itens do *follower* “fornecedor” em ordem para atender à demanda externa ao menor custo tanto para comprador como fornecedor. Ambas as partes tem possibilidade de estocar produtos. Foi estudado o problema do comprador, no sentido de determinar como serão feitos os pedidos de fornecimento ao longo do tempo para minimizar seus custos, tendo em vista as possíveis ações do fornecedor.

3.4. Problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes em máquinas paralelas

Embora a literatura sobre o problema de dimensionamento de lotes e sobre o problema de sequenciamento em máquinas paralelas seja abundante, apenas mais recentemente começaram a

surgir publicações onde as duas decisões são abordadas conjuntamente. Tipicamente na literatura sobre o sequenciamento assume-se que a dimensão dos lotes foi previamente determinada e não constitui uma incógnita do problema. Por outro lado, a literatura sobre o dimensionamento de lotes raramente considera as decisões de sequenciamento dos lotes. Normalmente nos problemas de dimensionamento de lotes as soluções são avaliadas por objetivos associados a custos, enquanto que nos problemas de sequenciamento imperam normalmente objetivos relacionados com o tempo. Por força do objetivo da minimização dos níveis de inventário, no caso do problema DLEMP é essencial que as duas decisões sejam integradas, de modo a obter soluções de maior qualidade.

Embora já em 1992 Potts e Wassenhove (1992) tenham constatado que as decisões de dimensionamento de lotes e de sequenciamento desses lotes estão fortemente inter-relacionadas, só mais recentemente a visão integrada dos dois problemas começou a suscitar maior interesse. Os autores referem que é surpreendente que existam tão poucos estudos que abordem os dois tipos de decisões simultaneamente. Dauzère-Péres e Lasserre (1994) afirmam que embora a decomposição hierárquica das decisões de planeamento e de sequenciamento simplifique o problema, normalmente existem restrições cruciais do sequenciamento que são ignoradas ao nível do problema de dimensionamento de lotes, levantando problemas de consistência entre as decisões tomadas nos dois níveis hierárquicos. Por esse motivo, os autores defendem a integração dos dois problemas. Num artigo de revisão de literatura de problemas de dimensionamento de lotes (Jans e Degraeve, 2008), os autores reforçam esta questão, ressaltando que as integrações das decisões de dimensionamento de lotes e de sequenciamento constituem um desafio de investigação.

Xing e Zhang (2000) avaliam a complexidade computacional do problema de dimensionamento de lotes e sequenciamento integrados em máquinas paralelas idênticas, sem tempos de preparação, para vários objetivos frequentemente abordados na literatura, distinguindo os casos que se resolvem em tempo polinomial dos casos cuja resolução do problema é NP-difícil.

Em dois artigos de revisão sobre problemas de sequenciamento ((Zhu e Wilhelm, 2006) e (Allahverdi et al., 2008)) os autores referem que devem ser centrados esforços na investigação de problemas que considerem objetivos relacionados com a data de entrega dos produtos. Embora ambas as referências se centrem em problemas com custos e/ou tempos de preparação, constituem uma excelente base de informação sobre os trabalhos na área, quer ao nível de métodos de otimização quer ao nível de métodos heurísticos. Ambos os autores dividem a revisão de acordo com as configurações típicas em problemas de sequenciamento, considerando os casos de máquina única, máquinas paralelas. Para cada uma destas configurações Zhu e Wilhelm (2006) consideram uma secção onde abordam os trabalhos que integram as decisões de dimensionamento de lotes com as decisões de sequenciamento. Shim e Kim (2008) referem que embora existam vários artigos onde

sejam estudados problemas que consideram objetivos relacionados com o cumprimento de prazos de entrega, existem ainda poucos progressos ao nível do objetivo de minimização do atraso total em problemas de máquinas paralelas, exceto para alguns casos especiais de máquinas paralelas idênticas.

Embora existam algumas semelhanças entre o problema DLEMP e o problema clássico de sequenciamento de máquinas paralelas, no qual se pretende sequenciar um conjunto de n produtos independentes num conjunto de m máquinas paralelas com o objetivo de otimizar um ou mais critérios de desempenho, estes exibem duas importantes diferenças: (1) no problema DLEMP um dado produto pode ser dividido em vários lotes de menor dimensão, que podem ser processados em mais do que uma máquina simultaneamente, enquanto que no problema clássico de sequenciamento de máquinas paralelas os produtos não podem ser divididos nem interrompidos; e (2) no problema clássico de sequenciamento de máquinas paralelas os produtos são independentes entre si, ao passo que no problema DLEMP existem subitens associados aos produtos. Dois artigos de revisão, que abordam métodos heurísticos e métodos exatos para o problema clássico de sequenciamento de máquinas paralelas são: Cheng e Sin (1990) e Mokotoff (2001).

3.5. Problema Discreto de Dimensionamento de Lotes e Sequenciamento

Uma estratégia interessante adotada para integrar decisões de sequenciamento no problema de dimensionamento de lotes capacitado é subdividir os macroperíodos desse problema em microperíodos. Assim, tem-se o problema discreto de dimensionamento de lotes e sequenciamento (DLSP) (Arenales et al.). Neste problema, os períodos apresentam curta duração (turnos ou horas) e por isso ele é chamado *small bucket*. Outra característica desses problemas é a presença de restrições de produção “tudo ou nada”. Nestes microperíodos se pode produzir apenas um produto por período. Para tornar este problema mais realístico, decisões de produção “tudo ou nada” por período são eliminadas através da permissão de ocorrência de setup no decorrer do turno. Desse modo, tem-se a produção de mais de um produto em um único turno caracterizando o problema de dimensionamento de lotes com setup contínuo (CSLP) (Drexel & Kimms).

3.6. Modelos determinísticos de estoque

Hamdy A. Taha, (2008); trata dos modelos determinísticos de estoque sob o ponto de vista da demanda. O problema de estoques envolve fazer e receber pedidos de determinados tamanhos periodicamente. Sendo assim uma política de estoques visa definir quanto e quando solicitar a

produção de determinados produtos. A base para definir estes pontos é a minimização da função custo de estoque.

$$\begin{array}{ccccccccc} \text{Custo total de} & = & \text{Custo de} & + & \text{Custo de} & + & \text{Custo de} & + & \text{Custo} \\ \text{estoque} & & \text{compra} & & \text{preparação} & & \text{estocagem} & & \text{de falta} \end{array}$$

Um sistema de estoque pode ser baseado em revisão periódica (por exemplo, emitir pedidos toda semana ou todo mês), na qual novos pedidos são emitidos no início de cada período. Outra forma de gerir a reposição dos estoques é através da revisão contínua, onde um novo pedido é emitido quando o nível de estoque cai até certo patamar, o qual denomina-se por ponto de reabastecimento ou ponto de pedido.

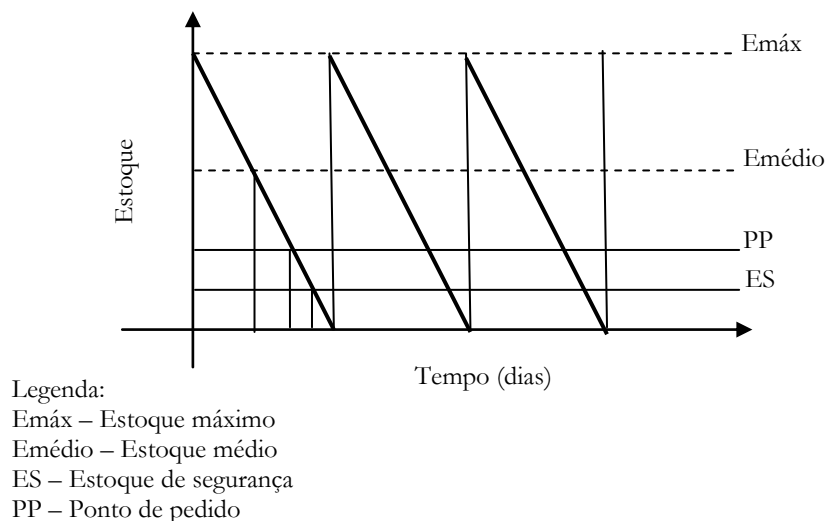


Figura 6: Gráfico representativo do estoque e ponto de reabastecimento.

Fonte: Imagem da Internet.

Em geral, a complexidade analítica dos modelos de estoque depende da demanda para um item ser determinística ou probabilística, podendo variar ou não ao longo do tempo.

3.7. Classificação e Reformulação

A estratégia de classificação dos problemas de dimensionamento de lotes multi-item em níveis de similaridade das formulações e restrições é de grande valia, visto que permite o direcionamento da pesquisa de acordo com o tipo de problema de dimensionamento de lotes que se tem. Além disso, a classificação destes problemas apresenta reformulações matemáticas e desigualdades válidas para problemas similares. Adição de desigualdades e de restrições

reformuladas são estratégias utilizadas no desenvolvimento deste trabalho. A classificação de certos problemas de dimensionamento de lotes permite que essa classe de problemas possa ser resolvida através de reformulações padrões, formulações estendidas, famílias de desigualdades válidas e bons solvers de Programação Inteira Mista. Para demonstrar a vantagem do uso de classificação e reformulação, Wolsey (2002) apresenta a descrição de três problemas multi itens. Estes problemas são classificados (segundo uma tabela que apresenta estudos mais importantes relacionados ao problema), reformulados e implementados para comparações de desempenho. A reformulação é de grande importância, pois permite que estes problemas práticos possam ser efetivamente resolvidos em softwares comerciais como XPRESS e CPLEX. Reformulações matemáticas de modelos de dimensionamento de lotes e sequenciamento incluindo tempos de preparação (*changeovers*) podem ser vistos em Wolsey (1997). Alguns trabalhos como o de Kamarkar & Schrage apresentam formulações alternativas para o problema de dimensionamento de lotes e sequenciamento. As reformulações matemáticas e desigualdades válidas adequadas ao modelo de dimensionamento de lotes e sequenciamento apresentam aproximações da envoltória convexa. Estas são originárias de modelos item-único (dos quais já se tem bastante conhecimento) e finalmente adaptadas a modelos multi-item. A decomposição de problemas multi-item em um conjunto de problemas item-único agregados por restrições de união faz com que a resolução desses problemas possa ser dada em softwares comerciais de Programação Inteira-Mista através de reformulações matemáticas e inserção de desigualdades válidas Wolsey (2002).

CAPÍTULO 4

Estudo de Caso: Planejamento da Produção dos blocos pré-moldados

4.1. Metodologia:

A pesquisa realizada é de natureza aplicada por ser dirigida à solução de um problema específico existente, com abordagem qualitativa e quantitativa, sendo realizada uma análise documental dos dados que servirão, a priori, como base para o estudo em questão; permitindo assim a proposição de um modelo adequado a uma possível solução do problema proposto.

A metodologia utilizada para o estudo desta dissertação tem como base as técnicas de Pesquisa Operacional (PO) que através de modelos hipotéticos desenvolvidos, abstrai-se o mundo real considerado da situação real, concentrando-se nas variáveis dominantes que controlam o comportamento do sistema real. O modelo expressa, de maneira tratável, as funções matemáticas que representam o comportamento do mundo real considerado.

A proposta do trabalho está dividida em duas partes principais:

- i) A modelagem do ambiente produtivo e das restrições que norteiam a dinâmica do PCP no dimensionamento e sequenciamento dos lotes;
- ii) Construção do modelo com base nos algoritmos para dimensionamento e sequenciamento dos lotes e sua avaliação.



Figura 7: Níveis de abstração no desenvolvimento do modelo.

Fonte: Livro: Pesquisa Operacional; Hamdy A. Taha; 8ª edição. Pág. 03; Editora Pearson Prentice Hall; São Paulo; 2008.

A estratégia de pesquisa utilizada para condução do trabalho foi o estudo de caso. As fases envolvidas neste processo são: definição e desenvolvimento do instrumento de pesquisa, coleta de dados, análise dos dados e divulgação dos resultados e conclusões.

Para a fase de definição e desenvolvimento do instrumento de pesquisa primeiramente foi necessário entender o problema, a empresa e o ambiente produtivo. O problema consiste em determinar o melhor tamanho e sequência de alocação dos lotes de produção em uma linha de prensagem que produz blocos de concreto pré-moldados, de modo a atender a demanda prevista sem atrasos ao menor custo possível. Para isso foram feitas entrevistas individuais e reuniões com o grupo foco composto por Técnicos e Engenheiros responsáveis pelo processo produtivo, para levantar os principais fatores que interferem no planejamento da produção. A coleta de dados foi feita tanto através de consultas ao banco de dados da empresa como também realizando estudos de tempos e métodos no processo produtivo e observações feitas durante a execução do trabalho de prensagem dos blocos. Um exemplo de estudo de tempos realizado pode ser visto no APÊNDICE A que mostra a cronometragem feita no processo de prensagem de um dos tipos de blocos pré-moldados produzidos na empresa estudada. O ANEXO D mostra a Instrução de trabalho (IT) formulada para padronizar o processo de prensagem dos blocos, garantindo assim a repetibilidade dos processos. Em seguida foram pesquisados trabalhos e publicações referentes ao assunto de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção que permitissem o desenvolvimento de um modelo matemático adequado à realidade encontrada. O trabalho abrange também o mapeamento da cadeia de valor (APÊNDICE B), permitindo assim uma visão sistêmica do fluxo do processo de produção e o melhor entendimento da dinâmica de programação e movimentação das ordens de produção, bem como da gestão dos estoques de produtos acabados.

4.2. Introdução

O processo de produção dos blocos é feito através do uso de uma linha de prensagem de blocos, atuando em dois turnos diários de 4 horas, durante cinco dias na semana. A mão de obra direta está dividida entre os setores de carregamento dos silos de agregados, prensagem, paletização e expedição, totalizando 30 colaboradores.

Cada tipo de produto possui uma matriz/molde específica bem como tempos de vibração/prensagem individuais, definidos de acordo com o formato do produto e a resistência mecânica desejada (dada em Mpa). Ao ser definido qual produto será produzido o encarregado de preparar o traço a ser feito, programa na central de controle de pesagem dos agregados qual o traço

será produzido para atender a demanda desejada e programada pelo PCP. A central lógica programável (CLP) controla a quantidade de cada insumo que será colocado no misturador e levado em seguida através de esteiras transportadoras até a prensa para serem prensados nos moldes. A cada troca de produto é necessário uma limpeza para retirada do excesso de material acumulado nos moldes e máquina, provenientes do processo de vibração sendo este considerando tempo de preparação ou *changeover*. Na troca é necessária também a mudança do molde que define a forma do produto, o que demanda elevado tempo de setup. Para o estudo em questão os tempos de preparação e setup serão considerados como um único tempo, denominado apenas de setup, para fins de modelagem do problema, uma vez que a troca de moldes de um produto para outro, que dura aproximadamente de 50 a 80 minutos, representa a maior parte do tempo total da troca e consiste num tempo consideravelmente oneroso no processo de produção, afetando a disponibilidade de hora/máquina, como veremos mais adiante na definição dos parâmetros e variáveis que delimitam o problema a ser modelado.

A empresa fabrica atualmente 79 variedades diferentes de produtos o que torna a modelagem um pouco mais complexa. Com base no banco de dados da empresa, que possui histórico de vendas, produção, estoque e faturamento mensal, foi possível realizar uma análise dos dados referentes ao volume de produção e frequência com que cada produto foi solicitado ao longo de um ano de produção. Os dados são apresentados nos ANEXOS A e B deste trabalho. O intuito desta análise é fazer uma distribuição de probabilidade de ocorrências de produção, e plotar um gráfico de volume x frequência (figura3) de modo a definir de que forma os produtos serão tratados em nossa programação, a saber, se serão produzidos para estoque (*MTS - make-to-stock*) ou se serão produzidos por pedido (*MTO - make-to-order*). Sendo assim o gráfico de dispersão foi dividido em quatro quadrantes, nos quais os produtos localizados nos quadrantes I e II apresentam alto volume e alta frequência (quadrante I) e alto volume e baixa frequência (quadrante II) e deverão ser estocados em maior quantidade para atender pedidos de pronta entrega (*MTS*); produtos de baixa frequência e baixo volume (quadrante III) e produtos que tem uma frequência alta porém um baixo volume (quadrante IV), sendo portanto produzidos em pequenos volumes conforme forem solicitados e que entrarão na programação para atender demandas reais (*MTO*).

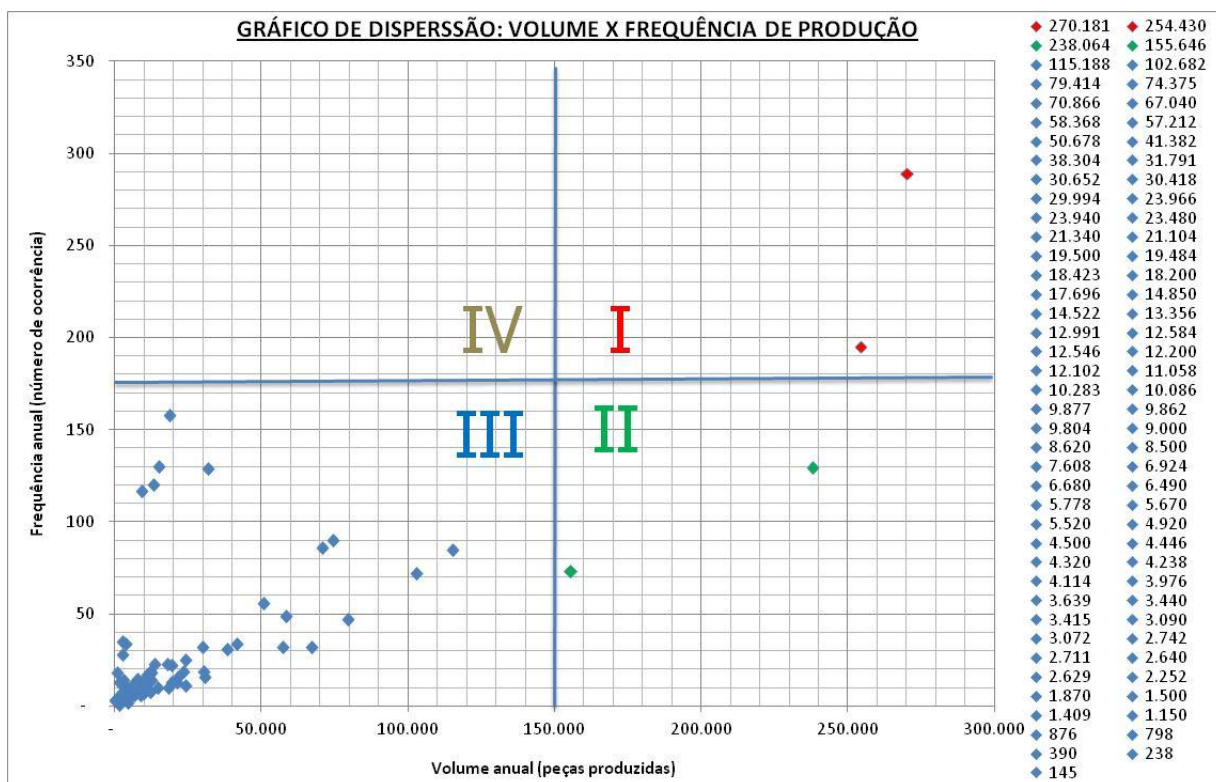


Figura 8: Gráfico de dispersão Volume x Frequência de produção.
 Fonte: Análise dos dados obtidos na empresa estudada.

O gráfico de dispersão acima está dividido em quatro quadrantes; nestes quadrantes estão distribuídos os artigos produzidos a partir do cruzamento dos dados de volume e frequência de produção; sendo assim nos quadrantes I e II são apresentados 4 produtos destacados em vermelho e verde, que correspondem a 5,1% do total de produtos do portfólio da empresa, porém representam 39,8% de todo o volume de produção anual, devido a sua demanda de volume considerável. Estes 4 produtos devem ser tratados como produtos de demanda e volume constantes e por isso necessitam de um estoque permanente para atender pedidos de pronta entrega. São produtos considerados *make-to-stock* (produzidos para estoque) segundo o conceito do *Lean Sistem* (Sistema de Manufatura Enxuta). Nesta categoria de produtos a demanda dos clientes será atendida pelo estoque atual e a programação e produção dos mesmos em máquina, serão feitas, a partir do modelo aqui proposto, para repor os estoques consumidos. Os demais produtos terão uma frequência de produção definida pela demanda real conforme forem solicitados pelos clientes, sendo estes programados e produzidos de acordo com o modelo a ser proposto e desenvolvido neste trabalho para atender diretamente os pedidos dos clientes.

Para a modelagem deste problema, optou-se por agrupar os blocos em quatro grupos, onde cada grupo é formado por produtos com características semelhantes tais como: tempo de produção, tempo de setup, volume e frequência das demandas, etc. Este agrupamento permitirá um menor

tempo computacional ao rodar o modelo a ser proposto o que facilitará a análise dos dados e obtenção de resultados mais satisfatórios.

4.3. Modelagem Matemática

Nesta etapa do projeto o objetivo é permitir a integração das decisões de planejamento a curto e médio prazos para o sequenciamento dos lotes de produção de cada produto a ser produzido e o atendimento das demandas dos clientes com custos de produção e estoque o menor possível. Sendo assim as premissas que delimitam a modelagem do problema tomarão como base a análise dos dados anteriormente apresentados, no que diz respeito a estoques mínimos, lotes de produção e sequenciamento propriamente dito. O modelo apresentado neste trabalho de dissertação foi adaptado do modelo proposto por Almeida (2009); implementado em uma fábrica de impressoras. Algumas variáveis foram suprimidas do modelo e outras adequadas a realidade encontrada na fábrica de blocos pré-moldados de concreto. As adaptações tem como base o CLSP aplicado a uma única linha de produção.

4.3.1. Parâmetros e Variáveis Utilizados

Considera-se $b=1,...,B$ tipos de blocos cujos lotes de produção devem ser sequenciados num horizonte de planejamento finito de $s=1,...,S$ semanas consideradas *macroperíodos*; que por sua vez são subdivididas em $t=1,...,T$ turnos, considerados *microperíodos*.

Será adotada a seguinte notação para caracterizar o problema:

Parâmetro tempo:

TUb - Tempo unitário de produção do bloco b em minutos;

TSb – Tempo de *setup* do bloco b em minutos;

Parâmetro custos:

CPb – Custo unitário de produção do bloco b em R\$;

CEb – Custo unitário de estocagem do bloco b em R\$;

CSb – Custo de *setup* do bloco b em R\$;

Parâmetros estoque, capacidade e demanda:

Elb – Estoque inicial do bloco b no início do planejamento em unidades;

ESb – Estoque de segurança para o bloco b em unidades;

Dbs – Demanda agregada do bloco b no macroperíodo s em unidades;

Kp – Capacidade disponível para produção de blocos em unidades;

Ks – Capacidade disponível no macroperíodo s em unidades;

LMb – Lote mínimo de produção do bloco b em unidades;

Variáveis de decisão:

Qbs – Quantidade de blocos b estocados ao final do macroperíodo s em unidades;

Xbt – Quantidade de blocos b produzidos no microperíodo t em unidades;

Ybt – Condição de *setup*: $Ybt = 1$ caso a prensa esteja preparada para produzir o bloco b no microperíodo t ; $Ybt = 0$ caso contrário;

4.4. Método exato PLM

O modelo proposto apresenta a seguinte formulação inicial:

$$\text{Minimize: } \sum_s^S \sum_b^B CE_b Q_{bs} + \sum_b^B \sum_t^T (CS_b y_{bt} + CP_b x_{bt}) \quad (0)$$

S.a:

$$.El_b + \sum_t^T x_{bt} = D_{bs} + Q_{bs} \quad s = 1, \forall b \in B \quad (1)$$

$$.Q_{bs-1} + \sum_t^T x_{bt} = D_{bs} + Q_{bs} \quad \forall s \in 2, \dots, S, \forall b \in B \quad (2)$$

$$.Q_{bs} \geq ES_b \quad \forall s \in S, \forall b \in B \quad (3)$$

$$.El_b + \sum_t^T \left(\frac{Kp}{TU_b}\right) Y_{bt} \geq D_{bs} \quad s = 1, \forall b \in B \quad (4)$$

$$.Q_{bs-1} + \sum_t^T (\frac{Kp}{TU_b}) Y_{bt} \geq D_{bs} \quad \forall s = S, b \in B \quad (5)$$

$$.EI_b \geq D_{bt}(1 - Y_{bt}) \quad \forall t \in 1, \dots, T, b \in B \quad (6)$$

$$.Q_{bt-1} \geq D_{bt}(1 - Y_{bt}) \quad \forall t \in 1, \dots, T, b \in B \quad (7)$$

$$.\sum_b^B \sum_t^T (TU_b x_{bt} + TS_b y_{bt}) \leq CP_{bs} \quad \forall s \in S, \quad (8)$$

$$.x_{bt} \geq LM_b(y_{bt} - y_{bt-1}) \quad \forall b \in B, t \in 2, \dots, T \quad (9)$$

$$.x_{bt} \leq Kp (y_{bt-1} - y_{bt}) \quad \forall s \in S, t \in T \quad (10)$$

$$.\sum_b^B TU_b x_{bt} + TS_b y_{bt} \leq Kp \quad \forall s \in S, t \in T \quad (11)$$

$$.\sum_b^B y_{bt} = 1 \quad t \in T \quad (12)$$

$$.Q_{bs} \geq 0, x_{bt} \in Z, y_{bt} \in \{0,1\}, \quad (13)(14)(15)$$

O objetivo do Modelo acima apresentado pela função objetivo (0) é minimizar os custos de produção, estoque, e setups. As restrições (1) e (2) são centrais em problemas de planejamento da produção; e determinam a conservação do fluxo de materiais ao longo do horizonte de planejamento. Por questões de imprevistos e busca de manutenção de um bom nível de serviço, determina-se através da restrição (3) que o estoque de segurança deve ser respeitado. As restrições (4) e (5) garantem o atendimento à demanda pela capacidade instalada. As restrições (6) e (7) determinam que o estoque restante do período predecessor deva suprir demanda de itens em microperíodos subsequentes até que se inicie a produção do item. A restrição (8) determina que o somatório dos tempos de produção, e de setup deve respeitar a capacidade disponível. A restrição (9) limita a quantidade mínima a ser produzida na linha por período caso ocorra o setup, ou seja, a preparação para manufatura de um novo produto. A restrição (10) caracteriza o CSLP apresentado em Drexel & Kimms e garante que a produção de um bloco pré-moldado em determinado período só pode ocorrer se a linha estiver preparada no início ou no final daquele período. Como mais de um tipo de bloco pode ser produzido por período, a restrição (11) é introduzida para manter a capacidade disponível por microperíodo dentro dos limites. Como ao final ou início de cada período a linha deve ser organizada e abastecida, esta relação é determinada através da restrição (12). As restrições (13), (14) e (15) determinam o domínio das variáveis.

4.4.1. Reformulação do modelo para ambientes com mais de uma linha de produção.

O modelo apresentado neste trabalho pode ser reformulado para acompanhar possíveis variações no cenário fabril, no que diz respeito a ampliação das linhas de prensagem dos blocos pré-moldados de forma a atender as demandas futuras quanto a ampliação do parque fabril. Sendo assim é possível incluir o índice $l=1,...,L$, representando o número de linhas de prensas disponíveis num horizonte de planejamento finito de $s=1,...,S$ semanas consideradas *macroperíodos*; subdivididas em $t=1,...,T$ turnos, considerados *microperíodos*.

Desta forma o modelo anteriormente apresentado pode ser reescrito como se segue:

$$\text{Minimize: } \sum_s^S \sum_b^B CE_b Q_{bs} + \sum_l^L \sum_b^B \sum_t^T (CS_{bl} y_{blt} + CP_{bl} x_{blt}) \quad (0)$$

S.a:

$$.EI_b + \sum_l^L \sum_t^T x_{blt} = D_{bs} + Q_{bs} \quad s = 1, \forall b \in B \quad (1)$$

$$.Q_{bs-1} + \sum_l^L \sum_t^T x_{blt} = D_{bs} + Q_{bs} \quad \forall s \in 2, \dots, S, \forall b \in B \quad (2)$$

$$.Q_{bs} \geq ES_b \quad \forall s \in S, \forall b \in B \quad (3)$$

$$.EI_b + \sum_l^L \sum_t^T \left(\frac{Kp_l}{TU_{bl}}\right) Y_{blt} \geq D_{bs} \quad s = 1, \forall b \in B \quad (4)$$

$$.Q_{bs-1} + \sum_l^L \sum_t^T \left(\frac{Kp_l}{TU_{bl}}\right) Y_{blt} \geq D_{bs} \quad \forall s = S, b \in B \quad (5)$$

$$.EI_b \geq D_{bk}(1 - \sum_l^L Y_{blk}) \quad \forall k \in 1, \dots, T, b \in S \quad (6)$$

$$.Q_{bk-1} \geq D_{bk}(1 - \sum_l^L Y_{blk}) \quad \forall k \in 1, \dots, T, b \in S \quad (7)$$

$$.\sum_b^B \sum_t^T (TU_{bl} x_{blt} + TS_{bl} y_{blt}) \leq CP_{bs} - \sum_t^T w_{stl} TM_l \quad \forall s \in S, \forall l \in L \quad (8)$$

$$.\sum_{t=1}^{t''} w_{stl} = 1 \quad s = 1, l = 1 \quad (9)$$

$$.\sum_{t=t''+1}^T w_{stl} = 1 \quad s = 1, l = 2 \quad (10)$$

$$.\sum_{t=1}^{t''} w_{stl} = 1 \quad s = 2, l = 1 \quad (11)$$

$$.\sum_{t=t''+1}^T w_{stl} = 1 \quad s = 2, l = 2 \quad (12)$$

$$.x_{blt} \geq LM_{bl}(y_{blt} - y_{blt-1}) \quad \forall b \in B, \forall l \in L, t \in 2, \dots, T \quad (13)$$

$$.x_{blt} \leq Kp_l(y_{blt-1} - y_{blt}) \quad \forall s \in S, \forall l \in L, t \in T \quad (14)$$

$$.\sum_b^B TU_{bl}x_{blt} + TS_{bl}y_{blt} \leq Kp_l \quad \forall s \in S, \forall l \in L, t \in T \quad (15)$$

$$.\sum_b^B y_{blt} = 1 \quad \forall l \in L, t \in T \quad (16)$$

$$.Q_{bs} \geq 0, x_{blt} \in Z, y_{blt} \in \{0,1\}, w_{stl} \in \{0,1\} \quad (17)(18)(19)(20)$$

O objetivo do Modelo acima apresentado pela função objetivo (0) é minimizar os custos de produção, estoque, e setups em várias linhas idênticas e simultâneas que produzem os mesmos produtos e com produtividades relativamente iguais. Se os custos de produção forem idênticos nas linhas ($CP_{bl} = CP_b \quad \forall l, b$), o custo total de produção se torna irrelevante e pode ser descartado da função objetivo.

Além do índice l é possível incluir também restrições relativas a ocorrência de manutenção preventiva nas linhas. Tais restrições são apresentadas em (9), (10), (11) e (12) (20) e estabelecem a ocorrência de uma manutenção preventiva por linha dentro de um período pré-determinado.

O estudo a que se propõe esta dissertação concentra-se na análise de apenas uma linha de produção com setup elevado, por onde são produzidos os blocos pré-moldados de concreto. Sendo assim, como dita anteriormente, a reformulação apresentada acima se justifica apenas para fins de simulação de novos ambientes onde há possibilidade de rodar mais de uma linha de produção; o que não está nos planos de curto e médio prazo da empresa estudada.

4.5. Obtenção dos dados para aplicação prática do modelo

Nesta etapa apresenta-se o exemplo de uma situação real de planejamento da produção onde 04 tipos diferentes de blocos devem ter seus lotes simultaneamente dimensionados, alocados e sequenciados na linha de prensagem.

Os resultados propostos são comparados com a atual estratégia de planejamento de produção da empresa estudada. Os dados apresentados foram coletados com engenheiros, gerentes e técnicos responsáveis pelo planejamento da produção e através de consulta a documentos existentes na empresa. O tempo unitário de produção (Tabela 2) foi obtido através da análise dos ciclos de prensagem de cada família de produtos, onde o tempo de ciclo médio dividido pela quantidade de blocos na bandeja, representa o tempo de produção de cada unidade. Os tempos de ciclo médio de cada produto foram obtidos através de estudos de tempos e métodos (cronoanálise) realizados na empresa.

Tabela 2: Tempo unitário de produção do bloco tipo b

Tipo de bloco	Tempo de ciclo médio (segundos)	Tempo unit. (segundos.)
BLOCO	21,53 segundos	5,38 segundos
MEIO BLOCO	22,78 segundos	2,85 segundos
PAVER	14,25 segundos	1,29 segundos
OUTROS	20,81 segundos	1,04 segundos

Fonte: Estudos de cronoanálise feitos na empresa

Como a empresa estudada não apresenta os custos de estocagem de forma detalhada estima-se aqui o custo unitário de estocagem (Tabela 4) como sendo aproximadamente 5% dos custos unitários de produção (Tabela 3).

Tabela 3: Custo unitário de produção do bloco tipo b

Tipo de bloco	Custo de produção (R\$)
BLOCO	2,27
MEIO BLOCO	1,29
PAVER	0,69
OUTROS	0,50

Fonte: Banco de dados da empresa

Tabela 4: Custo unitário de estocagem do bloco tipo b

Tipo de bloco	Custo de estocagem (R\$)
BLOCO	0,11
MEIO BLOCO	0,06
PAVER	0,03
OUTROS	0,03

Fonte: Banco de dados da empresa

O setup ocorre no momento da troca de produto, onde uma nova matriz é colocada na prensa para produção de outro artigo. Dessa forma, é necessário um determinado tempo para a troca da matriz e preparação de um novo traço no misturador. Ocorrências de setups reduzem a capacidade total disponível para produção no período.

Tabela 5: Tempo de setup do bloco tipo b

Tipo de bloco	Tempo de setup (minutos)
BLOCO	80 minutos
MEIO BLOCO	78 minutos
PAVER	55 minutos
OUTROS	50 minutos

Fonte: Estudos de cronoanálise feitos na empresa.

O custo de setup (Tabela 6) foi estimado como sendo o custo de oportunidade de produzir blocos por um período proporcional ao tempo de setup. Estes valores foram obtidos através da multiplicação do custo unitário de produção com a quantidade de produtos que poderiam ser produzidos no período equivalente ao setup.

Tabela 6: Custo de setup do bloco tipo b

Tipo de bloco	Custo de manutenção (R\$)
BLOCO	R\$ 2.025,00
MEIO BLOCO	R\$ 2.118,00
PAVER	R\$ 1.765,00
OUTROS	R\$ 1.442,00

Fonte: Análise dos dados obtidos na empresa.

Para fins de simulação, os dados de demanda apresentados (Tabela 7) representam uma média histórica dos pedidos ao longo de um ano de produção, e devem ser alocada no macro e microperíodos de produção, afim de que os prazos acordados sejam cumpridos.

Tabela 7: Demanda projetada do bloco tipo b no macroperíodo s

Tipo de bloco	Semana 01	Semana 02
BLOCO	6.750	7.500
MEIO BLOCO	13.500	16.250
PAVER	30.500	27.500
OUTROS	2.250	2.750

Fonte: Estudos de cronoanálise feitos na empresa.

Os dados de capacidade no microperíodo (Tabela 8) foram ajustados através da multiplicação da produtividade real pela capacidade nominal de cada linha de manufatura no microperíodo t .

Tabela 8: Capacidade produtiva do bloco tipo b no microperíodo t .

Tipo de bloco	Capacidade/turno
BLOCO	2.667
MEIO BLOCO	5.000
PAVER	10.000
OUTROS	13.333

Fonte: Estudos de cronoanálise feitos na empresa.

A capacidade do macroperíodo (Tabela 9) foi calculada multiplicando a capacidade do turno por cinco dias da semana. Por questões estratégicas não foi considerando a manutenção da linha de manufatura durante o período produtivo. Esta manutenção é feita nos períodos entre os turnos, no fim do dia e aos sábados, de forma que a capacidade de produção nos micro e macroperíodos não sejam afetadas.

Tabela 9: Capacidade produtiva do bloco tipo b no macroperíodo s .

Tipo de bloco	Capacidade/semana
BLOCO	26.670
MEIO BLOCO	50.000
PAVER	100.000
OUTROS	133.330

Fonte: Estudos de cronoanálise feitos na empresa.

O lote mínimo de produção (Tabela 10) é uma estratégia utilizada pela empresa para se valer do conceito de economia de escala. Esta restrição faz com que a ativação de uma linha possa ser recompensada por uma produção mínima. O lote mínimo equivale a 1 hora de produção que é suficiente para produzir mais de 1 pallet fechado do produto programado naquela hora.

Tabela 10: Lote mínimo de produção do bloco tipo b.

Tipo de bloco	Lote mínimo (unidades)
BLOCO	668 blocos
MEIO BLOCO	1.263 blocos
PAVER	2.791 blocos
OUTROS	3.462 blocos

Fonte: Estudos feitos com base no histórico de vendas de cada bloco nos anos de 2011 e 2012.

O estoque de segurança (Tabela 11) previne que pedidos de última hora, ou alterações dos pedidos possam levar ao não atendimento da demanda e comprometer a imagem da empresa e perda de clientes.

Tabela 11: Estoque de segurança para o bloco tipo b.

Tipo de bloco	Estoque de segurança
BLOCO	2.677 blocos
MEIO BLOCO	5.053 blocos
PAVER	11.163 blocos
OUTROS	13.846 blocos

Fonte: Estudos feitos com base no histórico de estoques de cada bloco nos anos de 2011 e 2012.

4.6. Resultados Obtidos – Implementação do modelo na empresa

Nesse tópico é apresentado o tamanho e alocação ótima de lotes na linha de manufatura determinados pelo modelo de dimensionamento de lotes e sequenciamento em uma linha de prensagem com tempos de setup altos, demanda e horizonte de planejamento conhecidos. O plano de produção se apresenta dentro da capacidade, ou seja, estão sendo descontados os tempos de set-ups.

O resultado fornece um plano integrado de produção e relaciona decisões de nível tático, (como por exemplo, o quanto produzir e estocar em cada semana ou mês) e nível operacional (como por exemplo, qual o tamanho de lote e sequência de cada tipo de bloco programado). Foram realizados testes computacionais considerando o micro período como sendo um período equivalente a um turno de produção, ou seja, 4 horas. Como a fábrica funciona em 2 turnos por dia de segunda a sexta, tem-se 10 turnos por semana. A semana é considerada como tendo 10 turnos. O modelo, portanto, busca determinar o planejamento de 1 semana de produção, ou seja, 10 turnos.

Para rodar o modelo foi utilizado um computador com processador Intel Core 2 Duo, 2GB de memória RAM 667 MHz DDR2 usando o software CPLEX em ambiente LINUX.

Utilizando-se dos dados coletados na empresa foi possível montar um plano de produção, onde a sequência e o tamanho dos lotes dos blocos pode ser definido. Este plano considera os dados de estoque inicial e demanda, bem como as capacidades. Apresentam-se aqui, portanto a quantidade agregada a ser produzida por tipo de bloco e a quantidade estocada, respeitando os estoques mínimo e de segurança por produto ao longo da semana. Para demonstrar a manutenção ótima do estoque dos produtos produzidos serão realizados planos de produção para duas semanas, onde a primeira mostra o estoque inicial até então não controlado de forma adequada, sendo consumido ao longo da primeira semana, e na segunda semana este estoque sendo regulado pelas restrições de estoques mínimo e de segurança para cada grupo de produtos. Os planos de produção das semanas subsequentes tendem a manter os níveis de estoque regulares devido as restrições aplicadas ao modelo.

Tabela 12: Plano macro de produção para a semana 1.

Tipo de bloco	Estoque Inicial	Produção	Demanda	Estoque Final
BLOCO	5.500	4.000	6.750	2.750
MEIO BLOCO	7.800	11.250	13.500	5.550
PAVER	350	42.500	30.500	12.350
OUTROS	0	16.667	2.250	14.417

Fonte: Dados de entrada e saída do modelo após testes.

Tabela 13: Plano macro de produção para a semana 2.

Tipo de bloco	Estoque Inicial	Produção	Demanda	Estoque Final
BLOCO	2.750	7.333	7.500	2.583
MEIO BLOCO	4.050	17.500	16.250	5.300
PAVER	12.350	27.500	27.500	12.350
OUTROS	14.417	3.333	2.750	15.000

Fonte: Dados de entrada e saída do modelo após testes.

Um plano agregado de produção é detalhado a nível operacional nas tabelas 14 e 15; onde são apresentados os dados relativos a decisões de alocação e sequência de produção dos blocos na linha de manufatura para cada dia da semana e entre os dois turnos de produção, como também decisões de dimensionamento dos lotes de produção respeitando a capacidade limitada.

Tabela 14: Plano e sequencia de produção detalhado da semana 1.

	Dia da semana	Turno	Sequência/tipo de bloco	Quantidade a ser Produzido
SEMANA 01	Segunda –feira	Turno 01	Bloco tipo 3	10.000
		Turno 02	Bloco tipo 3	10.000
	Terça –feira	Turno 01	Bloco tipo 3	10.000
		Turno 02	Bloco tipo 3	10.000
	Quarta-feira	Turno 01	Bloco tipo 3+4	2.500 + 6.667
		Turno 02	Bloco tipo 4	10.000
	Quinta-feira	Turno 01	Bloco tipo 2	5.000
		Turno 02	Bloco tipo 2	5.000
	Sexta-feira	Turno 01	Bloco tipo 2+1	1.250 + 1.333
		Turno 02	Bloco tipo 1	2.667

Fonte: Dados de saída do modelo após testes.

O plano de produção da semana 2 abaixo, apresenta a manutenção do estoque regulada pela restrição de estoque mínimo e estoque de segurança para cada grupo de produtos como afirmado anteriormente.

Tabela 15: Plano e sequencia de produção detalhado da semana 2.

	Dia da semana	Turno	Sequência/tipo de bloco	Quantidade a ser Produzido
SEMANA 02	Segunda –feira	Turno 01	Bloco tipo 4+2	3.333 + 2500
		Turno 02	Bloco tipo 2	5.000
	Terça –feira	Turno 01	Bloco tipo 2	5.000
		Turno 02	Bloco tipo 2	5.000
	Quarta-feira	Turno 01	Bloco tipo 3	7.500
		Turno 02	Bloco tipo 3	10.000
	Quinta-feira	Turno 01	Bloco tipo 3	10.000
		Turno 02	Bloco tipo 1	2.000
	Sexta-feira	Turno 01	Bloco tipo 1	2.667
		Turno 02	Bloco tipo 1	2.667

Fonte: Dados de saída do modelo após testes.

A tabela 16 abaixo mostra o comparativo de estoque antes e depois da aplicação do modelo, onde é possível perceber que após o modelo o estoque de produto acabado passa a ser regulado e mantido em valores ótimos devido à restrição de estoque de segurança e mínimo apresentados no modelo.

Tabela 16: Comparativo de estoque atual e após aplicação do modelo.

Tipo de bloco	Estoque Inicial	Estoque Final
BLOCO	5.500	2.583
MEIO BLOCO	7.800	5.300
PAVER	350	12.350
OUTROS	0	15.000

Fonte: Dados de saída do modelo após testes.

4.6.1. Análise dos Resultados

Os dados obtidos após o teste nos permitem avaliar os níveis de estoque anterior e posterior a aplicação do modelo, de forma que os custos de estocagem possam ser comparados conforme Tabela 17 abaixo.

Tabela 17: Comparativo de custos do estoque atual e após aplicação do modelo.

Tipo de bloco	Custo de estocagem (R\$)	Custo estoque Inicial (R\$)	Custo estoque após o teste (R\$)
BLOCO	0,11	605	284
MEIO BLOCO	0,06	468	318
PAVER	0,03	11	371
OUTROS	0,03	-	450
Total		1.084	1.423

Fonte: Dados de saída do modelo após testes.

Após o teste realizado e com base nos números acima, é possível notar que para os grupos de artigos denominados Bloco e o Meio Bloco que possuem maior custo unitário de estocagem, houve uma redução de 53% e 32% respectivamente no custo de estocagem ao final da segunda semana,

quando os estoques foram regulados pelas restrições propostas. Quanto aos outros dois grupos de produtos, o estoque inicial apresentava-se comprometido, devido ao estoque baixo ou até mesmo a falta de produtos acabados para atendimento de pedidos de pronta entrega. Apesar de o custo total após a aplicação do modelo ter sido maior que o anterior; percebe-se aqui que as restrições de estoque mínimo e de segurança que limitam o modelo, permitiram a manutenção dos estoques em níveis seguros, de modo que o atendimento dos pedidos não fosse comprometido e os custos de estocagem fossem conhecidos e controlados. Os produtos de maior valor agregado e de maior custo de estocagem foram mantidos em níveis mais baixos, ocupando menos espaço físico no pátio de armazenamento e diminuindo o capital imobilizado com estoques excedentes destes grupos de produtos.

CAPÍTULO 5

Conclusões

O presente estudo visou melhorar o planejamento e programação da produção em uma fábrica de produtos pré-moldados de concreto, através da resolução de um problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção utilizando técnicas de pesquisa operacional. Efetuou-se um estudo sobre o processo atual e quais suas possíveis oportunidades de melhorias que deram abertura para o desenvolvimento deste trabalho. O problema resolvido envolveu a minimização dos custos operacionais, ou seja, de produção, de setup, de atraso na entrega de produtos e de estocagem. As características da operação incluíam tempos e custos de setup elevados e diferentes entre produtos, O backlogging não é permitido, ou seja, a demanda deve ser atendida no prazo.

O processo de manufatura foi modelado pelo problema de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção por se perceber a importância do problema e se verificar ganhos de eficiência ao tratar problemas complexos.

Os dados coletados e usados para testar o modelo apresentaram resultados coerentes com a realidade encontrada na empresa e mostrou-se consistente no que diz respeito a definição da sequencia e dimensão dos lotes de cada produto programado. Foi percebido por parte dos responsáveis pela programação dos produtos uma maior segurança e precisão nos dados obtidos, além da garantia de que os níveis de estoque podem ser melhor controlados com este recurso.

O plano resultante foi apresentado e comparado com a prática atual. Melhorias em produtividade e redução de custos foram evidenciadas. Além de aumentar a qualidade de planejamento, o novo plano de produção reduz à zero o número de atrasos de pedidos. O controle permanente e contínuo do plano de produção é vital na implantação prática deste.

Um sistema de planejamento da produção deste tipo é vantajoso, uma vez que auxilia a produção a responder questões relacionadas à: decisão relativa à instalação ou não de novos equipamentos em linhas de manufatura, levando em consideração as capacidades instaladas; decisões relativas à ativação ou não de linhas; decisões sobre o acúmulo ou não de estoques para se fazer mudanças estruturais; decisões sobre o quanto e quando produzir, estocar, além de se permitir que se façam análises de sensibilidade.

Pode-se dizer, portanto, que o objetivo do trabalho foi alcançado. O problema identificado na empresa foi resolvido através de métodos e técnicas científicas. Uma futura implementação do

presente estudo trará contribuições com relação a forma como se planeja e programa a produção atualmente na empresa, trazendo maior segurança, e confiabilidade nas tomadas de decisão.

O objetivo de desenvolver formulações matemáticas deste porte é permitir que este problema, considerado complexo, possa ser resolvido por otimizadores de mercado baseados em programação matemática. No caso de planejamento da produção, o modelo de otimização permite a geração de vários cenários através da alteração da estrutura de dados. Isto é de importância estratégica a gerentes de produção que necessitam entender o comportamento do sistema produtivo à medida que a realidade muda.

5.1. Proposta de trabalhos futuros:

A partir do modelo apresentado neste trabalho de dissertação é possível simular novos cenários, com mais produtos, linhas de manufatura e turnos, possibilitando aos usuários enxergarem situações distintas que auxiliem na tomada de decisão estratégica de crescimento da empresa.

No problema apresentado pôde-se comprovar na prática que problemas integrados de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção são de difícil resolução por métodos exatos, dada sua forte natureza combinatória. No entanto, outros trabalhos podem ser desenvolvidos aplicando-se heurísticas em sua resolução, obtendo-se assim soluções de boa qualidade a tempos computacionais razoáveis.

Recomenda-se como evolução deste trabalho o desenvolvimento de um aplicativo com interface gráfica para o usuário, o que é estratégico para a empresa, pois permite que gestores de planejamento possam utilizar a ferramenta de forma satisfatória.

Referências bibliográficas:

- ALMEIDA, JOÃO FLÁVIO DE FREITAS. Planejamento da Produção de Impressoras por Dimensionamento de Lotes e Sequenciamento: um estudo de caso. Dissertação apresentada à escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção. Belo horizonte – mg. 19 de março de 2009
- ARAÚJO, S. A.; ARENALES, M. N. Problema de Dimensionamento de Lotes Monoestágio com Restrição de Capacidade: Modelagem, Método de Resolução e Resultados Computacionais. Pesquisa Operacional, 2003, v. 23, n. 3, p. 403-420.
- ARAUJO, S. A.; ARENALES, M. N.; CLARK, A. R. Dimensionamento de lotes e programação do forno numa fundição de pequeno porte. Gestão & Produção, 2004, v. 11, n. 2, p. 165-176.
- BAHL, H. C., RITZMAN, L. P., & GUPTA, J. N. D. Determining lot sizes and resource requirements: A review. Operations Research, 1987. 35(3), 329–345.
- BERNARDES, ARAUJO E RANGEL. Reformulação para um problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes. Dep. de Ciências da Computação e Estatística Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas UNESP-Univ. Estadual Paulista São José do Rio Preto – SP 2010
- BOMBERGER, E .A dynamic programming approach to a lot scheduling problem. Management Science, 1966. 12, 778–784.
- BRAHIMI, N., DAUZERE-PERES, S., NAJID, N. M., & NORDLI, A. Single item lot sizing problems. European Journal of Operational Research, 168(1), 1–16. doi:10.1016/j.ejor.2004.01.054.
- CARINA MARIA OLIVEIRA PIMENTEL. Modelos e Métodos para Problemas de Dimensionamento de Lotes e Sequenciamento. Programa Doutoral em Engenharia Industrial e de Sistemas. Universidade do Minho/Escola de Engenharia. Dezembro de 2010
- CHRISTIAN ALMEDER. A hybrid optimization approach for multi-level capacitated lot-sizing problems University of Vienna, Department of Business Administration, Bruenner Strasse 72, 1210 Vienna, Austria. European Journal of Operational Research 200 (2010) 599–606
- DE BODT, M. A., GELDERS, L. F., & VAN WASSENHOVE, L. N. Lot sizing under dynamic demand conditions: A review. Engineering Costs and Production Economics, 1984. 8, 165–187. doi:10.1016/ 0167-188X(84)90035-1.
- DREXL, A., & KIMMS, A. Lot sizing and scheduling-survey and extensions. European Journal of Operational Research, 1997. 99, 221– 235. doi:10.1016/S0377-2217(97)00030-1.
- ELMAGHRABY, S. E. The economic lot scheduling problem (ELSP): Review and extensions. Management Science, 1978. 24(6), 587– 598.
- GUPTA, D., MAGNUSSON, T. The capacitated lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent set-up times. Computers & Operations Research, 2005, v.32, p.727-747.

- HAX, A.; CANDEA, D. Production and inventory management. New Jersey: Prentice-Hall; Englewood Cliffs, 1984.
- HUNG, Y.-F., & CHIEN, K.-L. Multi-class multi level capacitated lot sizing model. *The Journal of the Operational Research Society*, 2000. 51(11), 1309–1318.
- IKOU KAKU, ZHAOSHI LI ,CHUNHUI XU. An Effective Heuristic Algorithm based on Segmentation for Solving a Multilevel Lot-sizing Problem Department of Management Science and Engineering, Akita Prefectural University, Yulihonjo, Japan. 2007.
- JANS, R., & DEGRAEVE, Z. Meta-heuristics for dynamic lot sizing: A review and comparison of solution approaches. *European Journal of Operational Research*, 2007. 177(3), 1855–1875. doi:10.1016/j.ejor. 2005.12.008.
- JANS, R., & DEGRAEVE, Z. Modeling industrial lot sizing: A review. *International Journal of Production Research*, 2008. 46(6), 1619– 1643. doi:10.1080/00207540600902262.
- KÄMPF, M., & KÖCHEL, P. Simulation-based sequencing and lot size optimization for a production-and-inventory system with multiple items. *International Journal of Production Economics*, 2006. 104(1), 191–200. doi:10.1016/j.ijpe.2006.02.008.
- KARIMI, B., GHOMI, FATEMI, S. M. T., & WILSON, J. M. The capacitated lot sizing problem: A review of models and algorithms. *Omega*, 2003. 31, 365–378. doi:10.1016/S0305-0483(03)00059-8.
- KARIMI, B., GHOMI, FATEMI, S. M. T., & WILSON J. M. A tabu search heuristic for solving the CLSP with backlogging and setup carryover. *The Journal of the Operational Research Society*, 2006. 57(2), 140–147.
- KIRCA, O., & KOKTEN, M. New heuristic approach for the multiitem dynamic lot sizing problem. *European Journal of Operational Research*, 1994. 75(2), 332–341. doi:10.1016/0377-2217(94)90078-7.
- KUIK, R., SALOMON, M., & VAN WASSENHOVE, L. N. Batching decisions: Structure and models. *European Journal of Operational Research*, 1994 75, 243–263. doi:10.1016/0377-2217(94)90072-8.
- KUO, H., & INMAN, R. A practical heuristic for the group technology economic lot scheduling problem. *International Journal of Production Research*, 28, 1990. 709–722. doi:10.1080/00207549008942750.
- MAES, J; van WASSENHOVE, L. N. Multi-item single-level capacitated dynamic lot-sizing heuristics: a general review. *Journal of the Operational Research Society*, 1988. v. 39, p. 991-1004.
- MEYR, H. Simultaneous lot sizing and scheduling by combining local search with dual reoptimization. *European Journal of Operational Research*, 2000. v. 120, p. 311-326.
- MEYR, H. Simultaneous lot-sizing and scheduling on parallel machines, *European Journal of Operational Research*, 2002, v.139, p.277-292.

MARIÁ C.V. NASCIMENTO, MAURICIO G.C. RESENDE , FRANKLINA M.B. TOLEDO). GRASP heuristic with path-relinking for the multi-plant capacitated lot sizing problem . Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brazil. Algorithms and Optimization Research Department, AT&T Labs Research, 180 Park Avenue, Florham Park, USA. 2009.

OZDAMAR, L., BIRBIL, S. I., & PORTMANN, M. C. Technical note: New results for the capacitated lot sizing problem with overtime decisions and setup times. *Production Planning and Control*, 2002.13, 2–10. doi:10.1080/09537280110049272.

OZDAMAR, L., & BOZYEL, M. A. Capacitated lot sizing problem with overtime decisions and setup times. *IIE Transactions*, 2000 32(11), 1043–1057. Institute of Industrial Engineers.

PITAKASO, R., ALMEDER, C., DOERNER, K. F., & HARTL, R. F. A MAX-MIN ant system for unconstrained multi level lot-sizing problems. *Computers & Operations Research*, 2007. 34(9), 2533–2552. doi:10.1016/j.cor.2005.09.022.

TAMÁS KIS AND ANDRÁS KOVÁCS. Exact solution approaches for bilevel lot-sizing January 9, 2012.

TAHA, HAMDY A. Operation research: an introduction. – Pesquisa Operacional: uma revisão geral; 8ª edição, São Paulo, Pearson Prentice Hall, 2008

TEMPELMEIER, H., & HELBER, S. Heuristic for dynamic multi-item multi-level capacitated lot sizing for general product structures. *European Journal of Operational Research*, 1994. 75(2), 296–311. doi:10. 1016/0377-2217(94)90076-0.

TOSO, ELI ANGELA VITOR. Dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção na indústria de suplementos para nutrição animal - São Carlos – UFSCAR – 2008 – 191f

TOSO E MORABITO. Otimização no Dimensionamento e Seqüenciamento de Lotes de Produção: estudo de caso numa fábrica de rações – *Revista Gestão e Produção*.12, n.2, p.203-217, mai.-ago. 2005

YIYONG XIAO, IKOUKAKU, QIUHONG ZHAO, RENQIAN ZHANG. Neighborhood search techniques for solving uncapacitated multilevel lot-sizing problems. *Computers & Operations Research* 39 .2012. 647–658

WAGNER, H. M., & WHITIN, T. M. Dynamic version of the economic lot size model. *Management Science*, 1958. 5(1), 89–96.

WOLSEY, L. A. MIP modeling of changeovers in production planning and scheduling problems. *European Journal of Operational Research*, 1997, v.99, 1544-1565.

WOLSEY, L.A. Integer Programming. Wiley-Interscience. New York, 1998.

WOLSEY, L. A. Solving Multi-Item Lot-sizing problems with MIP Solver using classification and reformulation. *Management Science*, 2002, v.12, p.1587 a 1602.

ANEXO A – Publicações baseadas no problema de dimensionamento de lotes de 2000 à 2012.

Tabela 1: Publicações na literatura baseadas nas especificações do problema												
Literatura revisada	Número de níveis		Capacidade	Tempo de setup existente	Horizonte de planejamento			Tipo de Demanda		Atrasos		
	Único nível	Multi nível			Tempo de setup existente	Infinito	Finito	Rolante	Tipo de Demanda			
									Determinístico		Dinâmico	
Ozdamar & Bozyl (2000)	*		*	*		*			*			
Dellaert & Jeunet (2000)		*				*			*			
Dellaert et al. (2000)		*				*			*			
Hung and Chien (2000)		*	*	*		*			*		*	
Prasad & Chetty (2001)		*				*	*		*			
Sarker & Newton (2002)	*		*		*	*			*			
Ozdamar et al. (2002)	*		*	*		*			*			
Moon et al. (2002)	*		*	*	*	*			*			
Xie & Dong (2002)		*	*	*		*			*			
B. Karimi et al. (2003)	*		*			*			*			
Araujo et al. (2003)	*		*			*	*		*			
Nadjib Brahimi (2004)	*		*			*			*			
Toso e Morabito (2004)	*		*	*		*			*		*	
Almeder, Doerner e Hartl (2004)		*				*			*		*	
Duda (2005)	*		*	*		*			*			
Yao & Huang (2005)	*		*	*		*			*			
Hop & Tabucanon (2005)	*		*			*			*			
Chang et al. (2006)	*		*	*		*			*			
Kämpf & Köchel (2006)	*		*	*		*			*	*	*	
Megala & Jawahar (2006)	*		*	*		*			*		*	
Moon et al. (2006)	*		*	*		*	*		*		*	
Gaafar (2006)	*		*			*			*			
Li et al. (2007)	*		*			*			*			
Chatfield (2007)	*		*	*		*			*			
Jung et al. (2007)		*	*			*			*			
Ikou Kaku & Zhao Shi Li (2007)		*	*			*	*		*			
Jans & Degraeve (2008)	*		*			*			*			
Toso (2008)	*		*	*		*			*			
Mariá C.V. Nascimento (2009)	*		*			*	*		*			
Almeder (2009)		*	*			*			*			
Bernardes, Araujo & Rangel (2010)	*		*	*		*	*		*		*	
Pimentel (2010)	*		*	*	*	*			*			
Ullah & Parveen (2010)	*		*	*	*	*	*		*	*	*	
Yiyong Xiao (2011)		*	*	*		*	*		*			
Tamás Kis & András Kovács (2012)		*	*	*		*	*		*		*	

Fonte: Adaptação do artigo de Hacer, Tunali (2008).

ANEXO B – Frequência de ocorrência de produção de cada produto ao longo de um ano.

Contar de QUANTIDADE	Rótulos de Coluna												
Rótulos de Linha	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total geral	
BLOCO VEDAÇÃO 14x19x39 - 2 MPa	9	7	38	17	20	43	53	21	26	30	25	289	
BLOCO ESTRUTURAL 14x19x39 - 4 MPa	37	25	3	10	22	26	30	13	11	15	3	195	
PAVER RETANGULAR NATURAL 10x20x08 - 35 MPa	7	-	1	36	4	9	24	31	9	16	21	158	
PAVER RETANGULAR NATURAL 10x20x06 - 35 MPa	1	2	21	8	5	11	10	29	18	19	6	130	
MEIO-FIO 30x65x12 - 15 Mpa	5	15	20	7	5	10	7	17	19	17	7	129	
BLOCO VEDAÇÃO 09x19x39 - 2 MPa	9	15	13	14	5	15	14	11	11	17	5	129	
PAVER RETANGULAR NATURAL 10x20x4,5 - 25 MPa	3	15	12	12	8	6	9	9	15	13	18	120	
PAVER 16 FACES NATURAL 13x24,2x08 - 35 MPa	12	-	1	-	-	-	8	-	12	34	50	117	
CANALETA DE VEDAÇÃO 14x19x39 - 2 MPa	6	19	11	3	1	8	5	13	11	5	8	90	
BLOCO VEDAÇÃO 19x19x39 - 2 MPa	-	-	31	25	14	11	1	-	1	3	-	86	
BLOCO ESTRUTURAL 14x19x39 - 8 MPa	14	18	17	10	12	14	-	-	-	-	-	85	
BLOCO VEDAÇÃO 11,5x19x39 - 2 MPa	-	-	4	5	10	5	10	14	13	5	7	73	
BLOCO ESTRUTURAL 14x19x39 - 6 MPa	-	8	5	13	26	13	7	-	-	-	-	72	
CANALETA ESTRUTURAL 14x19x39 - 4 MPa	11	9	1	6	5	8	6	5	-	5	-	56	
BLOCO ESTRUTURAL 14x19x39 - 10 MPa	18	17	1	7	6	-	-	-	-	-	-	49	
MEIO BLOCO VEDAÇÃO 09x19x19 - 2 MPa	1	4	1	3	2	9	6	2	5	6	8	47	
PAVER 16 FACES NATURAL 13x24,2x06 - 35 MPa	19	1	-	-	-	8	5	2	-	-	-	35	
BLOCO ESTRUTURAL 14x19x34 - 4 MPa	3	6	-	2	2	7	5	3	3	2	1	34	
PAVER RETANGULAR AMARELO 10x20x4,5 - 25 MPa	-	1	3	-	5	1	10	10	3	1	-	34	
COMPENSADOR 09x19x04 - 2 MPa	2	1	1	-	1	4	5	2	5	6	5	32	
MEIO BLOCO VEDAÇÃO 14x19x19 - 2 MPa	1	1	1	3	1	7	6	1	1	-	10	32	
COMPENSADOR 09x19x09 - 2 MPa	1	1	1	-	2	4	8	2	4	4	5	32	
BLOCO ESTRUTURAL 14x19x34 - 8 MPa	6	9	2	3	7	3	-	1	-	-	-	31	
PAVER RETANGULAR VERMELHO 10x20x4,5 - 25 MPa	-	1	7	-	3	1	7	4	3	2	-	28	
MEIO BLOCO ESTRUTURAL 14x19x19 - 4 MPa	3	1	1	2	4	5	5	1	2	1	-	25	
BLOCO VEDAÇÃO 14x19x54 - 2 MPa	-	-	-	-	1	6	4	4	-	-	8	23	
BLOCO ESTRUTURAL 14x19x54 - 4 MPa	4	3	-	1	3	3	3	3	3	-	-	23	
COMPENSADOR 14x19x09 - 4 MPa	2	1	1	3	2	3	5	1	2	2	-	22	
COMPENSADOR 14x19x04 - 4 MPa	3	2	-	4	1	3	4	-	-	2	-	19	
BLOCO ESTRUTURAL 14x19x34 - 6 MPa	-	2	1	3	7	4	1	1	-	-	-	19	
CANALETA ESTRUTURAL 19x19x39 - 4 MPa	-	-	5	6	5	2	1	-	-	-	-	19	
PAVER RETANGULAR GRAFITTE 10x20x4,5 - 25 MPa	-	3	2	-	-	3	1	2	1	2	4	18	
CANALETA ESTRUTURAL 14x19x39 - 8 MPa	1	3	3	2	6	3	-	-	-	-	-	18	
CANALETA ESTRUTURAL 14x19x39 - 6 MPa	-	-	3	2	5	4	3	-	-	-	-	17	
CANALETA ESTRUTURAL 14x19x39 - 10 MPa	2	3	-	4	6	-	-	-	1	-	-	16	
BLOCO ESTRUTURAL 14x19x29 - 10 MPa	-	-	-	-	-	-	-	8	1	5	2	16	
BLOCO ESTRUTURAL 14x19x54 - 8 MPa	1	2	2	1	2	4	-	3	-	-	-	15	
BLOCO ESTRUTURAL 19x19x39 - 10 MPa	-	-	-	-	4	5	5	-	-	-	-	14	
MEIO BLOCO ESTRUTURAL 14x19x19 - 8 MPa	-	3	1	4	3	3	-	-	-	-	-	14	
COBOGÓ VENEZIANO 40x40	-	2	1	1	1	2	3	-	1	2	1	14	
COMPENSADOR 14x19x04 - 6 MPa	-	-	1	5	3	4	-	-	-	-	-	13	
PAVER GRAMA 12,5x24,5x06	-	11	-	-	2	-	-	-	-	-	-	13	
COMPENSADOR 14x19x09 - 2 MPa	-	-	-	-	1	2	1	1	1	1	6	13	
COMPENSADOR 11,5x19x09 - 2 MPa	-	-	-	-	-	-	3	3	3	2	1	12	
MEIO BLOCO VEDAÇÃO 11,5x19x19 - 2 MPa	-	-	-	-	-	-	3	3	3	3	-	12	
BLOCO ESTRUTURAL 14x19x34 - 10 MPa	7	1	-	2	2	-	-	-	-	-	-	12	
COMPENSADOR 14x19x09 - 6 MPa	-	-	1	3	2	3	3	-	-	-	-	12	
MEIO BLOCO ESTRUTURAL 14x19x19 - 6 MPa	1	1	1	1	3	3	1	-	-	-	-	11	
BLOCO ESTRUTURAL 14x19x54 - 6 MPa	1	1	2	2	1	2	1	1	-	-	-	11	
BLOCO ESTRUTURAL 14x19x29 - 5 MPa	-	-	-	5	2	4	-	-	-	-	-	11	
CANALETA ESTRUTURAL 14x19x34 - 8 MPa	1	2	-	2	2	3	-	-	-	-	-	10	
COMPENSADOR 14x19x04 - 2 MPa	-	-	-	1	2	1	-	-	1	-	5	10	
BLOCO ESTRUTURAL 14x19x29 - 8 MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	4	4	2	10	
COMPENSADOR 14x19x04 - 8 MPa	1	2	-	4	1	-	-	-	-	-	-	8	
COMPENSADOR 14x19x09 - 8 MPa	1	-	-	2	2	3	-	-	-	-	-	8	
BLOCO ESTRUTURAL 14x19x54 - 10 MPa	2	2	-	4	-	-	-	-	-	-	-	8	
CANALETA ESTRUTURAL 14x19x34 - 4 MPa	-	-	-	-	1	4	1	1	1	-	-	8	
COMPENSADOR 14x19x04 - 10 MPa	2	1	-	3	1	-	-	-	-	-	-	7	
BLOCO ESTRUTURAL 19x19x39 - 15 MPa	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	4	7	
CANALETA ESTRUTURAL 14x19x34 - 10 MPa	4	1	-	1	1	-	-	-	-	-	-	7	
CANALETA DE VEDAÇÃO 19x19x39 - 2 MPa	-	-	1	-	1	1	-	1	1	2	-	7	
CANALETA ESTRUTURAL 14x19x34 - 6 MPa	-	-	-	2	1	3	1	-	-	-	-	7	
MEIA CANALETA VEDAÇÃO 09x19x19 - 2 MPa	1	1	-	-	2	2	1	-	-	-	-	7	
MEIA CANALETA ESTRUTURAL 14x19x19 - 10 MPa	4	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	6	
COMPENSADOR 11,5x19x04 - 2 MPa	-	-	-	-	-	-	-	3	1	1	1	6	
MEIA CANALETA ESTRUTURAL 14x19x19 - 8 MPa	1	1	-	-	2	1	-	-	-	-	-	5	
MEIO BLOCO ESTRUTURAL 14x19x19 - 10 MPa	2	-	-	1	2	-	-	-	-	-	-	5	
MEIA CANALETA ESTRUTURAL 14x19x19 - 6 MPa	-	-	-	-	2	1	1	-	-	-	-	4	
MEIA CANALETA ESTRUTURAL 14x19x19 - 4 MPa	-	-	-	-	2	1	1	-	-	-	-	4	
PAVER RETANGULAR TERRA COTA 10x20x4,5 - 25 MPa	-	-	-	1	-	1	-	1	1	-	-	4	
MEIA CANALETA VEDAÇÃO 14x19x19 - 2 MPa	-	-	-	-	1	2	-	-	1	-	-	4	
MEIO BLOCO VEDAÇÃO 19x19x19 - 2 MPa	-	-	2	-	2	-	-	-	-	-	-	4	
COMPENSADOR 14x19x09 - 10 MPa	3	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	4	
BLOCO VEDAÇÃO 14x19x34 - 2 MPa	-	-	-	-	1	1	1	-	-	-	-	3	
PAVER RETANGULAR VERMELHO 10x20x06 - 35 MPa	-	2	-	-	-	1	-	-	-	-	-	3	
PAVER RETANGULAR TERRA COTA 10x20x06 - 35 MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	3	
BLOCO ESTRUTURAL 19x19x39 - 4 MPa	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	2	
BLOCO ESTRUTURAL 19x19x39 - 8 MPa	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	2	
MEIO BLOCO ESTRUTURAL 09x19x19 - 4 MPa	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	
Total geral	213	226	225	260	259	316	292	227	201	227	213	2.659	

Fonte: Banco de dados da empresa estudada.

ANEXO C – Volume de produção mensal ao longo de um ano.

Nº	Soma de QUANTIDADE Rótulos de Linha	Rótulos de Coluna											Total geral
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	BLOCO VEDAÇÃO 14x19x39 - 2 MPa	12.042	5.058	44.888	11.416	18.470	30.809	47.552	21.828	22.974	30.646	24.498	270.181
2	BLOCO ESTRUTURAL 14x19x39 - 4 MPa	48.282	34.666	4.104	11.626	24.282	32.548	41.952	20.292	13.650	19.200	3.828	254.430
3	BLOCO VEDAÇÃO 09x19x39 - 2 MPa	15.854	22.020	18.080	26.886	3.420	33.300	27.500	21.276	18.972	37.014	13.742	238.064
4	BLOCO VEDAÇÃO 11,5x19x39 - 2 MPa	-	-	9.360	12.915	24.042	12.669	28.044	25.556	20.843	9.492	12.725	155.646
5	BLOCO ESTRUTURAL 14x19x39 - 8 MPa	22.914	26.676	21.432	12.084	15.350	16.732	-	-	-	-	-	115.188
6	BLOCO ESTRUTURAL 14x19x39 - 6 MPa	-	17.214	6.840	18.240	34.008	18.172	8.208	-	-	-	-	102.682
7	MEIO BLOCO VEDAÇÃO 09x19x19 - 2 MPa	60	4.700	1.200	10.800	4.500	13.500	6.850	3.092	9.900	5.446	19.366	79.414
8	CANALETA DE VEDAÇÃO 14x19x39 - 2 MPa	5.060	20.382	12.555	1.596	228	2.850	3.277	17.692	7.165	1.470	2.100	74.375
9	BLOCO VEDAÇÃO 19x19x39 - 2 MPa	-	-	27.990	20.910	9.166	8.190	1.080	-	2.000	1.530	-	70.866
10	COMPENSADOR 09x19x09 - 2 MPa	3.000	5.000	720	-	3.000	4.560	8.760	4.800	11.400	11.400	14.400	67.040
11	BLOCO ESTRUTURAL 14x19x39 - 10 MPa	20.406	20.634	1.368	8.436	7.524	-	-	-	-	-	-	58.368
12	COMPENSADOR 09x19x04 - 2 MPa	4.470	5.000	5.000	-	1.500	6.289	7.819	2.800	9.484	7.000	7.850	57.212
13	CANALETA ESTRUTURAL 14x19x39 - 4 MPa	9.418	8.788	1.368	5.016	2.052	7.410	4.902	5.724	-	6.000	-	50.678
14	BLOCO ESTRUTURAL 14x19x34 - 4 MPa	3.990	7.182	-	2.736	2.736	8.208	6.726	3.876	4.332	1.482	114	41.382
15	BLOCO ESTRUTURAL 14x19x34 - 8 MPa	9.234	13.566	1.254	2.964	7.068	2.166	-	2.052	-	-	-	38.304
16	MEIO-FIO 30x65x12 - 15 MPa	1.560	3.401	6.395	555	540	1.994	1.405	5.473	4.705	4.432	1.332	31.791
17	BLOCO ESTRUTURAL 14x19x29 - 10 MPa	-	-	-	-	-	-	-	19.032	980	7.280	3.360	30.652
18	COMPENSADOR 14x19x04 - 4 MPa	6.000	4.500	-	4.418	1.000	4.000	9.500	-	-	1.000	-	30.418
19	MEIO BLOCO VEDAÇÃO 14x19x19 - 2 MPa	738	3.600	1.200	436	492	2.652	2.492	180	2.952	-	15.252	29.994
20	MEIO BLOCO ESTRUTURAL 14x19x19 - 4 MPa	5.412	1.476	1.476	1.772	2.022	3.198	4.428	1.230	1.476	1.476	-	23.966
21	BLOCO ESTRUTURAL 14x19x29 - 5 MPa	-	-	-	11.172	5.016	7.752	-	-	-	-	-	23.940
22	BLOCO ESTRUTURAL 14x19x34 - 6 MPa	-	4.788	1.368	2.846	9.918	1.938	342	2.280	-	-	-	23.480
23	CANALETA ESTRUTURAL 14x19x39 - 10 MPa	2.028	3.052	-	13.110	2.850	-	-	-	300	-	-	21.340
24	COMPENSADOR 14x19x09 - 2 MPa	-	-	-	-	330	990	660	660	1.980	2.640	13.844	21.104
25	COMPENSADOR 14x19x04 - 6 MPa	-	-	1.500	5.500	5.000	7.500	-	-	-	-	-	19.500
26	COMPENSADOR 14x19x09 - 4 MPa	3.300	1.320	1.980	2.454	990	1.650	4.620	660	1.190	1.320	-	19.484
27	PAVER RETANGULAR NATURAL 10x20x08 - 35 MPa	530	-	96	3.926	403	415	2.434	4.166	1.306	2.352	2.794	18.423
28	BLOCO ESTRUTURAL 14x19x29 - 8 MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	8.680	6.160	3.360	18.200
29	BLOCO VEDAÇÃO 14x19x54 - 2 MPa	-	-	-	-	80	4.640	3.120	2.856	-	-	7.000	17.696
30	PAVER RETANGULAR NATURAL 10x20x06 - 35 MPa	36	58	2.830	288	350	1.109	886	3.912	1.753	3.040	586	14.850
31	COMPENSADOR 14x19x04 - 2 MPa	-	-	-	42	560	500	-	-	2.200	-	11.220	14.522
32	BLOCO ESTRUTURAL 14x19x54 - 4 MPa	3.360	1.280	-	480	1.520	1.236	2.080	2.720	680	-	-	13.356
33	PAVER RETANGULAR NATURAL 10x20x4,5 - 25 MPa	588	1.608	1.609	694	910	403	614	977	2.090	1.402	2.098	12.991
34	CANALETA ESTRUTURAL 14x19x39 - 8 MPa	500	3.192	2.964	1.140	3.306	1.482	-	-	-	-	-	12.584
35	MEIO BLOCO ESTRUTURAL 14x19x19 - 8 MPa	-	4.674	1.476	2.952	2.214	1.230	-	-	-	-	-	12.546
36	COMPENSADOR 14x19x04 - 8 MPa	1.500	3.000	-	4.700	3.000	-	-	-	-	-	-	12.200
37	CANALETA ESTRUTURAL 19x19x39 - 4 MPa	-	-	3.150	4.380	3.582	630	360	-	-	-	-	12.102
38	CANALETA ESTRUTURAL 14x19x39 - 6 MPa	-	-	3.078	798	2.850	2.166	2.166	-	-	-	-	11.058
39	BLOCO ESTRUTURAL 19x19x39 - 10 MPa	-	-	-	-	3.000	3.863	3.420	-	-	-	-	10.283
40	MEIO BLOCO ESTRUTURAL 14x19x19 - 6 MPa	1.230	984	1.476	984	2.952	1.722	738	-	-	-	-	10.086
41	MEIA CANALETA VEDAÇÃO 09x19x19 - 2 MPa	350	320	-	-	3.207	3.000	3.000	-	-	-	-	9.877
42	COMPENSADOR 11,5x19x09 - 2 MPa	-	-	-	-	-	-	2.234	2.828	1.860	2.100	840	9.862
43	BLOCO ESTRUTURAL 14x19x34 - 10 MPa	5.244	1.368	-	1.368	1.824	-	-	-	-	-	-	9.804
44	PAVER 16 FACES NATURAL 13x24,2x08 - 35 MPa	1.056	-	13	-	-	-	729	-	1.021	2.997	3.183	9.000
45	COMPENSADOR 11,5x19x04 - 2 MPa	-	-	-	-	-	-	-	3.000	2.640	1.980	1.000	8.620
46	COMPENSADOR 14x19x04 - 10 MPa	2.500	2.000	-	3.500	500	-	-	-	-	-	-	8.500
47	BLOCO ESTRUTURAL 14x19x54 - 8 MPa	960	1.200	1.440	160	560	800	-	2.488	-	-	-	7.608
48	MEIO BLOCO VEDAÇÃO 11,5x19x19 - 2 MPa	-	-	-	-	-	-	1.506	1.968	1.650	1.800	-	6.924
49	COMPENSADOR 14x19x09 - 6 MPa	-	-	990	1.730	660	1.320	1.980	-	-	-	-	6.680
50	MEIA CANALETA ESTRUTURAL 14x19x19 - 10 MPa	5.500	-	-	330	660	-	-	-	-	-	-	6.490
51	BLOCO ESTRUTURAL 14x19x54 - 6 MPa	800	480	1.120	560	400	560	258	1.600	-	-	-	5.778
52	BLOCO ESTRUTURAL 19x19x39 - 8 MPa	-	-	-	-	-	-	2.520	-	-	-	3.150	5.670
53	COMPENSADOR 14x19x09 - 8 MPa	1.320	-	-	2.220	660	1.320	-	-	-	-	-	5.520
54	MEIO BLOCO ESTRUTURAL 14x19x19 - 10 MPa	2.460	-	-	984	1.476	-	-	-	-	-	-	4.920
55	MEIA CANALETA ESTRUTURAL 14x19x19 - 8 MPa	1.250	1.500	-	-	1.500	250	-	-	-	-	-	4.500
56	CANALETA ESTRUTURAL 14x19x34 - 4 MPa	-	-	-	-	342	2.052	1.026	456	570	-	-	4.446
57	BLOCO ESTRUTURAL 19x19x39 - 8 MPa	-	-	4.320	-	-	-	-	-	-	-	-	4.320
58	CANALETA ESTRUTURAL 14x19x34 - 10 MPa	3.068	600	-	342	228	-	-	-	-	-	-	4.238
59	CANALETA ESTRUTURAL 14x19x34 - 8 MPa	1.368	1.000	-	492	570	684	-	-	-	-	-	4.114
60	MEIA CANALETA ESTRUTURAL 14x19x19 - 4 MPa	-	-	-	-	1.750	750	1.476	-	-	-	-	3.976
61	PAVER RETANGULAR AMARELO 10x20x4,5 - 25 MPa	-	54	83	-	568	3	1.098	1.310	463	59	-	3.639
62	BLOCO ESTRUTURAL 14x19x54 - 10 MPa	960	800	-	1.680	-	-	-	-	-	-	-	3.440
63	MEIO BLOCO VEDAÇÃO 19x19x19 - 2 MPa	-	-	2.335	-	1.080	-	-	-	-	-	-	3.415
64	CANALETA DE VEDAÇÃO 19x19x39 - 2 MPa	-	-	200	-	100	450	-	180	180	1.980	-	3.090
65	COBOGÓ VENEZIANO 40x40	-	239	360	850	432	680	340	-	30	41	100	3.072
66	MEIA CANALETA ESTRUTURAL 14x19x19 - 6 MPa	-	-	-	-	1.500	750	492	-	-	-	-	2.742
67	PAVER 16 FACES NATURAL 13x24,2x06 - 35 MPa	1.774	74	-	-	-	506	209	148	-	-	-	2.711
68	COMPENSADOR 14x19x09 - 10 MPa	1.980	-	-	660	-	-	-	-	-	-	-	2.640
69	PAVER RETANGULAR VERMELHO 10x20x4,5 - 25 MPa	-	98	887	-	258	32	475	500	314	65	-	2.629
70	CANALETA ESTRUTURAL 14x19x34 - 6 MPa	-	-	-	884	342	684	342	-	-	-	-	2.252
71	MEIA CANALETA VEDAÇÃO 14x19x19 - 2 MPa	-	-	-	-	500	1.000	-	-	370	-	-	1.870
72	MEIO BLOCO ESTRUTURAL 09x19x19 - 4 MPa	1.500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.500
73	PAVER GRAMA 12,5x24,5x06	-	1.290	-	-	119	-	-	-	-	-	-	1.409
74	BLOCO ESTRUTURAL 19x19x39 - 4 MPa	-	-	-	1.150	-	-	-	-	-	-	-	1.150
75	PAVER RETANGULAR GRAFITTE 10x20x4,5 - 25 MPa	-	166	59	-	-	57	140	357	20	24	55	876
76	BLOCO VEDAÇÃO 14x19x34 - 2 MPa	-	-	-	-	342	342	114	-	-	-	-	798
77	PAVER RETANGULAR TERRA COTA 10x20x06 - 35 MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	390	-	-	390
78	PAVER RETANGULAR TERRA COTA 10x20x4,5 - 25 MPa	-	-	-	6	-	20	-	196	16	-	-	238
79	PAVER RETANGULAR VERMELHO 10x20x06 - 35 MPa	-	117	-	-	-	28	-	-	-	-	-	145
Total geral		213.603	239.125	198.565	225.188	229.810	263.761	249.874	188.165	160.535	172.828	167.798	2.309.251

Fonte: Banco de dados da empresa estudada.

ANEXO D – Instrução de trabalho para a operação de prensagem dos blocos pré-moldados.

INSTRUÇÃO DE TRABALHO	Nº 01	SETOR: Prensas	FOLHA Nº 01/01
		DATA CRIAÇÃO: 19/03/2012	VALIDADE: 1 ano
OPERAÇÃO: Retirar bandeja da esteira e colocar na estante			
		Retirar bandeja da esteira transportadora e colocar no estante ocupando os espaços de baixo para	
A cada bandeja colocada na estante, anotar no quadro de apontamento da produção a quantidade de bandejas produzidas.			
		Quando for encontrado alguma peça com defeito, retirar esta peça da bandeja e colocar na caixa de peças inutilizadas.	
A cada peça defeituoso encontrada e retirada da bandeja, anotar no quadro de apontamento da produção o inutilizado gerado.			
RECOMENDAÇÕES DE SEGURANÇA: EPIs obrigatórios: Luvas de algodão com antiderrapante, protetor auditivo, e máscaras para pó.			
DATA DA ÚLTIMA REVISÃO:		DATA PRÓXIMA REVISÃO	
RESPONSÁVEL:		VISTO GERENTE DE PRODUÇÃO:	

Fonte: Documento cedido pelo setor de Controle da Qualidade da empresa.

APÊNDICE A – Folha de estudos de tempos para definição de produtividade de um tipo de bloco pré-moldado.

Data: 12/03/2012		Tempo de Prensagem	Retirar bandeja da frente e colocar na estante	Girar estante frente e verso	Transportar estante cheia estante vazia	Trazer estante vazia	Tempo da esteira	7	8	9	10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
---------------------	--	-----------------------	--	------------------------------------	---	-------------------------	---------------------	---	---	---	----	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Fonte: Estudo de cronoanálise realizado pelo autor na empresa.

