

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO E PROGRAMAÇÃO DA
PRODUÇÃO NA INDÚSTRIA DE POLPA MOLDADA**

Karim Yaneth Pérez Martínez

São Carlos
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO E PROGRAMAÇÃO DA
PRODUÇÃO NA INDÚSTRIA DE POLPA MOLDADA**

Karim Yaneth Pérez Martínez

Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Morabito

Co-orientador(a): Profa. Dra. Eli Angela Vitor Toso

Financiamento: CAPES, FAPESP-Processos: 2013/23700-8, 2015/24917-6

Texto para defesa de tese apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos como requisito para a obtenção do título de Doutora em Engenharia de Produção.

São Carlos
2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Tese de Doutorado da candidata Karim Yaneth Perez Martinez, realizada em 27/03/2018:

Prof. Dr. Reinaldo Morabito Neto
UFSCar

Profa. Dra. Eli Angela Vitor Toso
UFSCar

Prof. Dr. Geraldo Robson Mateus
UFMG

Prof. Dr. Silvio Alexandre de Araujo
UNESP

Prof. Dr. Claudio Fabiano Motta Toledo
USP

Profa. Dra. Deisemara Ferreira
UFSCar

Agradecimentos

Agradeço a Deus por todas as oportunidades que colocou no meu caminho durante estes quatro anos, pela fortaleza nos momentos difíceis e por me dotar com a disciplina e dedicação necessária para cumprir meus sonhos.

Aos meus pais, Argelio e Yanlys, meus queridos “*Ponchys*”, por todo o amor, compreensão e apoio nestes anos fora de casa. Não existe medida para o amor que recebo de vocês. Sempre incondicionais e com a melhor atitude em todos os momentos da minha vida. As minhas conquistas e meus sucessos refletem os valores e a educação que recebi de vocês.

Aos meus irmãos Keilys e Luis Alfredo, por todo o seu amor, parceria e por fazer nossa união ainda mais forte, apesar da distância. “*Key*”, obrigada por estar sempre presente, muito disposta a escutar e me ajudar sem condição. Você é um exemplo e inspiração para mim. “*Lucho*”, obrigada por tudo o amor e cumplicidade. A sua personalidade incrível faz meus dias ainda mais felizes e divertidos, mesmo longe de casa. Amo vocês.

Ao meu orientador, Prof. Reinaldo, pelo grande apoio, acompanhamento e amizade durante o desenvolvimento deste doutorado. Foi uma honra e um prazer trabalhar com você durante estes quatro anos. Você é uma pessoa muito completa, um profissional brilhante com qualidade humana excepcional, que contribuiu grandemente na minha formação integral. A minha profunda gratidão para você sempre estará presente.

À minha orientadora, Profa. Eli, pela amizade, confiança e apoio incondicional. A sua excelente orientação durante o mestrado e a sua motivação me incentivaram, sem dúvida, à escolha de fazer este doutorado. Sua dedicação, firmeza, compreensão e atitude sempre positiva, contribuíram na minha formação integral e hoje me deixam uma amizade que gostaria de conservar para sempre.

Aos meus orientadores durante o estágio de pesquisa no Canadá, Prof. Raf Jans e Prof. Yossiri Adulyasak do HEC (*Hautes Études Commerciales*) - Montréal. Vocês são profissionais brilhantes, dedicados e com uma disciplina admirável. Obrigada por me receber durante o meu estágio em Montreal e contribuir ao desenvolvimento desta pesquisa. Foi uma honra trabalhar com vocês.

Às agências de fomento, CAPES e FAPESP processos 2013/23700-8 e 2015/24917-6, pelo apoio financeiro no Brasil e estágio de pesquisa no Canadá. O seu suporte foi indispensável para o desenvolvimento deste doutorado.

Ao Pedro, meu amor, pela paciência, amor e amizade de início a fim durante este processo.

Você me equilibra, me completa e motiva constantemente para alcançar metas cada vez mais desafiantes. Esta conquista é mais do que especial para nós, pois muito além da obtenção do título, tivemos experiências de vida incríveis, nos tornamos melhores pessoas e fortalecemos ainda mais nossa união. Muito obrigada, meu amor, por acreditar sempre em mim e me demonstrar o seu amor todos os dias, do jeito que você é, do jeito que admiro e amo você.

Aos meus irmãos de vida, Jainer (*in memoriam*) e Luis Gabriel, meus queridos “Coky” e “Luisga”. A presença de vocês na minha vida me mostrou que o amor de irmãos não se limita ao fato de ter os mesmos pais. Coky, hoje não posso comemorar esta conquista na sua presença, como imaginávamos desde o início, mas a sua nobreza, espontaneidade e alegria ficarão sempre comigo. Luisga, sua personalidade especial e excepcionalmente divertida faz minha vida ainda mais feliz e fará você conseguir tudo o que se propor. Amo vocês eternamente.

Agradeço também a minha família mais próxima na Colômbia, o meu “Cabralato”. Por todo o apoio e alegrias dos últimos anos. Vocês recarregam as minhas energias e fazem os meus dias muito divertidos cada vez que visito à Colômbia. Obrigada também por acompanhar e cuidar dos meus pais na minha ausência.

À família de Pedro, que considero também como minha família. Aos meus sogros por seu apoio, sempre acompanhando e se orgulhando das nossas conquistas. Aos meus cunhados, pelo carinho de sempre. Ao Pedro José, que considero como um irmãozinho mais novo, pelo seu apoio e companhia. A sua nobreza e alegria são admiráveis e contagiantes. À Danika, pelo carinho e apoio. Vocês, especialmente, me fizeram sentir em família nesse último ano no Brasil.

Aos meus amigos e amigas na Colômbia. Licho, Mile e Virgy, obrigada por me receber sempre com o mesmo carinho e alegria. Meu querido grupo, Jesu, Jessi, Fanor, Luis, Diana, Samir e Yeimer, obrigada por todo o apoio, atenções e momentos divertidos durante estes anos. Vocês fazem das minhas férias na Colômbia as melhores. Leo, obrigada por manter intacta a nossa amizade de longa data apesar da distância. Ader, obrigada pelo apoio e presença remota que me divertiram muito nestes anos.

Aos meus queridos amigos no Brasil. Nadya, Rê, Maritha e Arthur, obrigada por toda a sua ajuda, companhia e apoio incondicional. Vocês fizeram do Brasil a minha casa e estiveram sempre presentes, com muito amor e cumplicidade, em muitas situações importantes na minha vida. Diego e Camila, amizade brasileira que Montreal me deu, obrigada por toda a ajuda, apoio e parceria no Canadá e no Brasil. Vocês todos são minha família fora da Colômbia.

Ao meu querido GPO (Grupo de Pesquisa Operacional - DEP UFSCar). Em especial, à Amelia, Alyne, Gabi, Aldair, Juan, Alfredo e o Prof. Pedro Munari. Vocês fizeram o meu doutorado e a minha vida em São Carlos muito mais divertida. Obrigada pelo apoio, pela parceria, pelos *happy hours* e pelos nossos divertidíssimos churrascos. Vocês são excelentes profissionais, muito trabalhadores, dedicados, mas também muito divertidos. Fico feliz de ter compartilhado o meu doutorado com vocês.

Todos vocês fizeram parte importante do meu crescimento nestes quatro anos, obrigada.

Resumo

Esta pesquisa aborda um problema integrado de configuração de processos, dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção no contexto da indústria de embalagens em polpa moldada. Neste problema, os produtos são produzidos por meio de configurações de processos alternativos, as quais são determinadas por uma combinação de moldes e conjuntos de produtos produzidos a partir deles. O volume de produção de cada produto, os tempos de preparação da linha de produção e o consumo de capacidade dependem de quais configurações de processo são utilizadas, o tempo de produção de cada uma delas e a sequência em que são programadas. O número total de possíveis configurações de processo pode ser significativamente grande para alguns sistemas de produção, e a sua determinação é usualmente restrita a condições operacionais e tecnológicas do sistema, as quais devem ser satisfeitas para garantir que os planos de produção definidos sejam factíveis na prática. Motivado por este contexto industrial, o foco desta pesquisa é abordar e otimizar as decisões de configuração de processos de forma simultânea às decisões de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção, envolvendo tempos e custos de *setup* dependentes da sequência. Esta pesquisa contou com a colaboração de uma fábrica de embalagens de polpa moldada localizada no estado de São Paulo, pertencente a um grupo multinacional de fabricantes de produtos e equipamentos no setor de polpa, onde dados reais foram coletados para análise das abordagens aqui propostas. Duas formulações matemáticas são propostas para representar e otimizar o problema, as quais diferenciam-se principalmente na forma em que as decisões de configuração de processos são representadas. A primeira formulação consiste num modelo matemático linear inteiro, o qual utiliza estruturas definidas *a priori* numa etapa de pré-processamento, para representar de forma simplificada as decisões de configuração de processo. A segunda formulação consiste numa representação não linear que modela especificamente as restrições tecnológicas do problema, a fim de gerar configurações de processo factíveis de forma implícita e sem a necessidade da definição de estruturas para a linha de produção determinadas no pré-processamento. Desigualdades válidas e restrições de eliminação de simetria são apresentadas para fortalecer as formulações e melhorar a convergência dos métodos de solução. Os modelos matemáticos propostos são resolvidos por meio de um *solver* de otimização para problemas de programação inteira mista (PIM), especificamente o *solver* CPLEX. Ainda, para resolver o problema é desenvolvido um algoritmo *branch-and-cut* (B&C) que explora as especificidades das formulações matemáticas e implementa cortes baseados nas técnicas *logic-based Benders* numa árvore *branch-and-bound*. Um

método de solução heurístico baseado em programação matemática também é proposto visando encontrar soluções competitivas aos resultados das abordagens exatas em curtos tempos computacionais. Os resultados mostram que ambas as formulações representam adequadamente o problema em estudo, envolvendo alternativas diferentes na representação integrada das decisões de configuração de processos, dimensionamento e sequenciamento da produção. Os experimentos computacionais mostram também que, embora a resolução ótima de todas as instâncias aqui analisadas seja um desafio, o algoritmo B&C proposto é significativamente mais eficiente que a resolução dos modelos via CPLEX. As desigualdades válidas propostas e as restrições de eliminação de simetria aprimoram os limitantes inferiores das formulações e melhoram significativamente os resultados dos métodos de solução, em particular do algoritmo B&C. Além disto, a heurística proposta demonstra ser competitiva para o problema, encontrando soluções ótimas para instâncias de tamanho médio e soluções competitivas às encontradas pelos métodos exatos para instâncias maiores, envolvendo tempos computacionais significativamente menores.

Palavras-chave: Planejamento e programação da produção; Problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes; Decisões de configuração de processos; Indústria de polpa moldada; Programação inteira mista

Abstract

We study an integrated process configuration, lot-sizing and scheduling problem, which appears in the context of a real production environment in the molded pulp packaging industry. Products are produced by alternative process configurations, which are defined by a combination of molds and a set of products to be produced. The production quantities, setup operations and capacity consumption depend on which process configurations are used, how long they are used for, and in which sequence they are scheduled. The total number of process configurations may be too large and difficult to define beforehand in some production environments, since a set of operational and technological constraints must be satisfied. For the particular case studied here, processes configuration decisions are generated at the same time as lot-sizing and sequencing decisions, which involve sequence-dependent setup costs and times. This research had the important collaboration of a typical molded pulp packaging company located in the São Paulo state, where real data were collected to validate the approaches proposed here. Two mathematical formulations are proposed to represent and optimize the problem, which are different in the way how process configuration decisions are represented. The first formulation is a linear formulation which uses some structures defined in advance to generate feasible process configuration; and the second one is a non-linear formulation which models the technical constraints of the problem to generate the process configurations to be implemented. Some valid inequalities and symmetry-breaking constraints are proposed to strengthen the formulations and improve the performance of the solution methods. The proposed mathematical approaches are solved using a standard mixed integer programming (MIP) solver, specifically the solver CPLEX. A branch-and-cut (B&C) algorithm, which takes into account the particularities of the formulations and implements logic-based Benders cuts in a branch-and-bound framework, and a MIP-based heuristic are also proposed to solve the problem. Results show that in general, the formulations proposed here represent properly the integrated problem. Computational experiments shows that, although it is is challenging to solve to optimality all the problem instances presented here, the B&C algorithm outperforms the models' resolution by CPLEX for all of the instances tested. Results also show that the valid inequalities and symmetry-breaking constraints proposed clearly improve the lower bounds of the formulations and the performance of the solution methods, particularly for the B&C algorithm. The heuristic proposed method also seems to be competitive for the problem instances tested, as it found optimal solutions for small instances, better solutions and similar solutions, in the worst case, compared to the ones

provided by the exact approaches for large instances and involving much less computing times.

Keywords: Production planning and scheduling; Lot-sizing and scheduling problems; Process configuration decisions; Molded pulp industry; Mixed integer programming

Sumário

1	Introdução	15
1.1	Objetivo de pesquisa	17
1.2	Metodologia e estrutura do trabalho	17
2	Revisão de trabalhos relacionados	20
2.1	Problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes	20
2.2	Problemas integrados de configuração de processos, dimensionamento e sequenciamento da produção	26
3	Descrição do problema	32
3.1	Processo de produção	32
3.2	Escopo do problema e decisões de planejamento	36
3.2.1	Decisões de configuração de processo	37
3.2.2	Decisões de dimensionamento de lotes	41
3.2.3	Decisões de sequenciamento	41
4	Modelagem matemática	43
4.1	Modelo de seleção de processos, planejamento e programação da produção (MSPPP)	44
4.1.1	Geração de padrões de moldagem no MSPPP	45
4.1.2	Formulação matemática	47
4.1.3	Desigualdades válidas	51
4.2	Modelo integrado de configuração de processos, planejamento e programação da produção (MICPPP)	52
4.2.1	Geração de padrões de moldagem no MICPPP	53
4.2.2	Formulação matemática	55
4.2.3	Estratégia de linearização para o MICPPP	62
5	Experimentos computacionais com as abordagens MSPPP e MICPPP	65
5.1	Exemplo ilustrativo	65
5.2	Experimentos computacionais com dados reais de uma fábrica do setor	68

5.3	Experimentos computacionais para o MSPPP	73
5.4	Comparação das abordagem MSPPP e MICPPP	78
6	Métodos de solução	83
6.1	Desigualdades válidas para a formulação MICPPP	83
6.2	Algoritmo <i>Branch-and-cut</i> (B&C)	85
6.2.1	Formulação relaxada	86
6.2.2	Procedimento de geração de cortes	87
6.2.3	Procedimento para encontrar soluções factíveis para o problema original	88
6.3	Heurística baseada em programação matemática	88
6.3.1	Fase 1	89
6.3.2	Fase 2	90
6.3.3	Fase 3	90
7	Experimentos computacionais com os métodos de solução	92
7.1	Resultados dos métodos de solução exatos	92
7.2	Resultados do método de solução heurístico	100
8	Considerações finais	103
A	Resultados detalhados das abordagens propostas	106
B	Procedimentos usados na heurística de 3 fases	110
B.1	Abordagens para a Fase 1	110
B.2	Abordagens para a Fase 2	111
B.3	Abordagens para a Fase 3	113

Lista de Figuras

3.1	Ilustração de uma linha de produção numa fábrica de embalagens de polpa moldada de grande escala	33
3.2	Máquina de moldagem vertical	33
3.3	Máquina de moldagem giratória	33
3.4	Máquina de moldagem rotatória	34
3.5	Decisões de planeamento e programação da produção no problema de otimização estudado	36
3.6	Exemplos de produtos e moldes	37
3.7	Sincronia entre a máquina de moldagem e transportadores numa linha de produção	40
3.8	Exemplo de um padrão de moldagem infactível	40
4.1	Representação de uma estrutura predefinida em uma linha de produção para produtos em polpa moldada	46
4.2	Exemplos da definição de arranjos para os transportadores	53
5.1	Conjunto de arranjos possíveis do MICPPP para o exemplo ilustrativo	66
5.2	Plano da fábrica e soluções ótimas obtidas pelos modelos propostos para o exemplo ilustrativo	67
5.3	Padrões de moldagem 5 representado pelo Modelo MSPPP	68
5.4	Padrões de moldagem 5 representado pelo Modelo MICPPP	68
5.5	Comparação de planos de produção para o exemplar de Janeiro 2015	70
5.6	Comparação de planos de produção para o exemplar de Maio 2015	71
5.7	Comparação de planos de produção para o exemplar de Junho 2015	72
6.1	Soluções simétricas eliminadas pelas restrições (6.2)	84
6.2	Soluções simétricas eliminadas pelas restrições (6.3)	85

Lista de Tabelas

2.1	Formulações clássicas para os problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes	22
2.2	Aplicações industriais dos problemas de dimensionamento e sequenciamento da produção - I	24
2.3	Aplicações industriais dos problemas de dimensionamento e sequenciamento da produção - II	25
2.4	Aplicações industriais que consideram decisões de configuração de processos, dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção	30
2.5	Aplicações industriais que consideram decisões de configuração de processos, dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção	31
3.1	Exemplos de padrão de moldagem	38
3.2	Exemplos de possíveis configurações de processo	38
4.1	Exemplos de estruturas predefinidas para uma linha de produção	45
5.1	Conjunto de estruturas possíveis do MSPPP para o exemplo ilustrativo	66
5.2	Plano da fábrica e solução ótima obtida pelos modelos propostos para o exemplo ilustrativo	67
5.3	Comparação dos planos de produção para o exemplar de Janeiro 2015	71
5.4	Comparação dos planos de produção para o exemplar de Maio 2015	72
5.5	Comparação dos planos de produção para o exemplar de Junho 2015	72
5.6	Tamanho dos grupos de instâncias dos experimentos computacionais	74
5.7	Sumário dos experimentos computacionais para a abordagem MSPPP	75
5.8	Resultados da abordagem MSPPP para os grupos de instâncias T2P5_F6K2A1, T2P8_F6K2A1 e T2P8_F6K3A1	76
5.9	Resultados da abordagem MSPPP para os grupos de instâncias T2P5_F6K2A2, T2P8_F6K2A2 e T2P8_F6K3A3	77
5.10	Resultados da abordagem MSPPP para os grupos de instâncias T4P5_F6K2A2, T4P5_F6K3A3, T4P8_F6K2A2 e T4P8_F6K3A3	78

5.11	Resultados das abordagens MSPPP e MICPPP para os grupos de instâncias T2P5_F6K2A1, T2M8P8_K2A1, T2M8P8_K3A1	80
5.12	Resultados das abordagens MSPPP e MICPPP para os grupos de instâncias T2P5_F6K2A2, T2M8P8_K2A2, T2M8P8_K3A3	81
5.13	Resultados das abordagens MSPPP e MICPPP para os grupos de instâncias T4P5_F6K2A2, T4P5_F6K3A3, T4P8_F6K2A2, T4P8_F6K3A3	82
7.1	Experimentos computacionais dos métodos exatos para os conjuntos de instâncias menores	93
7.2	Média dos resultados dos métodos de solução exatos para os grupos de instâncias menores	94
7.3	Experimentos computacionais dos métodos exatos para os conjuntos de instâncias médias e grandes	95
7.4	Média dos resultados dos métodos de solução exatos para os grupos de instâncias de tamanho médio	97
7.5	Média dos resultados dos métodos de solução exatos para os grupos de instâncias maiores	99
7.6	Resultados da heurística de 3 fases para os grupos T2P5_F6K2A2, T2P8_F6K2A2 e T2P8_F6K3A3	101
7.7	Resultados da heurística de 3 fases para os grupos T4P5_F6K2A2, T4M5P5_K3A3, T4P8_F6K2A2 e T4P8_F6K3A3	102
A.1	Resultados detalhados dos casos de melhor desempenho das abordagens propostas para os Grupos T2P5_F6K2A1, T2P8_F6K2A1 e T2P8_F6K3A1	107
A.2	Resultados detalhados dos casos de melhor desempenho das abordagens propostas para os Grupos T2P5_F6K2A2, T2P8_F6K2A2 e T2P8_F6K3A3	108
A.3	Resultados detalhados dos casos de melhor desempenho das abordagens propostas para os Grupos T4P5_F6K2A2, T4P5_F6K3A3, T4P8_F6K2A2 e T4P8_F6K3A3	109

Capítulo 1

Introdução

O planejamento e programação da produção consiste na alocação de recursos para a execução das atividades de produção, de modo que os requerimentos de mercado e demanda dos clientes sejam satisfeitos da forma mais econômica e eficiente possível. Os problemas a serem tratados nesta área frequentemente demandam decisões sobre a determinação de tamanhos de lote de produção dos diferentes produtos a serem processados, a definição do tempo de produção de cada lote, a determinação das máquinas ou facilidades em que a produção dos itens acontece, e/ou o sequenciamento dos lotes de produção (POCHET; WOLSEY, 2006).

O problema de dimensionamento de lotes é um dos mais estudados na literatura no que se refere ao planejamento da produção. Estas decisões tem sido amplamente estudadas desde a introdução da formulação matemática do lote econômico de pedido (EOQ - *Economic Quantity Order*) por Ford W. Harris (HARRIS, 1913a; HARRIS, 1913b), e estendidas para considerar características de diversas aplicações industriais e outras decisões integradas de planejamento. As decisões de dimensionamento de lotes abordam basicamente a definição das quantidades produzidas de cada produto e o instante de produção de cada item. Com frequência, estas decisões são integradas às decisões de sequenciamento, as quais determinam a sequência em que os lotes de produtos devem ser programados. O objetivo consiste no atendimento da demanda de forma eficiente e econômica, respeitando a disponibilidade dos recursos de produção.

No contexto de problemas de otimização do planejamento e programação da produção e, em particular, do problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes, esta pesquisa aborda o estudo de uma aplicação destes problemas na indústria de embalagens de polpa moldada. Esta aplicação industrial envolve um problema de otimização que além do dimensionamento e sequenciamento de lotes, compreende também a integração de decisões de configuração de processos a partir dos quais são obtidos os produtos demandados.

O processo de produção de embalagens de polpa moldada é realizado a partir da recuperação de materiais descartáveis, particularmente de produtos fabricados a base de fibras de celulose, como aparas de papel e papelão, livros, jornais, revistas, entre outros. Uma vez que as matérias primas principais consistem em diversos tipos de papel e água, os produtos são 100% biode-

gradáveis e o seu processo de produção não gera resíduos (IMFA, 2017; EMFA, 2017). Os produtos de polpa moldada tem sido produzidos desde o começo do século XIX, inicialmente apenas no formato de bandejas para ovos. No decorrer do tempo, a variedade de produtos produzidos tem aumentado consideravelmente, incluindo embalagens para frutas, contêineres simples, embalagens para produtos industriais e partes automotivas, produtos descartáveis para aplicações hospitalares, embalagens para produtos cosméticos, entre outros (PENDLEPACE-LTDA., 2005). Relatórios técnicos e informações do setor de embalagens e reciclagem ressaltam a perspectiva de crescimento deste setor, vinculada principalmente ao fato de ser considerada como uma alternativa sustentável para substituir embalagens a base de petróleo, como plástico ou poliestireno (isopor) (CRONE, 2014; PENDLEPACE-LTDA., 2005). As perspectivas de crescimento são evidenciadas nas previsões de vendas globais de embalagens em polpa moldada, as quais foram avaliadas em mais de 6 bilhões de dólares no ano 2015 e são projetadas para atingir 11,5 bilhões de dólares no ano 2026 (FMIG; LTD., 2017).

O processo de produção de produtos em polpa moldada envolve principalmente os estágios de formação da polpa, moldagem e secagem. Dependendo do uso e aplicação dos produtos, outras etapas devem ser incluídas no processo de produção, tais como prensagem, impressão e/ou revestimento. As decisões de planejamento e programação da produção nestes sistemas produtivos são relacionados diretamente à configuração do processo de moldagem. Uma combinação específica de moldes é acoplada a uma máquina de moldagem, de modo que as quantidades produzidas de cada produto dependem desta combinação de moldes, do tempo de produção sob tal configuração e da velocidade da máquina.

Neste contexto, as principais decisões de planejamento da produção nesta indústria compreendem: determinar as configurações de processo usadas para produção dos produtos; determinar o tempo de produção de cada configuração de processo; e, definir a sequência em que tais configurações devem ser programadas. Estas decisões são abordadas usualmente de forma separada na prática, definindo inicialmente um conjunto de configurações factíveis, as quais consideram-se como dados de entrada para as decisões de dimensionamento e sequenciamento. Esta pesquisa propõe abordagens de otimização que consideram simultaneamente as decisões de configuração de processos, dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção na indústria de polpa moldada, visando a minimização dos custos de produção do sistema. Esta abordagem é motivada pelas vantagens na otimização das decisões de planejamento de forma integrada, a qual procura soluções ótimas globais ao invés de ótimos locais obtidos ao se resolver os problemas de forma separada.

A caracterização do processo de produção e as formulações matemáticas propostas para representar o problema são baseadas no estudo de caso de uma fábrica brasileira de embalagens para ovos e frutas em polpa moldada, localizada no Estado de São Paulo. Esta é uma empresa típica do setor e pertence a um grupo multinacional com um grande portfólio de plantas de produção e fabricantes de equipamentos da indústria de polpa em diferentes países. Com base em pesquisas do setor realizadas durante o desenvolvimento desta tese e na colaboração de

especialistas, acreditamos que as abordagens aqui desenvolvidas também sejam diretamente aplicáveis, ou facilmente adaptáveis para outras empresas do mesmo setor.

1.1 Objetivo de pesquisa

O objetivo principal desta pesquisa compreende o estudo e proposta de abordagens de otimização para o problema de planejamento e programação da produção para o estágio de moldagem na indústria de polpa moldada. Este representa uma aplicação de problemas de planejamento pouco estudada na literatura que integra decisões de configuração de processos, dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção. Especificamente, esta pesquisa visa propor formulações matemáticas que representem de forma integrada as principais decisões do problema e métodos de solução capazes de encontrar planos de solução eficientes para ambientes de manufatura de diferentes características neste setor industrial.

Além das contribuições particulares relacionadas à aplicação industrial objeto de estudo, esta pesquisa tem como objetivo também identificar o potencial das abordagens de otimização propostas para serem adaptados a outros problemas integrados de planejamento em aplicações industriais diferentes.

1.2 Metodologia e estrutura do trabalho

Esta pesquisa se fundamenta no pressuposto de que podemos construir modelos que representem total ou parcialmente o comportamento dos processos operacionais de ambientes reais, e que capturem os problemas de tomada de decisão envolvidos nesses processos. Segundo as classificações propostas por [Bertrand e Fransoo \(2002\)](#) e [Morabito e Pureza \(2010\)](#), esta pesquisa pode ser caracterizada como empírica quantitativa normativa, uma vez que o objetivo principal é desenvolver modelos matemáticos que, considerando algumas hipóteses simplificadoras, representem adequadamente as características do problema e apoiem as decisões envolvidas nestes sistemas de produção, propondo alternativas de solução efetivas para o problema definido.

Para atingir os objetivos propostos pretende-se:

1. Identificar características gerais e específicas do processo de produção na indústria de polpa moldada, identificando as principais decisões de planejamento a serem abordadas e que definem o problema de pesquisa.
2. Propor modelos de programação inteira mista que representem adequadamente as características do problema em estudo, integrem e apoiem as decisões de configuração de processos, dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção.

3. Validar os modelos propostos por meio do uso de *software* especializados na resolução de problemas de programação inteira mista, e verificar a coerência das soluções obtidas. Para tal fim, as soluções obtidas pelas abordagens propostas são comparadas com as soluções implementadas na prática por uma empresa do setor para um conjunto de exemplares reais. Experimentos computacionais são executados também para exemplares baseados em informações reais, informações do setor e informações de fabricantes de equipamentos de moldagem para esta indústria, de modo que conjuntos de instâncias com diferentes características sejam testados.
4. Pesquisar e implementar métodos de solução específicos para tratar esses modelos matemáticos que sejam efetivos particularmente nos cenários em que a resolução dos modelos por meio de *software* de otimização comerciais é limitada.
5. Analisar os resultados computacionais realizados, o potencial de aplicação das abordagens desenvolvidas em situações reais e consolidar as conclusões da pesquisa.

Este trabalho é organizado da seguinte forma. O Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura descrevendo trabalhos relacionados ao problema de otimização abordado nesta pesquisa. Esta revisão é focada nos problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes, particularmente aqueles que representam aplicações industriais, e que consideram de forma integrada decisões relacionadas à configuração ou seleção de processos de produção. O Capítulo 3 apresenta a descrição do processo de manufatura e as decisões envolvidas no planejamento e programação da produção na indústria de polpa moldada, que definem o problema de otimização a ser abordado neste trabalho. O Capítulo 4 apresenta duas formulações matemáticas para o problema em estudo, as quais representam de maneira integrada as três principais decisões mencionadas no início deste capítulo.

Para melhor entendimento e apresentação desta tese, os resultados computacionais são apresentados nos Capítulos 5 e 7, os quais focam na análise das formulações matemáticas e na análise de métodos de solução propostos, respectivamente. O Capítulo 5 apresenta experimentos computacionais realizados ao resolver as formulações desenvolvidas por meio do *solver* comercial CPLEX. Neste capítulo apresenta-se um exemplo ilustrativo para mostrar como as decisões do problema são representadas pelas duas formulações propostas. Um conjunto de exemplares reais também é resolvido, para o qual comparam-se as soluções obtidas pelas abordagens propostas e os planos de produção reais implementados na prática. Além disto, comparações entre os resultados obtidos a partir de cada abordagem são analisadas. O Capítulo 6 descreve os métodos de solução desenvolvidos particularmente para o problema em estudo. Um método de solução exato e uma heurística de programação matemática são apresentados. Conforme mencionado, o Capítulo 7 apresenta os experimentos computacionais realizados para os métodos de solução descritos no Capítulo 6, visando a análise e comparação do seu desempenho em relação à resolução dos modelos por meio do *solver* CPLEX. Finalmente o Capítulo

8 apresenta as considerações finais, conclusões e oportunidades de pesquisa decorrentes do desenvolvimento desta tese.

Capítulo 2

Revisão de trabalhos relacionados

Este capítulo apresenta uma descrição de trabalhos relacionados ao tema de pesquisa estudado, compreendendo principalmente modelagem matemática e métodos de solução para problemas de planejamento e programação da produção, que compreendem decisões de dimensionamento e sequenciamento de lotes. A Seção 2.1 apresenta uma descrição dos trabalhos que abordam de forma integrada o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes e, em particular, apresenta aplicações deste problema em diferentes contextos industriais. A Seção 2.2 descreve alguns trabalhos que combinam decisões de configuração e/ou seleção de processos, dimensionamento e sequenciamento de lotes.

2.1 Problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes

O dimensionamento e sequenciamento de lotes é um dos problemas mais estudados no planejamento da produção. As principais decisões abordadas compreendem basicamente a determinação do que produzir, quando produzir e quanto produzir, visando minimizar os custos totais envolvidos no processo de produção (KARIMI; GHOMI; WILSON, 2003).

Existem vários trabalhos que apresentam diferentes formulações matemáticas clássicas para o problema de dimensionamento de lotes, e o problema integrado de dimensionamento e sequenciamento da produção. Estas formulações matemáticas representam um ponto de partida para o estudo de problemas de planejamento com diversas características, e aplicados a diferentes contextos industriais. Algumas das formulações clássicas para estes problemas são o Problema de Dimensionamento de Lotes Discreto - DLSP, o Problema de Dimensionamento de Lotes Contínuo - CSLP, o Problema de Dimensionamento de Lotes Proporcional - PLSP, o Problema de Dimensionamento de Lotes Capacitado - CLSP e o Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes Geral - GLSP (DREXL; KIMMS, 1997). Múltiplas extensões e variantes tem surgido a partir destas formulações que incluem características como:

múltiplos níveis de produção, múltiplas máquinas, tempos e custos de preparação dependentes da sequência, atraso na entrega dos produtos, sincronização de recursos escassos, entre outras extensões.

Uma das abordagens mais comuns para classificação das formulações para os problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes, de acordo com [Karimi, Ghomi e Wilson \(2003\)](#), compreende a separação em dois tipos de formulações levando em conta a estrutura do horizonte de planejamento: formulações *small bucket* e *big bucket*. Nos modelos tipo *big bucket*, os períodos de tempo são longos o suficiente para produzir múltiplos itens em cada período, enquanto que nos modelos *small bucket*, os períodos de tempo são de curta duração, de modo que apenas um item é produzido por período. A Tabela 2.1 apresenta algumas referências relacionadas às formulações clássicas de problemas de dimensionamento de lotes e suas extensões, assim como as principais características relacionadas à estrutura de tempo dos modelos, fazendo referências aos tipos *small* e *big bucket*. Revisões de literatura que exploram em detalhes os diferentes problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes, formulações matemáticas e métodos de solução, podem ser encontradas em [Drexler e Kimms \(1997\)](#), [Karimi, Ghomi e Wilson \(2003\)](#), [Zhu e Wilhelm \(2006\)](#), [Brahimi et al. \(2006\)](#), [Quadt e Kuhn \(2008\)](#), [Jans e Degraeve \(2008\)](#), [Guimaraes, Klabjan e Almada-Lobo \(2014\)](#), [Copil et al. \(2017\)](#).

Formulação	Referências	Tipo de modelo	Características principais
DLSP	Fleischmann (1990), Fleischmann (1994), Jans e Degraeve (2004), Gicquel, Minoux e Dallery (2009), Gicquel, Wolsey e Minoux (2012)	<i>Small bucket</i>	Produção “ <i>all-or-nothing</i> ”, i.e., no máximo um item é produzido por período, e a sua produção consome a capacidade total do período.
CSLP	Drexl e Kimms (1997), Karimi, Ghomi e Wilson (2003), Brahimi et al. (2006)	<i>Small bucket</i>	Similar à formulação para o DLSP no sentido que apenas um item é produzido por período. No entanto, permite-se a utilização parcial da capacidade do período.
PLSP	Drexl e Haase (1995), Kimms e Drexl (1998), Karimi, Ghomi e Wilson (2003), Kaczmarczyk (2011)	<i>Small bucket</i>	Similar às considerações do CLSP, no entanto, nesta formulação permite-se a utilização a capacidade remanescente de cada período para a produção de um segundo item, permitindo no máximo a produção de dois itens por período. A produção de um item acontece somente se a máquina está apropriadamente preparada no início ou no final do período.
CLSP	Trigeiro, Thomas e McClain (1989), Haase (1996), Karimi, Ghomi e Wilson (2003), Gupta e Magnusson (2005), Almada-lobo et al. (2007)	<i>Big bucket</i>	O horizonte de planeamento é dividido num número discreto de períodos de tempo, dentro dos quais podem ocorrer várias trocas no estado de preparação, permitindo consequentemente a produção de vários produtos no mesmo período.
GLSP	Fleischmann e Meyr (1997), Meyr (2002), Fandel e Stammen-Hegene (2006)	<i>Big bucket</i>	O horizonte de planeamento é dividido em períodos de tempo, que por sua vez são divididos em sub-períodos de duração variável. Em cada sub-período pode ser produzido apenas um único item, de modo que o número máximo de itens produzidos em cada período limita-se ao número de sub-períodos definidos <i>a priori</i> .

Tabela 2.1: Formulações clássicas para os problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes

Várias aplicações dos problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes tem sido estudados em diferentes contextos industriais. Estas pesquisas evidenciam a importância de abordagens integradas de dimensionamento e sequenciamento na prática, e a complexidade destes problemas quando restrições tecnológicas e características reais dos sistemas de produção são levadas em conta nas abordagens de otimização. Algumas das aplicações dos problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes reportadas na literatura incluem indústrias como: indústria láctea e de iogurtes (MARINELLI; NENNI; SFORZA, 2007), indústria de cerveja (BALDO et al., 2014), indústria de bebidas não alcoólicas e refrigerantes (FERREIRA; MORABITO; RANGEL, 2009; FERREIRA et al., 2012; TOLEDO et al., 2014; TOSCANO; FERREIRA; MORABITO, 2017), indústria de fumo (PATTLOCH; SCHMIDT; KOVALYOV, 2001), indústria de vidro (ALMADA-LOBO; OLIVEIRA; CARRAVILLA, 2008; TOLEDO et al., 2013; TOLEDO et al., 2016), fundição (ARAUJO; ARENALES; CLARK, 2008; HANS; VELDE, 2011), indústria química (TRANSCHEL et al., 2011), indústria de papel e celulose (SANTOS; ALMADA-LOBO, 2012; FIGUEIRA; SANTOS; ALMADA-LOBO, 2013; FURLAN et al., 2015), indústria de nutrição animal (TOSO; MORABITO; CLARK, 2009; CLARK; MORABITO; TOSO, 2010), fabricação de pneus e produtos de aço (JANS; DEGRAEVE, 2004), entre outras. As formulações matemáticas para estas aplicações baseiam-se nas formulações clássicas dos problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes, nos quais incluem-se particularidades e restrições tecnológicas baseadas nos processos de produção de cada tipo de indústria. Os métodos de solução usados nestas aplicações envolvem principalmente heurísticas baseadas em programação matemática, algoritmos evolutivos e de busca local. As Tabelas 2.2 e 2.3 descrevem algumas das características mais gerais destes trabalhos, especificando as representações matemáticas nas quais baseiam-se os os modelos propostos, características gerais de cada problema relacionadas ao número de estágios de planejamento, número de máquinas, características das operações de *setup*, assim como os métodos de solução implementados. Todos estes trabalhos têm em comum um horizonte de planejamento de múltiplos períodos, múltiplos produtos e restrições de capacidade.

Algumas revisões da literatura que descrevem métodos de solução para problemas de dimensionamento e sequenciamento em geral são apresentados em Karimi, Ghomi e Wilson (2003), Jans e Degraeve (2007), Buschkühl et al. (2010), Goren, Tunali e Jans (2010). Os métodos de solução mais comuns incluem abordagens baseadas em programação matemática (i.e., *branch-and-bound*, reformulações, heurísticas baseadas em programação matemática, desigualdades válidas, métodos de decomposição Dantzig-Wolfe e geração de colunas, entre outros), heurísticas lagrangianas (MILLAR; YANG, 1994; TOLEDO; ARMENTANO, 2006; FIOROTTO; ARAUJO, 2014; WOLOSEWICZ; DAUZÈRE-PÉRÈS; AGGOUNE, 2015), abordagens de decomposição e agregação (MATEUS et al., 2010; MEYR; MANN, 2013), metaheurísticas (BERRETTA; RODRIGUES, 2004; JANS; DEGRAEVE, 2007; ALMADA-LOBO; JAMES, 2010), e heurísticas específicas baseadas nas especificidades dos problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes.

Indústria	Referências	Formulação	Características da representação matemática	Métodos
Láctea e de Iogurtes	Marinelli, Nenni e Sforza (2007)	Híbrida (CLSP e CSLP)	Dois estágios; tempos e custos de <i>setup</i> independentes da sequência; múltiplas linhas	<i>Solver</i> CPLEX e heurística de dois estágios que combina programação matemática e busca local
Cerveja	Baldo et al. (2014)	GLSP	Dois estágios; permite atrasos; tempos e custos de <i>setup</i> dependentes da sequência	<i>Solver</i> CPLEX e heurísticas baseadas em programação matemática (<i>relax-and-fix</i> e <i>fix-and-optimize</i>)
Fumo	Pattloch, Schmidt e Kovalyov (2001)	DLSP	Único estágio; múltiplas máquinas; datas de entrega; <i>setup</i> independente da sequência	Heurísticas específicas para o problema
Bebidas não alcoólicas	Ferreira, Morabito e Rangel (2009)	GLSP	Dois estágios; múltiplas máquinas; custos e tempos de <i>setup</i> dependentes da sequência; permite atrasos	<i>Solver</i> CPLEX e heurísticas baseadas em programação matemática (<i>relax-and-fix</i>)
	Ferreira et al. (2012)	GLSP, CLSP e <i>Asymmetric Traveling Salesman Problem</i> (ATSP)	Único estágio; múltiplas máquinas; custos e tempos de <i>setup</i> dependentes da sequência; permite atrasos	<i>Solver</i> CPLEX e heurísticas baseadas em programação matemática (<i>relax-and-fix</i>), algoritmos para eliminação de <i>subtours</i> e <i>Patching</i>
	Toledo et al. (2014)	GLSP	Dois estágios; múltiplas máquinas; custos e tempos de <i>setup</i> dependentes da sequência; permite atrasos	Métodos híbridos (algoritmos genéticos e programação matemática)
Vidro	Almada-Lobo, Oliveira e Carravilla (2008)	CLSP	Múltiplas máquinas; múltiplas facilidades; tempos e custos de <i>setup</i> dependentes da sequência; permite atrasos	Metaheurísticas VNS (<i>Variable Neighborhood Search</i>)

Tabela 2.2: Aplicações industriais dos problemas de dimensionamento e sequenciamento da produção - I

Indústria	Referências	Formulação	Características da representação matemática	Métodos
Fundição	Araújo, Arenales e Clark (2008) Hans e Velde (2011)	GLSP	Tempos e custos de <i>setup</i> dependentes da sequência; permite atrasos	<i>Solver</i> CPLEX, heurísticas baseadas em programação matemática (<i>relax-and-fix</i>) e procedimentos de Busca Local
Química	Transchel et al. (2011)	GLSP, <i>Quantity based Transportation Problem (QTP)</i> , e <i>Proportional Transportation Problem (PTP)</i>	Tempos e custos de <i>setup</i> dependentes da sequência; permite atrasos	<i>Solver</i> Xpress
Papel e celulose	Santos e Almada-Lobo (2012) Figueira, Santos e Almada-Lobo (2013) Furlan et al. (2015)	GLSP GLSP GLSP	Múltiplos estágios; múltiplas máquinas; tempos e custos de <i>setup</i> dependentes da sequência Múltiplos estágios; múltiplas máquinas; tempos e custos de <i>setup</i> dependentes da sequência Múltiplos estágios; múltiplas máquinas; tempos e custos de <i>setup</i> dependentes da sequência	<i>Solver</i> CPLEX e heurísticas baseadas em programação matemática (<i>relax-and-fix</i>) Metaheurísticas VNS Algoritmos genéticos
Nutrição animal	Toso, Morabito e Clark (2009) Clark, Morabito e Toso (2010)	GLSP CLSP, ATSP	Tempos de <i>setup</i> dependentes da sequência e não triangulares Tempos de <i>setup</i> dependentes da sequência e não triangulares	<i>Solver</i> CPLEX e heurísticas baseadas em programação matemática (<i>relax-and-fix</i>) <i>Solver</i> CPLEX, Algoritmos para eliminação de <i>subtours</i> e <i>Patching</i>
Pneus e aço	Jans e Degraeve (2004)	DLSP	Múltiplas máquinas; tempos de <i>start-up</i> ; permite atrasos	Algoritmo de geração de colunas

Tabela 2.3: Aplicações industriais dos problemas de dimensionamento e sequenciamento da produção - II

2.2 Problemas integrados de configuração de processos, dimensionamento e sequenciamento da produção

Esta seção apresenta trabalhos que abordam as decisões de planejamento e programação da produção em contextos industriais cuja particularidade consiste na produção de múltiplos produtos por meio de processos, configurações ou modo de operação alternativos. Nestes ambientes de produção, as máquinas são configuradas de acordo com um processo ou modo de produção em particular, o qual define a variedade e o volume de produtos produzidos em determinado intervalo de tempo. Cada produto pode ser produzido por meio de um ou mais processos alternativos, e cada processo pode produzir um ou mais produtos simultaneamente.

Após a revisão bibliográfica desta pesquisa, pode se afirmar que não existe uma denominação padronizada para problemas de planejamento com estas características, sendo referidos por alguns autores como problemas de seleção de processos, planejamento de processos, seleção de modos de operação ou problemas de configuração de processos (JOHNSON; MONTGOMERY, 1974). Nesta pesquisa nos referimos a problemas de otimização com estas características, como problemas integrados de configuração de processos, dimensionamento e sequenciamento da produção. Trabalhos que compreendem problemas de planejamento em que os produtos demandados são obtidos por meio de processos alternativos que podem produzir um ou mais produtos de forma simultânea são considerados como aplicações similares ao problema de planejamento abordado nesta pesquisa. No contexto industrial estudado neste trabalho, as decisões de configuração de processos referem-se à determinação de combinações de moldes que devem ser acoplados numa máquina de moldagem e à definição de produtos obtidos a partir desses moldes. Estas decisões de configuração de processos devem ser tomadas de modo que as restrições operacionais e tecnológicas do sistema de produção sejam satisfeitas.

Os problemas integrados de configuração de processos, dimensionamento e sequenciamento de lotes basicamente abordam as seguintes decisões: determinar a configuração de processo utilizada em cada instante de tempo, determinar quantas vezes ou durante quanto tempo cada configuração é utilizada, e definir a sequência em que tais configurações devem ser programadas. Note que nestes casos as quantidades produzidas de cada produto ao final de cada período são consequência do tamanho dos lotes das configurações processos usadas no mesmo período, ou seja, do tempo ou número de vezes que cada configuração de processo foi usada. Neste contexto, consideramos como um exemplo clássico com estas características o problema integrado de dimensionamento de lotes e corte de estoque, em que as quantidades de produtos e consumo de recursos dependem da seleção e do uso dos padrões de corte, a partir dos quais vários itens são cortados de forma simultânea, em cada período de um horizonte de planejamento finito.

Algumas das aplicações industriais que abordam o problema de configuração de processos, em alguns casos de forma integrada com decisões de dimensionamento de lotes, ocorrem na indústria química e de manufatura flexível. Estes setores industriais apresentam com

frequência decisões de configuração de processos, pois tipicamente os produtos são produzidos a partir de processos alternativos que diferem entre si pelo seu rendimento, velocidade, custo, e consumo de matérias primas.

[Shi et al. \(2014\)](#), por exemplo, estudam a programação da produção nas refinarias de petróleo, por meio de um estudo de caso em uma planta no Canadá. O processo de produção envolve os estágios de armazenagem de petróleo cru, unidades de produção, mistura e envio. A variedade e as quantidades dos produtos produzidos (*i.e.*, gasolina e diesel de diferentes tipos) dependem do modo de operação configurado nas unidades de produção. Estas unidades de produção compreendem unidades de destilação atmosférica (ATM), unidades de destilação a vácuo (VDU), unidades de dessulfurização de hidrogênio (HDS), unidades de eterificação (ETH), reformadores catalíticos (RF), e outros. O objetivo consiste em minimizar os custos de produção, dados pelo custos do petróleo cru, custos de trocas no modo de operação, custos de estocagem e penalidades associadas ao não atendimento da demanda. Todas estas decisões são tomadas considerando principalmente restrições relacionadas à capacidade mínima e máxima nos tanques de armazenagem e unidades de produção; tempos e custos de transição dependentes da sequência, ou seja, tempos e custos associados às trocas no modo de operação das unidades.

[Göthe-Lundgren, Lundgren e Persson \(2002\)](#) também abordam as decisões de programação da produção em refinarias, cuja representação do problema de otimização é inspirado no sistema de produção de uma fábrica na Suécia. Similarmente ao trabalho descrito anteriormente, as principais decisões consistem em determinar o modo de operação das unidades de destilação e hidrotratamento, tal que a demanda de diferentes produtos (*i.e.*, betume, combustíveis e óleos naftênicos especiais) seja atendida, minimizando os tempos de estocagem e trocas independentes da sequência de produção.

[Paiva e Morabito \(2007\)](#), [Paiva e Morabito \(2009\)](#) estudam uma aplicação dos problemas com decisões de configuração de processos nas usinas de açúcar e álcool. O processo agroindustrial de produção de açúcar, álcool, melão e subprodutos é realizado em três etapas principais: etapa agrícola, etapa CCT (corte, carregamento e transporte) e a etapa industrial. As decisões abordadas nestes trabalhos compreendem a determinação das quantidades de matéria prima (etapa agrícola), como transportar a matéria prima (etapa CCT), quanto e quando produzir de cada produto, quais processos utilizar em cada período, e qual política de estoque adotar (etapa industrial), de forma que a usina maximize sua margem de contribuição ao lucro. Nesta aplicação, as configurações de processo alternativas por meio das quais são obtidos os diferentes produtos (*i.e.*, açúcares e álcoois) consistem em transformações químicas e físicas que acontecem nas diferentes operações unitárias de produção. Para resolver o problema, um modelo matemático de tempo discreto é formulado e resolvido através do *solver* CPLEX.

Outra aplicação que integra decisões de configuração de processo e dimensionamento de lotes é estudada por [Gaudreault et al. \(2011\)](#) na indústria de madeira serrada. Nesta aplicação, o processo de produção compreende os estágios de (i) secagem ao ar livre, (ii) secagem no forno, (iii) equalização e (iv) finalização. Cada um destes estágios pode ser executado usando

configurações alternativas, gerando produtos de diferentes qualidades e tamanhos. Os estágios de secagem ao ar livre, no forno e equalização, por exemplo, diferem entre si pelo tempo de secagem, umidade do material e temperatura do forno, gerando assim peças de madeira de diferentes qualidades. Já o estágio de finalização, que consiste no aplanamento, classificação e corte das peças de madeira, pode ser executado de acordo com diferentes tipos de corte. Cada combinação permitida destas operações ((i), (ii), (iii) e (iv)) define uma configuração de processo alternativa, que gera um *mix* de produtos diferentes e consome uma quantidade de recursos específica. Particularmente nesse sistema de produção, as possíveis configurações de processo são chamados de “*kiln loading patterns*”. As principais decisões do problema compreendem determinar quais configurações de processo implementar, definir em quais períodos do horizonte devem ser implementados e em quais máquinas devem ser programados, de modo a minimizar o atraso no atendimento da demanda.

Outro exemplo de problemas de configuração de processos surge na indústria de grãos eletrofundidos (LUCHE; MORABITO; PUREZA, 2009; LUCHE; MORABITO, 2005). O processo de produção nesta aplicação compreende as etapas de mistura, fundição, separação manual, britagem, moenda, separação magnética, classificação de grãos e envio aos clientes. Os produtos consistem em grãos de diferentes tamanhos, cuja obtenção depende basicamente da regulagem dos moinhos na etapa de moenda, e do conjunto de peneiras utilizadas na etapa de classificação de grãos. O conjunto de peneiras tem a finalidade de separar grãos por tamanho e pode ser configurado de acordo com diferentes combinações de peneiras. Já a regulagem dos moinhos determina a quantidade de produto produzido. Desta forma, uma configuração de processo em particular consiste basicamente na regulagem dos moinhos e na escolha de um conjunto de peneiras usadas em um dia de trabalho. As principais decisões incluem determinar qual configuração de processo utilizar em cada período do horizonte de planejamento, considerando restrições de atendimento à demanda, capacidade, e tempos de *setup* independentes da sequência; minimizando o atraso no atendimento da demanda.

Decisões de configuração de processos aparecem também nas indústrias que usam processos de impressão *offset*. Este processo de impressão é apropriado para indústrias de grande escala as quais focam em produção de grandes volumes e alta qualidade. Aplicações típicas incluem a impressão de jornais, revistas e livros. Baumann, Forrer e Trautmann (2015), Baumann e Trautmann (2014) apresentam uma aplicação deste processo na produção de embalagens personalizadas para guardanapos. Nesta aplicação, o *design* especificado pelos clientes é impresso nas embalagens por meio de placas de impressão rotatórias, e em seguida passa por um estágio de corte, dobrado e colado. As placas de impressão usadas consistem em um conjunto de ranhuras (*slots*), de modo que um *design* específico é alocado em cada ranhura. Desta forma, o problema de planejamento consiste em decidir o número de placas de impressão requeridas, a alocação dos *designs* em cada uma das ranhuras de cada placa e o número de rotações de cada placa, de modo que a demanda de cada *design* seja atendida completamente, as restrições tecnológicas do problema sejam satisfeitas e os custos totais sejam minimizados. As restrições tecnológicas,

similarmente ao problema de planejamento na indústria de polpa, incluem incompatibilidades de produtos e restrição no número de cores dos *designs* alocados em cada placa.

As Tabelas 2.4 e 2.5 apresentam um resumo de algumas aplicações industriais que incluem decisões de configuração de processos no planejamento e programação da produção. As representações matemáticas derivadas destas aplicações envolvem modelos mais complexos que as formulações clássicas dos problemas de planejamento e programação da produção, devido à consideração de restrições tecnológicas, físicas, químicas e decisões particulares de cada tipo de indústria. Embora estes trabalhos incluam modelos matemáticos específicos de acordo com cada aplicação, a tabela a seguir identifica basicamente os tipos de produtos produzidos em cada indústria, o que representa uma configuração de processo com cada aplicação, as principais características das abordagens de otimização propostas em cada trabalho e o método de solução implementado.

Similarmente às aplicações mencionadas acima, as decisões de planejamento e programação na indústria de polpa moldada são principalmente focadas e dependentes da configuração de processos usadas para a produção dos itens demandados. Na literatura, apenas o trabalho desenvolvido anteriormente e apresentado em [Martínez e Toso \(2015\)](#) trata o problema de planejamento e programação da produção na indústria de polpa moldada. Neste apresenta-se uma descrição da indústria, do processo de produção e decisões de planejamento, porém assume-se que as configurações de processo (i.e., padrões de moldagem e designação de produtos) são definidos com antecedência às decisões de planejamento. Visando a representação e resolução do problema de otimização de forma integrada, a pesquisa desenvolvida nesta tese foca nas decisões de determinação de configurações de processo, i.e., determinação de padrões de moldagem e produtos produzidos, e a suas integrações com as decisões de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção. Desta forma, a revisão de literatura apresentada neste capítulo ressalta a originalidade e ineditismo do tema de pesquisa desenvolvido nesta tese, o qual procura contribuições científicas no estudo de aplicações de problemas de planejamento e na integração de decisões de dimensionamento e sequenciamento de lotes com outras decisões de planejamento de nível tático-operacional.

Tipo de indústria	Referências	Processos	Produtos	Características da representação matemática	Métodos
Grãos eletrofundidos	Luche e Morabito (2005), Luche, Morabito e Pureza (2009)	Configuração dos moinhos e combinações de peneiras de diferentes tamanhos	Grãos eletrofundidos de diferentes gramaturas	Modelo de programação inteira mista (PIM) de tempo discreto, em que apenas um processo é utilizado em cada período, consumindo toda a capacidade do mesmo. Única máquina. Único estágio. Tempos de <i>setup</i> independentes da sequência. Restrições de capacidade.	<i>Solver</i> CPLEX e Heurística construtiva
Madeira serrada	Gaudreault et al. (2011)	Padrões de carga de forno (<i>kiln loading patterns</i>), i.e. alternativas de secagem e finalização do produto	Peças de madeira de diferente qualidade e tamanho	Modelo PIM de tempo discreto, em que apenas um processo é utilizado em cada período, consumindo toda a capacidade do mesmo. Múltiplas máquinas. Múltiplos estágios. Restrições de capacidade. É apresentada também uma formulação de Programação por Restrições.	<i>Solver</i> CPLEX e Algoritmos de busca para programação por restrições
Refinarias de petróleo	Shi et al. (2014)	Modos de operação nas unidades de produção	Diferentes tipos de gasolina e diesel	Modelo PIM de tempo discreto, em que apenas um modo de operação pode ser configurado em cada período, consumindo toda a capacidade do mesmo. Tempos e custos de <i>setup</i> dependentes da sequência. Múltiplas máquinas. Múltiplos estágios. Restrições de capacidade mínima e máxima nas unidades de produção e armazenagem, balanceamento de massa, entre outras.	<i>solver</i> CPLEX
Usina de açúcar e álcool	Göthe-Lundgren, Lundgren e Persson (2002)	Modos de operação nas unidades de hidrotreatamento e destilação	Betume, combustíveis e óleos nftênicos especiais.	Modelo PIM de tempo discreto, em que apenas um modo de operação pode ser configurado em cada período, consumindo toda a capacidade do mesmo. Múltiplos estágios. Custos de <i>setup</i> independentes da sequência. Algumas extensões do modelo são apresentadas, entre elas, considera-se que os <i>setup</i> podem ocorrer em qualquer instante dentro de cada período, permitindo a utilização de até dois modos de operação por período.	<i>Solver</i> CPLEX e Busca Tabu
Usina de açúcar e álcool	Paiva e Morabito (2007), Paiva e Morabito (2009)	Processos de características químicas e físicas variadas para a obtenção de açúcares e álcoois	Açúcares, álcoois e melaios	Modelo PIM de tempo discreto, em que apenas um modo de operação pode ser configurado em cada período, consumindo toda a capacidade do mesmo. Monoestágio. Restrições de capacidade relacionadas ao consumo de matérias primas, capital de giro, transporte, entre outras.	<i>Solver</i> CPLEX

Tabela 2.4: Aplicações industriais que consideram decisões de configuração de processos, dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção

Tipo de indústria	Referências	Processos	Produtos	Características da representação matemática	Métodos
Impressão <i>offset</i>	Baumann, Forrer e Trautmann (2015), Baumann e Trautmann (2014)	Placas de impressão com diferentes combinações de <i>designs</i>	Embalagens customizadas para guardanapos	Modelo PIM com demanda estática. Monoestágio. Restrições de capacidade relacionadas ao tamanho das placas de impressão. Restrições tecnológicas relacionadas ao número de cores usados simultaneamente, designs com bordes brancos, e estrutura de atendimento da demanda.	<i>Solver</i> GUROBI, desigualdades de eliminação de simetrias, heurística baseada em economias (<i>Saving-based heuristic</i>)
Indústria de moda	Degraeve e Vandebroek (1998)	Modelos de corte (<i>stencils</i>) com diferentes combinações de peças	Peças de roupas de diferentes tamanhos	Modelo PIM com demanda estática. Monoestágio. Restrições de capacidade relacionadas à altura máxima das pilhas de tecido e à largura da superfície de corte	Linearização da formulação PIM proposta e resolução via um <i>solver</i> comercial. Comparações com uma formulação de enumeração completa.

Tabela 2.5: Aplicações industriais que consideram decisões de configuração de processos, dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção

Capítulo 3

Descrição do problema

A indústria de polpa moldada compreende vários setores de aplicação, principalmente relacionados à produção de embalagens para alimentos e frutas, aplicações no setor hospitalar, industrial, eletrônico e automotivo. Embora algumas características dos sistemas de produção possam variar de acordo com o tipo de produto, o equipamento de moldagem utilizado nas linhas de produção e as etapas do processo de moldagem são similares para ambientes de produção projetados para produtos de diferentes aplicações. Assim, a descrição do processo de manufatura neste capítulo é apresentada de modo geral e é válida para diferentes empresas de polpa moldada, independente da natureza dos itens produzidos. A Seção 3.1 descreve as principais etapas do processo de produção. A Seção 3.2 apresenta o escopo desta pesquisa, descreve as decisões de planejamento a serem abordadas e as características específicas do problema.

3.1 Processo de produção

As principais etapas do processo de produção de produtos de polpa moldada consistem em: formação da polpa, moldagem, secagem e preparação para estoque ou embalagem para expedição. A Figura 3.1 ilustra estas etapas numa linha de produção em grande escala utilizada nesta indústria.

1. **Formação da polpa:** nesta etapa as matérias primas conformadas por papel pós-consumo, papelão e outros materiais formados por fibra de papel, são misturadas em um equipamento denominado *Hydrapulper* ([1] na Figura 3.1). Cada linha de produção possui apenas um *Hydrapulper* que supre o estágio de moldagem. Em ambientes de produção de grande escala, as linhas de produção são usualmente projetadas para operar com um *Hydrapulper* dedicado para cada linha. Neste equipamento, as fibras de papel são desagregadas e misturadas com água a temperaturas que variam entre 30°C e 70°C (KUIPER; KOOPMANS, 2001). Este procedimento demora aproximadamente 20 minutos, sendo finalizado no momento em que a polpa atinge as condições desejadas de consistência e

umidade. Em seguida, a polpa passa por um sistema de peneiras vibratórias, as quais filtram as impurezas mais grosseiras da polpa. Após isso, a polpa passa para os tanques de armazenagem [2] que suprem o estágio de moldagem.

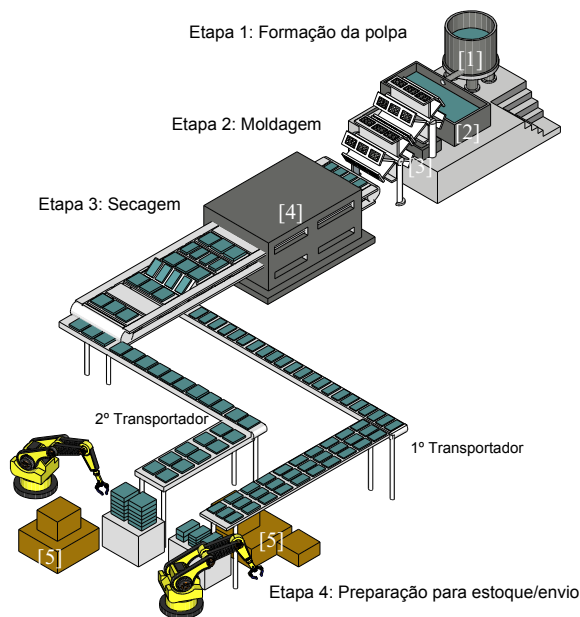


Figura 3.1: Ilustração de uma linha de produção numa fábrica de embalagens de polpa moldada de grande escala
 Fonte: (MARTÍNEZ; TOSO; MORABITO, 2016)

2. **Moldagem:** nesta etapa a polpa é moldada de acordo com o formato dos moldes acoplados na máquina, obtendo assim os produtos demandados. A combinação de moldes acoplados na máquina de moldagem é denominado *padrão de moldagem*. Um padrão de moldagem permite a produção de um ou mais produtos de forma simultânea. O *mix* e volume de produtos produzidos (i.e., unidades de produto por hora) dependem da definição do padrão de moldagem configurado na máquina e o tipo de polpa utilizado.

O equipamento de moldagem varia de acordo com a escala e os tipos de produtos a serem produzidos. As máquinas mais comuns na indústria consistem no equipamento de moldagem do tipo vertical (Figura 3.2), giratória (Figura 3.3) e rotatória (Figura 3.4).

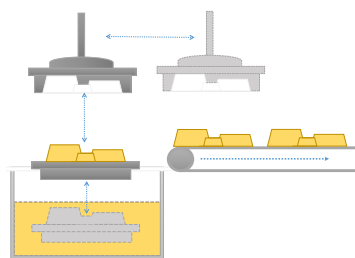


Figura 3.2: Máquina de moldagem vertical
 Fonte: Adaptado de PendlePace-Ltda. (2005)

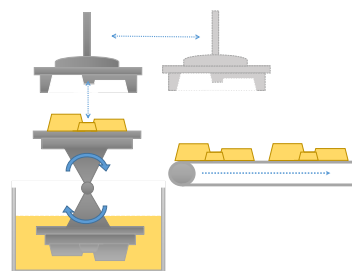


Figura 3.3: Máquina de moldagem giratória
 Fonte: Adaptado de PendlePace-Ltda. (2005)

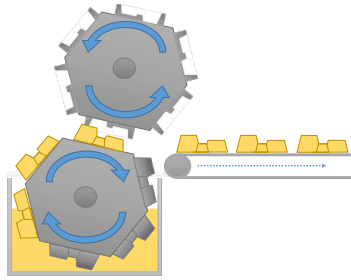


Figura 3.4: Máquina de moldagem rotatória

Fonte: Adaptado de [PendlePace-Ltda. \(2005\)](#)

As máquinas de moldagem verticais são apropriadas para produzir produtos em pequenas quantidades, de diferentes formatos e espessuras, geralmente de superfície lisa e melhor acabamento. O volume de produção deste equipamento varia entre 300 e 1.000 unidades por hora. As máquinas giratórias possuem uma capacidade maior que as verticais (*i.e.*, aproximadamente entre 2.000 e 10.000 unidades/hora), no entanto, esta máquina limita a produção de alguns produtos, especialmente aqueles que possuem maior espessura. Já as máquinas rotatórias são apropriadas para a produção de grandes volumes de produção de diversos produtos, em geral de baixa espessura, como bandejas e estojos para ovos e frutas. As máquinas deste tipo possuem um conjunto de faces acopladas a um eixo rotatório, nas quais é acoplado um conjunto de moldes individuais. As máquinas rotatórias mais comuns comercialmente possuem 4, 6 ou 8 faces de diferentes tamanhos. O volume de produção destes equipamentos varia entre 15.000 e 42.000 unidades por hora.

O objeto de estudo nesta pesquisa é focado em sistemas de produção com máquinas de moldagem rotatórias. Estes sistemas de produção são considerados de grande escala, devido à produção de grandes volumes de produto por unidade de tempo. As linhas de produção nestes ambientes tendem a ser mais complexas que as utilizadas em sistemas de produção de menor escala, devido ao acoplamento de equipamentos de transporte e empacotamento automatizados que trabalham em sincronia com a máquina de moldagem. Isso implica em operações de *setup* mais complexas, restrições tecnológicas e de sincronia no processo que tornam ainda mais desafiantes as decisões de planejamento. Além disto, as máquinas de moldagem rotatórias tem capacidade para acoplar um maior número de moldes de diferentes tamanhos e formatos, o que faz com que o número de padrões de moldagens possíveis para produção seja ainda maior que nos sistemas com equipamentos de moldagem menores. Note também que os ambientes de produção com máquinas verticais e giratórias, podem ser considerados como casos especiais das máquinas rotárias com uma ou duas faces, respectivamente. Uma vez que as decisões de planejamento dependem da configuração do processo de moldagem, e o número de possíveis padrões de moldagem é usualmente grande e complexo de terminar em ambientes de produção como os descritos acima, esta pesquisa é baseada em sistemas de produção com máquinas de moldagem do tipo rotatória.

3. **Secagem:** nesta etapa os produtos semi-acabados são transportados por esteiras e passam por um forno industrial. A temperatura e tempo de secagem depende da variedade produtos produzidos, de modo que para produtos produzidos em grandes volumes, as temperaturas do forno e o tempo de secagem são definidos entre 100°C e 300°C e 10 - 15 minutos, respectivamente. Após esta etapa do processo, o produto está apto para ser expedido aos clientes ou aguardar por outras etapas de finalização.
4. **Preparação para estoque/envio:** nesta etapa os produtos são separados, embalados e dispostos em paletes, a fim de serem etiquetados e enviados diretamente aos clientes, ou para serem enviados a um depósito intermediário para aguardar por outros estágios do processo. As atividades de separação e empacotamento nesta etapa do processo são usualmente automatizadas nos sistemas de produção de grande escala, onde a taxa de produção pode superar as 150 unidades por minuto. Nestes casos, o estado de preparação destes equipamentos e a máquina de moldagem deve ser propriamente relacionado, de modo que a sincronia do processo de produção seja garantida. Estas particularidades e restrições de sincronia são melhor descritas na definição do escopo do problema na Seção [3.2](#).

As etapas descritas nos itens 1-4 são consideradas comuns a todos os processos de produção de produtos de polpa moldada, e em conjunto constituem o *processo de moldagem*. Embora este processo envolva várias etapas de produção, considera-se como um processo mono-estágio, já que o material é processado de forma contínua na linha de produção, sem estoques intermediários.

5. **Outros estágios dependentes da natureza dos produtos:** dependendo do tipo de produto final, as saídas do processo de moldagem são consideradas produtos semi-acabados que requerem ainda processamento em estágios adicionais. Alguns destes estágios são os seguintes.
 - Prensagem: neste estágio é dado um melhor acabamento e resistência mecânica ao produto. Este processo é realizado a altas temperaturas, por meio de máquinas de prensagem nas quais são acoplados moldes do mesmo formato dos produtos. Este estágio é realizado, por exemplo, na produção de estojos para ovos, pratos e copos descartáveis, entre outros produtos de superfície relativamente suave. O processo de prensagem pode ser projetado de forma integrada ao processo de moldagem, ou como um processo independente, permitindo estoques intermediários.
 - Revestimento: alguns tipos de produtos precisam de um revestimento particular de modo que possam suportar condições especiais de umidade, altas ou baixas temperaturas, vapor, entre outras. Alguns produtos que precisam deste processo são as bandejas para carnes de origem animal e carnes frias, já que estas embalagens devem garantir a oxigenação dos produtos e a absorção dos líquidos residuais ([EMFA](#),

2017).

- Impressão: permite a personalização dos produtos de acordo com as especificações dos clientes.

3.2 Escopo do problema e decisões de planejamento

Esta pesquisa aborda o problema de planejamento e programação da produção na indústria de polpa moldada. O sistema de produção considerado é definido como mono-estágio e de uma única linha. As decisões de planejamento são determinadas para um horizonte de planejamento finito de múltiplos períodos. As abordagens aqui apresentadas são focadas em sistemas de produção de grande escala com máquinas de moldagem rotatórias, podendo ser adaptadas para representar as decisões de planejamento em ambientes com equipamentos de moldagem diferente.

Como mencionado em seções anteriores, o mix e volume de produtos produzidos nesta indústria depende das configurações de processo utilizadas e o tempo de produção sob cada configuração, enquanto os tempos e custos de *setup* dependem da escolha e sequência em que as configurações de processo são programadas ao longo do horizonte de planejamento. Assim, o problema de otimização em estudo integra três decisões de planejamento e programação da produção: (i) configuração do processo de moldagem, (ii) dimensionamento de lotes e (iii) decisões de sequenciamento, como ilustrado na Figura 3.5.

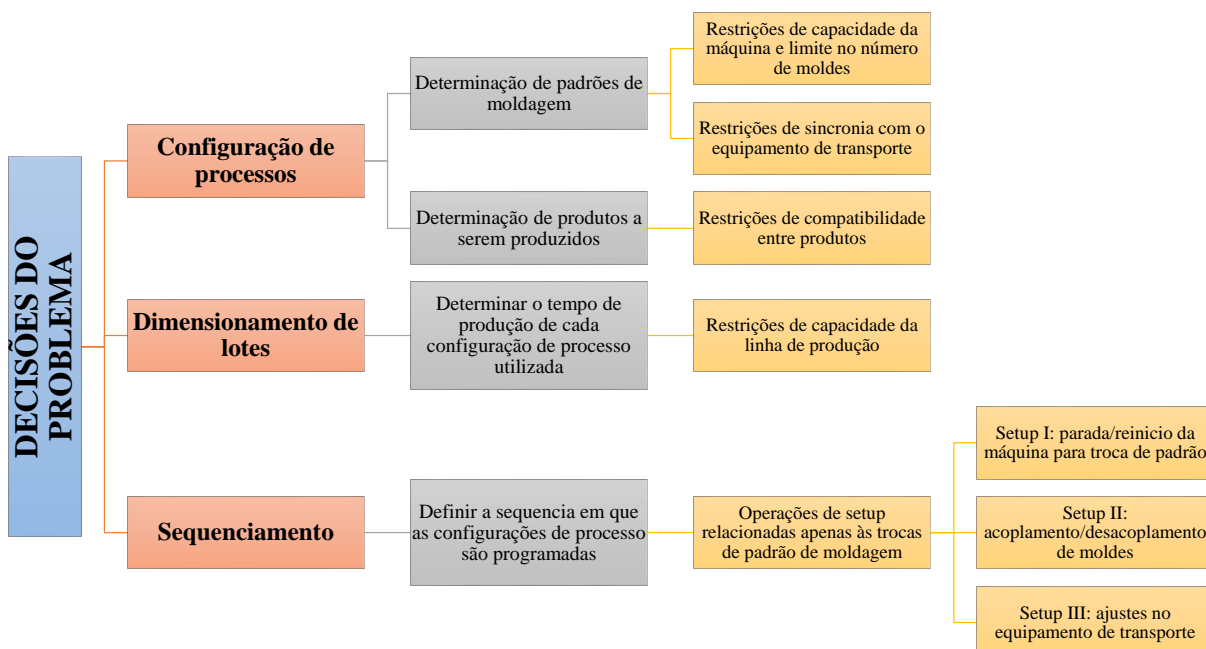


Figura 3.5: Decisões de planejamento e programação da produção no problema de otimização estudado

Fonte: Criado pelo autor

As decisões de configuração do processo de moldagem consistem na determinação da combinação

de moldes acoplada na máquina de moldagem (*i.e.*, determinar os padrões de moldagem) e os tipos de produtos a serem produzidos em cada instante de tempo. As decisões de dimensionamento de lotes consistem em determinar o tempo de produção da linha de produção sob cada configuração de processo definida. As decisões de sequenciamento consistem em determinar a sequência em que as configurações de processo são programadas ao longo do horizonte, os quais incluem tempos e custos de *setup* dependentes da sequência. O objetivo é atender a demanda, minimizando os custos totais de *setup*, atraso e estoque. A seguir são descritas em detalhes as principais decisões e considerações do problema.

3.2.1 Decisões de configuração de processo

Os produtos nesta indústria são diferenciados por duas características físicas: formato, o qual é determinado pelo tipo de molde usado para sua produção; e cor, o qual é definido pela composição da polpa. Uma linha de produção é sempre preparada para apenas uma cor de polpa por vez. Assim, cada produto é produzido por apenas um tipo de molde, mas cada tipo de molde pode produzir um ou mais produtos de forma não simultânea.

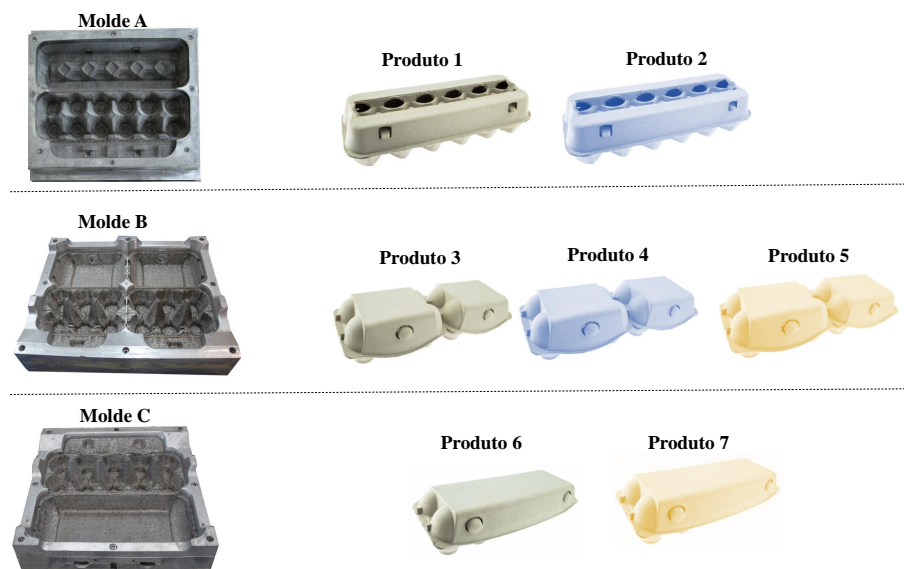


Figura 3.6: Exemplos de produtos e moldes
Fonte: Criado pelo autor

Por exemplo, a Figura 3.6 ilustra uma situação em que existem 3 tipos de moldes e 7 tipos de produtos. Os produtos 1 e 2 são obtidos a partir de moldes tipo A, ou seja, estes produtos possuem o mesmo formato e são diferentes apenas pela cor. Uma vez que a linha de produção é preparada para apenas uma cor de polpa por vez, produtos 1 e 2 não podem ser produzidos de forma simultânea. As mesmas considerações aplicam para os produtos 3, 4 e 5 obtidos por meio de moldes tipo B; e produtos 6 e 7 obtidos a partir de moldes tipo C.

Uma configuração de processo em particular é definida ao se especificar o padrão de moldagem acoplado na máquina e os tipos de produtos a serem produzidos em determinado instante

de tempo. Um padrão de moldagem é definido ao se especificar quais os tipos de moldes e quantos moldes de cada tipo são acoplados no total na máquina de moldagem. Cada padrão pode incluir um único tipo ou vários tipos de moldes, implicando a produção simultânea de produtos diferentes. As Tabelas 3.1 e 3.2 apresentam exemplos de padrões de moldagem e configurações de processo, respectivamente. Note que um determinado padrão de moldagem pode ser utilizado para produzir produtos diferentes, usando matéria prima diferente, e.g., polpa de diferentes cores.

Padrão 1	Padrão 2	Padrão 3
24 moldes A	12 moldes A	16 moldes B
	12 moldes B	8 moldes C

Tabela 3.1: Exemplos de padrão de moldagem

Configuração 1		Configuração 2		Configuração 3	
Padrão	Itens produzidos	Padrão	Itens produzidos	Padrão	Itens produzidos
12 moldes A	Produto 1	12 moldes A	Produto 2	16 moldes A	Produto 2
12 moldes B	Produto 3	12 moldes B	Produto 4	8 moldes B	Produto 4

Tabela 3.2: Exemplos de possíveis configurações de processo

Algumas restrições tecnológicas importantes devem ser levadas em conta nas decisões de configuração de processo. A primeira delas é relacionada à determinação dos produtos a serem produzidos e impõe que produtos incompatíveis entre si não sejam manufaturados simultaneamente, ou seja, estes não podem coexistir em uma mesma configuração. Estas incompatibilidades entre produtos aparecem devido às diferenças de cor, como mencionado anteriormente, mas também estão relacionados ao peso dos produtos e decisões estratégicas de produção. Por exemplo, produtos como estojos para ovos e bandejas para carnes e frios podem ser considerados estrategicamente incompatíveis, dado que as bandejas precisam de químicos adicionais na polpa para garantir a qualidade do produto (absorção de líquidos, resistência a baixas temperatura e umidade, entre outras), o que faz com que a composição da polpa seja mais custosa. Nestes casos, tomadores de decisões consideram que produzir simultaneamente estojos para ovos e bandejas para carnes simultaneamente não é economicamente viável, dado que aumenta os custos de produção dos estojos significativamente.

Outras restrições tecnológicas neste nível de decisão devem ser consideradas para determinar padrões de moldagem que possam ser acoplados de forma factível na máquina. Estas restrições compreendem capacidade da máquina de moldagem, limite no número de moldes e sincronia entre a máquina de moldagem e outros equipamentos da linha de produção. A capacidade da máquina, em termos de espaço para acoplamento de moldes, deve ser utilizada totalmente na definição dos padrões de moldagem. Isto implica que em cada face da máquina

deve ser acoplados tantos moldes quanto seja possível. Faces sem moldes ou parcialmente utilizadas não são permitidas, uma vez que isto pode causar a produção de itens com defeito, além de ser considerado economicamente indesejável na prática. O número de moldes de cada tipo é limitado, de modo que padrões de moldagem definidos não devem exceder este limite. Já as restrições de sincronia implicam uma relação específica entre o estado de preparação da máquina de moldagem com o estado de preparação de outros equipamentos na linha de produção, tais como transportadores, equipamentos de prensagem e/ou empacotamento.

A fim de explicar melhor as restrições de sincronia na definição de padrões de moldagem, a Figura 3.7 é apresentada, ilustrando também parte da notação utilizada na representação matemática do problema. Um conjunto de esteiras K transporta os produtos semi-acabados até a etapa de preparação para envio. As linhas de produção com máquinas de moldagem rotatórias são projetadas de modo que os produtos formados por moldes acoplados a um subconjunto das faces da máquina são descarregados e transportados exclusivamente por transportadores específicos. Além disso, os transportadores devem transportar os produtos ordenadamente nas diferentes faixas de separação durante o tempo de operação de uma configuração específica, *i.e.*, apenas um tipo de produto é transportado em cada faixa de separação de cada transportador. A designação de faces aos transportadores são competência do projeto de fábrica, consequentemente estas são consideradas como conhecidas *a priori* no problema de otimização estudado. Já o número de faixas configurado em cada transportador depende do tamanho dos produtos a serem produzidos sob cada configuração e está relacionado às decisões de sequenciamento do problema descritos em detalhe na Seção 3.2.3. Desta forma, assume-se que o conjunto de faces da máquina de moldagem F é dividido em K subconjuntos disjuntos (*i.e.*, $F = \bigcup_{k \in K} F_k$ e $\bigcap_{k \in K} F_k = \emptyset$), em que F_k é denominado como o conjunto de faces da máquina para o transportador k .

Observe, por exemplo, na Figura 3.7, a sincronia de uma linha de produção conformada por uma máquina de moldagem de seis faces e dois transportadores. Os produtos produzidos pelos moldes acoplados nas faces 1, 3 e 5 são transportados pelo transportador 1, enquanto os produtos produzidos pelas faces 2, 4 e 6 são transportados no transportador 2. O transportador 1 possui três faixas de separação que alimentam as etapas de empacotamento e preparação para expedição. Já o transportador 2 possui duas faixas de separação. A sequência dos moldes para os produtos A, B e C nas faces 1, 2 e 3 é tal que o produto A é sempre transportado na primeira faixa, o produto B na segunda faixa e o produto C na terceira faixa. Assim, uma vez que os produtos são direcionados aos transportadores correspondentes, estes devem ser transportados na mesma ordem durante todo o tempo de produção sob tal configuração de processo. Esta condição de operação deve ser satisfeita para manter a sincronia da linha e garantir que outras etapas do processo, tais como prensagem ou empacotamento, possam ser realizadas apropriadamente.

Os padrões de moldagem que não garantem que os produtos obtidos a partir deles sejam

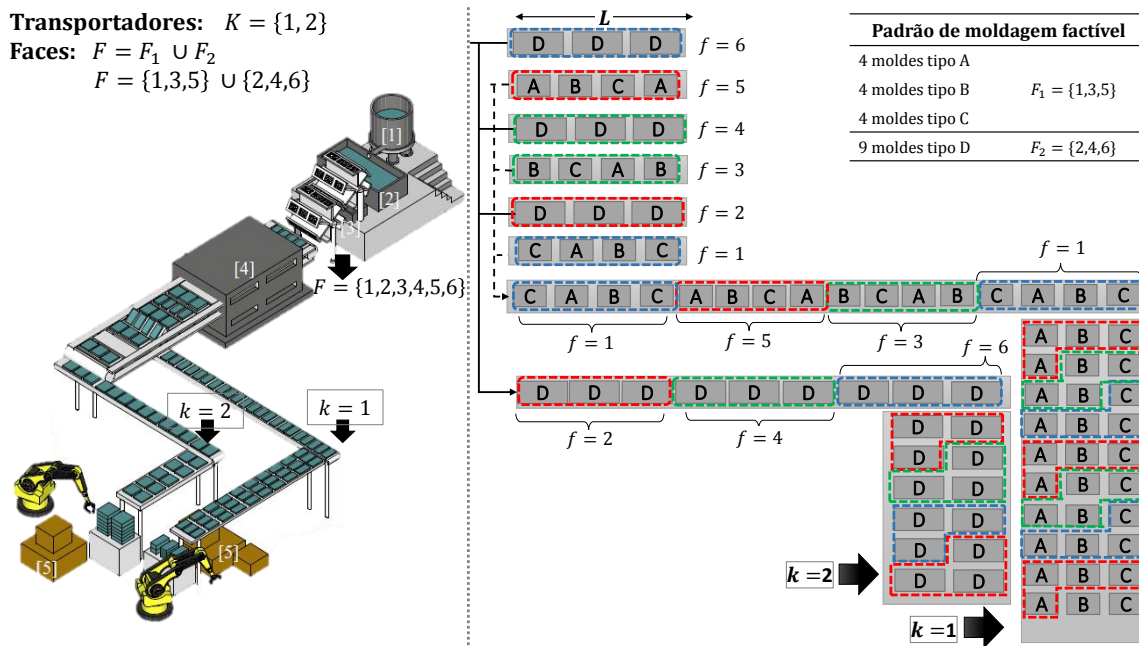


Figura 3.7: Sincronia entre a máquina de moldagem e transportadores numa linha de produção

transportados adequadamente nos transportadores, não são considerados factíveis. Veja, por exemplo, o padrão de moldagem ilustrado na Figura 3.8, no qual a combinação de moldes acopladas nas faces para o transportador $k = 1$ não garante que os produtos A, B e C sejam transportados adequadamente como requerido operacionalmente. Note que, após algumas rotações da máquina, os produtos do tipo B, que deveriam ser transportados exclusivamente na segunda faixa, são misturados eventualmente com produtos do tipo C, resultando em falhas de produção nas etapas subsequentes do processo.

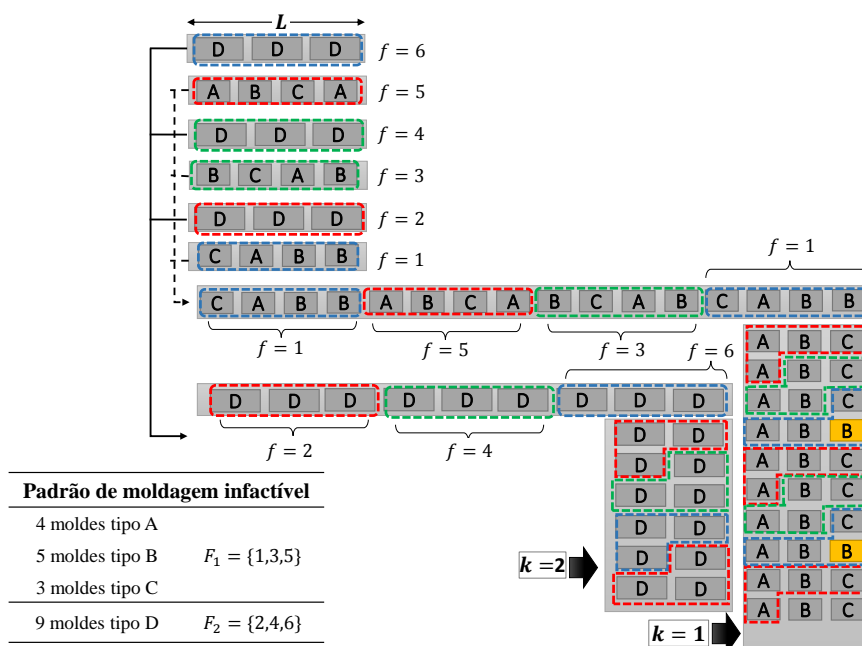


Figura 3.8: Exemplo de um padrão de moldagem infactível

3.2.2 Decisões de dimensionamento de lotes

As quantidades produzidas de cada produto dependem das configurações de processo utilizadas e da velocidade da máquina de moldagem. A velocidade da máquina é considerada como um parâmetro conhecido com antecedência, de modo que as decisões de dimensionamento de lotes limitam-se à definição do tempo de produção de cada configuração de processo utilizada.

Considere, por exemplo, que as configurações de processo na Tabela 3.2 são configurações possíveis para uma linha de produção, cuja máquina de moldagem tem uma velocidade de 300 rotações por hora. Se em um determinado período de tempo, a Configuração 1 é utilizada durante 3 horas e a Configuração 2 durante 1 hora, ao final deste período serão produzidas $(12)(3)(300) = 10.800$ unidades do produto 1, 10.800 unidades do produto 3, 3.600 unidades do produto 2 e 3.600 unidades do produto 4. Assim, uma vez determinadas as configurações de processo a serem utilizadas, as decisões de dimensionamento são abordadas para determinar o volume de produção de cada produto.

3.2.3 Decisões de sequenciamento

As decisões de sequenciamento da produção determinam a ordem em que as configurações de processo devem ser programados ao longo do horizonte de planejamento, de modo que os custos de *setup* sejam minimizados. Uma vez que a proposta desta pesquisa consiste em integrar as decisões de geração de configuração de processos, dimensionamento de lotes e sequenciamento, os tempos e custos de *setup* não são conhecidos *a priori*, portanto, devem ser calculados nas abordagens propostas.

Uma troca de configuração de processo acontece na prática quando ao menos uma das seguintes operações é requerida: (i) troca de padrão de moldagem (*e.g.*, troca da Configuração 2 para a Configuração 3 na Tabela 3.2) ou (ii) troca nos produtos produzidos (*e.g.*, troca da Configuração 1 para a Configuração 2 na Tabela 3.2). Trocas de produtos envolvem tempos e custos de *setup* significativamente menores que as trocas de padrão de moldagem, o que faz com que sejam considerados desprezíveis usualmente na prática. Já os tempos e custos de *setup* envolvidos na troca de padrões representam um consumo importante de recursos e são dependentes da sequência. Assim, nas abordagens de otimização propostas nesta pesquisa são considerados apenas as operações de *setup* relacionadas às trocas de padrão de moldagem. A fim de representar apropriadamente as decisões de sequenciamento, consideram-se três tipos de operações de *setup*.

Setup I: representa a ação de parar e reiniciar a linha de produção, toda vez que ao menos um molde precisa ser acoplado ou desacoplado para configurar um padrão de moldagem diferente. Esta operação implica em um tempo de preparação fixo, independente da sequência em que os padrões são programados.

Setup II: representa a ação de acoplar e desacoplar moldes das faces da máquina de moldagem. O tempo e custo total neste tipo de *setup* é proporcional ao número de moldes que são acoplados e desacoplados para conformar um novo padrão.

Setup III: representa as operações de preparação realizadas nos transportadores. Esta operação de *setup* consiste basicamente no ajuste das abas de separação nos transportadores, de acordo com a largura dos produtos que serão moldados pelo padrão de moldagem configurado. Os tempos de *setup* neste tipo de operação usualmente envolvem várias horas, *e.g.*, entre 10 e 30 horas no caso de linhas de produção de embalagens para ovos e frutas. Este tipo de *setup* é apenas necessário quando moldes de diferentes larguras aos utilizados previamente na máquina precisam ser acoplados para configurar um novo padrão de moldagem.

De modo geral, este capítulo apresentou a descrição do processo de produção em empresas do setor de embalagens de polpa moldada, especificando as principais etapas de produção e as características do equipamento e linhas de produção nesta indústria. As decisões envolvidas no planejamento da produção, *i.e.*, decisões de configuração de processo, decisões de dimensionamento de lotes e decisões de sequenciamento da produção, foram também apresentadas neste capítulo, descrevendo as restrições tecnológicas e considerações que devem ser levadas em conta para cada uma delas. O capítulo a seguir apresenta as formulações matemáticas propostas para representar o sistema de produção e decisões de planejamento aqui descritas.

Capítulo 4

Modelagem matemática

Este capítulo apresenta duas formulações matemáticas para representar o problema de planejamento e programação da produção em estudo. Ambos os modelos abordam de forma integrada as decisões relacionadas à configuração do processo de moldagem, dimensionamento e sequenciamento da produção. No entanto, a principal diferença entre as formulações propostas encontra-se na forma como são representadas as decisões de configuração de processo, especificamente como os padrões de moldagem são determinados. No primeiro modelo, os padrões de moldagem são definidos a partir de um conjunto de *estruturas predefinidas* para a linha de produção, as quais assumem-se como conhecidas *a priori*; enquanto no segundo modelo, os padrões de moldagem são gerados levando em conta as características dos equipamentos da linha de produção, mais especificamente da máquina de moldagem e dos transportadores, e a sincronia entre estes.

Os seguintes pressupostos e considerações se aplicam a ambas as formulações propostas nesta pesquisa.

- i. Os modelos apresentados representam um sistema de produção mono-estágio e mono-linha de produção.
- ii. As duas formulações são baseadas no modelo clássico para o Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes Geral (GLSP), no sentido de que o horizonte de planejamento é dividido em T períodos de tempo sem sobreposição (por exemplo, uma semana). Cada período é sub-dividido em S sub-períodos de tamanho variável. Em cada um destes sub-períodos $s \in S$, apenas uma configuração de processo pode ser definida e utilizada. O tempo de utilização de cada configuração define implicitamente a dimensão do sub-período s correspondente.

A formulação clássica do GLSP mostra-se adequada para representar as decisões do problema em estudo devido a sua estrutura de tempo. Neste problema considera-se cada período de tempo como uma semana do horizonte de planejamento, sendo que várias

configurações de processo podem ser utilizadas dentro de um período de tempo. A divisão dos períodos em um número discreto de sub-períodos permite a utilização de várias configurações de processo em cada período, de modo que o tempo de produção de cada configuração, o qual é uma variável contínua, é naturalmente associado à dimensão de cada sub-período.

- iii. Uma vez que as configurações de processo são geradas de forma integrada às decisões de sequenciamento nas abordagens propostas, os tempos e custos de *setup* devem ser também determinados. Como apresentado no capítulo anterior, que descreve o processo de produção, apenas trocas de padrões de moldagem são consideradas nas abordagens propostas, as quais envolvem três tipos de *setup* na modelagem do problema (*Setups* I, II e III).
- iv. Restrições de incompatibilidade entre produtos são impostas em ambas as formulações como parte das decisões de configuração de processo.
- v. Assume-se que cada produto é produzido por um único tipo de molde. No entanto, cada tipo de molde pode ser usado para produzir um ou mais produtos de forma não simultânea.
- vi. Na prática, os tempos de *setup* são significativamente longos (por exemplo, entre 10 e 48 horas) e envolvem altos custos de mão de obra especializada, de modo que grandes volumes de produto são produzidos para aproveitar o estado de preparação, o que pode resultar em grandes volumes de estoque de alguns produtos e atraso no atendimento da demanda de outros produtos. Visando representar o *trade-off* entre os custos de planejamento, as abordagens propostas permitem atrasos no atendimento da demanda, os quais são penalizados na função objetivo.
- vii. O critério de otimização é a minimização dos custos totais associados às operações de *setup*, custos totais de estocagem e custos totais de atrasos.

4.1 Modelo de seleção de processos, planejamento e programação da produção (MSPPP)

Como mencionado anteriormente, os dois modelos aqui propostos diferenciam-se principalmente pela forma em que as decisões de geração de padrões de moldagem são abordadas. Esta formulação representa a geração dos padrões por meio da seleção de estruturas predefinidas, portanto, este modelo é denominado de seleção de processos e planejamento da produção (MSPPP). Este modelo é inspirado em sistemas de produção na indústria de polpa moldada mais simples, nos quais a diversidade de produtos e ambiente de produção são menores, sendo possível definir antecipadamente o conjunto completo de estruturas para a linha de produção.

A abordagem de modelagem apresentada nesta seção foi reportada recentemente no artigo [Martínez, Toso e Morabito \(2016\)](#).

A seguir, a Seção 4.1.1 define o conceito de estruturas predefinidas e a forma em que os padrões de moldagem são determinados nesta formulação. A seção 4.1.2 apresenta a formulação matemática proposta.

4.1.1 Geração de padrões de moldagem no MSPPP

Os padrões de moldagem nesta formulação são determinados a partir de duas decisões: a seleção da estrutura e a designação dos tipos de moldes às posições de cada estrutura. As estruturas predefinidas, requeridas como *input* para este modelo, consistem em combinações de moldes que podem ser acoplados na máquina de moldagem, de modo que as restrições operacionais e de sincronia da linha de produção são sempre satisfeitas. Uma estrutura predefinida especifica quantos tipos de moldes diferentes são acoplados na máquina de moldagem e quantos moldes de cada um desses tipos podem ser acoplados. A Tabela 4.1 apresenta quatro exemplos de estruturas predefinidas para uma linha de produção.

Posições	Estrutura 1	Estrutura 2	Estrutura 3	Estrutura 4
1	12 moldes	8 moldes	12 moldes	8 moldes
2	8 moldes	8 moldes	12 moldes	8 moldes
3	4 moldes	8 moldes	-	4 moldes
4	-	-	-	4 moldes

Tabela 4.1: Exemplos de estruturas predefinidas para uma linha de produção

Um conjunto de *posições* é associado a cada estrutura predefinida, como mostra a Tabela 4.1. Cada uma destas posições representa um tipo de molde diferente acoplado na máquina, na quantidade especificada para tal posição, respectivamente. Estas estruturas predefinidas garantem que, qualquer que sejam os tipos de moldes designados a cada posição, o padrão de moldagem gerado é factível e satisfaz as restrições tecnológicas e de simetria do processo de produção. Por exemplo, se a máquina é preparada de acordo à estrutura 1 da Tabela 4.1, três tipos de moldes serão acoplados simultaneamente na máquina, *i.e.*, um tipo é designado a cada posição, de modo que a máquina possua 12 moldes do primeiro tipo, 8 moldes do segundo tipo e 4 moldes do terceiro tipo. Note que o tipo de molde a ser acoplado em cada posição não é especificado nas estruturas predefinidas, de modo que correspondem a decisões a serem determinadas no modelo.

A Figura 4.1 ilustra uma estrutura particular para uma linha de produção (Estrutura 4 na Tabela 4.1). Note que esta estrutura permite a geração de padrões de moldagem com quatro tipos de moldes diferentes, especificando que a combinação de moldes acoplada na máquina inclui 8 moldes do primeiro tipo, 8 moldes do segundo tipo, 4 moldes do terceiro tipo e 4 moldes do quarto tipo. Note que o uso desta estrutura garante que a capacidade, em termos de espaço

da máquina de moldagem, é totalmente utilizada e que os produtos obtidos são transportados apropriadamente nos transportadores da linha, como imposto pelas restrições operacionais e de sincronia. Observe que os produtos obtidos pelo tipo de molde designado à primeira posição são sempre transportados em duas faixas dos transportadores (*i.e.*, a primeira e segunda faixa do transportador $k = 2$); os produtos obtidos pelo tipo de molde designado à posição 2 da estrutura também são transportados em duas faixas diferentes (*i.e.*, a terceira faixa do transportador $k = 2$ e a primeira faixa no transportador $k = 1$); e os produtos obtidos pelos moldes designados às posições 3 e 4 da estrutura são transportados na segunda e terceira faixa do transportador $k = 1$, respectivamente.

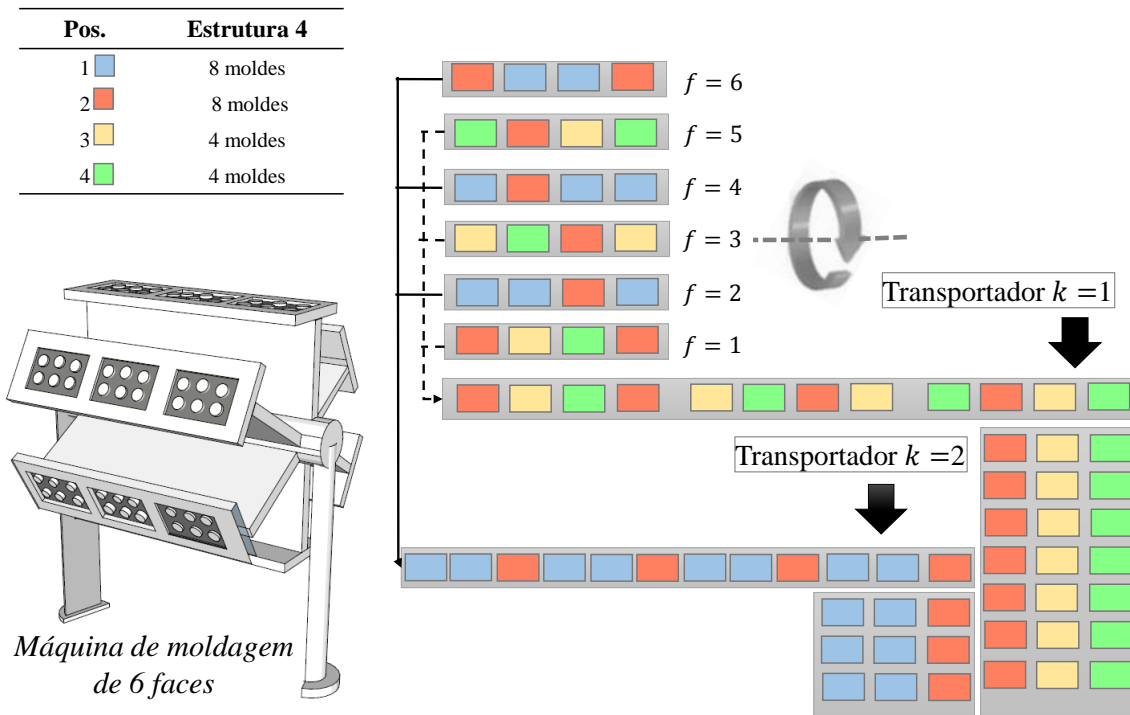


Figura 4.1: Representação de uma estrutura predefinida em uma linha de produção para produtos em polpa moldada

Como mencionado, para definir um padrão de moldagem em particular é preciso determinar a estrutura adotada e o tipo de molde designado a cada posição. Para cada estrutura predefinida, um parâmetro de compatibilidade entre tipos de moldes e posições da estrutura deve ser também determinado *a priori*. Um tipo de molde é compatível com determinada posição de uma estrutura se e somente se o número de moldes disponíveis é menor ou igual ao especificado para tal posição, e o seu tamanho está de acordo com o tamanho do tipo de molde especificado na posição. Desta forma, um padrão de moldagem é determinado na abordagem MSPPP a partir da integração de duas decisões: (i) determinar qual estrutura predefinida, entre as definidas como *input* do modelo, deve ser usada na máquina de moldagem, e (ii) qual tipo de molde é designado a cada posição da estrutura adotada.

Observe que poucas estruturas permitem definir vários padrões de moldagem diferentes. Considere, por exemplo, que existem 5 tipos de moldes diferentes (A, B, C, D e E), todos

eles compatíveis com todas as posições da Estrutura 1 na Tabela 4.1. Note que, sob tal situação, apenas a Estrutura 1 permitiria gerar até $P_3^5 = \frac{5!}{(5-3)!} = 60$ padrões de moldagem diferentes. Assim, uma abordagem de modelagem com base em estruturas predefinidas reduz potencialmente o tamanho do problema em comparação com uma formulação matemática de enumeração completa (e.g., como em [Martínez e Toso \(2015\)](#)), uma vez que o número de possíveis estruturas seja sempre menor ou, no pior dos casos, igual ao número de possíveis padrões de moldagem do problema original.

A abordagem MSPPP permite representar as decisões de planejamento sem a necessidade de determinar todos os possíveis padrões de moldagem, porém requer a determinação das estruturas definidas *a priori*. Embora o número de possíveis estruturas seja significativamente menor em comparação com o número total de padrões, a sua determinação envolve o desafio de considerar as restrições operacionais e tecnológicas do sistema de produção. Se todas as possíveis estruturas predefinidas de uma linha de produção forem determinadas com antecedência e consideradas como parâmetros de entrada para o MSPPP, então todos os possíveis padrões de moldagem estarão implicitamente considerados e o problema integrado será representado sem perda de generalidade. Caso apenas um subconjunto do número total de possíveis padrões seja considerado como parâmetro de entrada, as soluções ótimas desta abordagem não garantem o ótimo global do problema integrado.

4.1.2 Formulação matemática

Como mencionado no início deste capítulo, esta formulação é baseada na formulação clássica do GLSP, em que o horizonte de planejamento compreende T períodos (i.e., semanas), cada um dos quais é dividido em um conjunto S_t de sub-períodos de dimensão variável. Os conjuntos, parâmetros e variáveis desta formulação são definidos como segue.

Conjuntos e índices:

- T conjunto de períodos de tempo (indexado por t);
- S_t conjunto de sub-períodos pertencentes ao período t (indexado por s);
- S conjunto de todos os sub-períodos, i.e., $S = \bigcup_{t \in T} S_t$;
- N conjunto de tipos de produtos (indexado por i, i');
- O conjunto de pares de produtos (i, i') incompatíveis entre si;
- E conjunto de possíveis estruturas da máquina de moldagem (indexado por e, e');
- P_e conjunto de posições na estrutura e (indexado por p);
- P união dos conjuntos P_e (i.e., $P_1 \cup P_2 \cup \dots \cup P_{|E|}$).

Parâmetros:

- l_{ipe} 1, se moldes para o produto i são compatíveis com a posição p da estrutura e ;
0, caso contrário;
- n_{pe} número de moldes na posição p que devem ser acoplados na máquina,
caso a estrutura e seja utilizada;

- R velocidade da máquina de moldagem (rotações por hora);
 st^I tempo de *setup* para parada/reinício da linha de produção (*i.e.*, tempo para *Setup* I);
 st_i^{II} tempo de *setup* para acoplar/desacoplar um molde para o produto i (*i.e.*, tempo para *Setup* II);
 $st_{ee'}^{III}$ tempo de *setup* para a troca da estrutura e para e' (*i.e.*, tempo para *Setup* III);
 Q_t capacidade total disponível no período t (horas);
 d_{it} demanda do produto i no período t ;
 sc^I custo de *Setup* I, *i.e.*, custo de parada/reinício da linha de produção;
 sc_i^{II} custo de *Setup* II, *i.e.*, custo de acoplar/desacoplar um molde para o produto i ;
 $sc_{ee'}^{III}$ custo de *Setup* III, *i.e.*, custo de troca entre estruturas predefinidas
 h_i^+ custo unitário de estocagem do produto i ;
 h_i^- custo unitário de atraso do produto i ;
 I_{i0}^+ unidades em estoque do produto i no início do horizonte;
 I_{i0}^- unidades atrasadas do produto i no início do horizonte.

Variáveis relacionadas às decisões de configuração de processo

- z_{es} 1, se a máquina adota a estrutura e no sub-período s ; 0, caso contrário;
 y_{ips} 1, se moldes para o produto i são designados à posição p no sub-período s ;
 0, caso contrário.

Variáveis relacionadas às decisões de planejamento e dimensionamento

- w_s tempo de produção da configuração de processo definida no sub-período s ;
 x_{is} unidades do produto i produzidas no sub-período s ;
 I_{it}^+ unidades em estoque do produto i ao final do período t ;
 I_{it}^- unidades atrasadas do produto i ao final do período t .

Variáveis relacionadas às decisões de sequenciamento

- v_s 1, se a linha de produção é parada/reiniciada no sub-período s (*Setup* I); 0, caso contrário;
 u_{is} número de moldes para o produto i acoplados ou desacoplados no sub-período s (*Setup* II);
 $b_{ee's}$ 1, se há troca da estrutura e para a configuração e' no sub-período s (*Setup* III);
 0, caso contrário.

Função objetivo

A função objetivo (4.1) minimiza os custos totais formados pelos custos de *setup*, estocagem e atraso.

$$\text{Min} \sum_{s \in S} sc^I v_s + \sum_{i \in N} \sum_{s \in S} sc_i^{II} u_{is} + \sum_{e, e' \in E} \sum_{s \in S} sc_{ee'}^{III} b_{ee's} + \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} (h_{it}^+ I_{it}^+ + h_{it}^- I_{it}^-) \quad (4.1)$$

Restrições relacionadas às decisões de configuração de processo

Os conjuntos de restrições (4.2) - (4.5) determinam as configurações de processo utilizadas ao longo do horizonte de planejamento, ou seja, determinam os padrões de moldagem a serem utilizados a partir das estruturas predefinidas e determinam os produtos a serem produzidos em cada instante do horizonte.

As restrições (4.2) garantem que a linha de produção seja configurada para apenas uma estrutura em cada sub-período do horizonte. As restrições (4.3) - (4.5) designam tipos de moldes às posições da estrutura, de modo que um tipo de molde diferente seja designado a cada posição p da estrutura

predefinida utilizada em cada sub-período. Estas restrições são impostas uma vez que as estruturas já incorporam situações onde todos os moldes acoplados na máquina são iguais. Assim, as equações (4.3) garantem que a cada uma das posições da estrutura adotada no sub-período s seja designada apenas um tipo de molde. As restrições (4.4) asseguram que para cada posição seja designado, no máximo, um único tipo de molde. Analogamente, as restrições (4.5) garantem que cada tipo de molde seja designado, no máximo, a uma única posição na estrutura selecionada em cada sub-período. Note que estas decisões não podem ser representadas por meio de restrições de igualdade, *i.e.*, como $\sum_{i \in N} y_{ips} = 1, \forall s \in S; p \in P$, dado que o número total de posições depende da estrutura selecionada, a qual é uma decisão a ser determinada no modelo.

$$\sum_{e \in E} z_{es} = 1 \quad \forall s \in S \quad (4.2)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{p \in P} y_{ips} = \sum_{e \in E} |P_e| z_{es} \quad \forall s \in S \quad (4.3)$$

$$\sum_{i \in N} y_{ips} \leq 1 \quad \forall p \in P; s \in S \quad (4.4)$$

$$\sum_{p \in P} y_{ips} \leq 1 \quad \forall i \in N; s \in S \quad (4.5)$$

$$y_{ips} \leq \sum_{e \in E} l_{ipe} z_{es} \quad \forall i \in N; p \in P; s \in S \quad (4.6)$$

$$\sum_{p \in P} y_{ips} + \sum_{p \in P} y_{i'ps} \leq 1 \quad \forall (i, i') \in O; s \in S \quad (4.7)$$

As restrições (4.6) e (4.7) representam as relações de compatibilidade entre produtos e estruturas predefinidas, e compatibilidades de produtos entre si, respectivamente. As restrições (4.6) garantem que moldes para o produto i sejam designados apenas às posições compatíveis da estrutura adotada em cada sub-período. Já as restrições (4.7) garantem que produtos incompatíveis entre si não sejam produzidos simultaneamente, evitando que os moldes correspondentes sejam designados numa mesma estrutura. Uma vez que as considerações do problema relacionadas à sincronia da linha e disponibilidade limitada de moldes é tratada *a priori* na definição das estruturas e parâmetros de compatibilidade, as restrições (4.6) e (4.7) garantem que as configurações de processo geradas sejam factíveis de acordo com as restrições operacionais do problema.

Restrições relacionadas às decisões de dimensionamento

As equações (4.8) determinam a quantidade de cada produto produzida em cada sub-período.

$$x_{is} = w_s R \sum_{e \in E} z_{es} \sum_{p \in P_e} n_{pe} y_{ips} \quad \forall i \in N; s \in S \quad (4.8)$$

Note que a quantidade produzida de cada produto equivale ao tempo de produção no sub-período s (w_s), multiplicado pela velocidade da máquina (R) e pelo número de moldes para cada produto i acoplados nesse sub-período (*i.e.*, $\sum_{e \in E} z_{es} \sum_{p \in P_e} n_{pe} y_{ips}$). Estas equações não lineares podem ser substituídas, sem perda de generalidade, pelos seguintes conjuntos de restrições lineares. Note que as restrições (4.10)-(4.11) são válidas, uma vez que cada tipo de molde é designado a, no máximo, uma

posição da estrutura definida para cada sub-período, de acordo com as restrições (4.5).

$$x_{is} \leq B_i^{III} \sum_{p \in P} y_{ips} \quad \forall i \in N; s \in S \quad (4.9)$$

$$x_{is} \geq w_s R n_{pe} - B_i^{III} (2 - y_{ips} - z_{es}) \quad \forall i \in N; e \in E; p \in P_e; s \in S \quad (4.10)$$

$$x_{is} \leq w_s R n_{pe} + B_i^{III} (2 - y_{ips} - z_{es}) \quad \forall i \in N; e \in E; p \in P_e; s \in S \quad (4.11)$$

As restrições (4.9) asseguram que o produto i seja produzido (*i.e.*, $x_{is} > 0$) se, e somente se, existem moldes para esse tipo de produto acoplados na máquina no sub-período s . B_i^{III} é um limitante superior associado à máxima quantidade do produto i que poderia ser produzida nesse sub-período, independente da estrutura selecionada. Este limitante pode ser calculado pela expressão (4.12).

$$B_i^{III} = Q R \max_{p \in P, e \in E} \{l_{ipe} n_{pe}\} \quad \forall i \in N; t \in T \quad (4.12)$$

em que $Q = \max_{t \in T} \{Q_t\}$ ou, $Q = Q_t \quad \forall t \in T$ se a capacidade é a mesma em todos os períodos.

As restrições (4.10) e (4.11) contabilizam a quantidade produzida de cada produto i no sub-período s . Observe que se o produto i é produzido no sub-período s , o volume de produção corresponde exatamente ao resultado da equação (4.8).

As restrições (4.13) asseguram que a capacidade total em horas disponível em cada período não seja excedida. O consumo de capacidade em cada período compreende o tempo efetivo de produção, assim como os tempos de *Setup* I, II e III. O conjunto de restrições (4.14) representa o atendimento da demanda em cada período, considerando estocagem e possibilidades de atraso.

$$\sum_{s \in S_t} w_s + \sum_{s \in S_t} st^I v_s + \sum_{i \in N} \sum_{s \in S_t} st_i^{II} u_{is} + \sum_{e, e' \in E} \sum_{s \in S_t} st_{ee'}^{III} b_{ee's} \leq Q_t \quad \forall t \in T \quad (4.13)$$

$$I_{i(t-1)}^+ + \sum_{s \in S_t} x_{is} + I_{it}^- = I_{i(t-1)}^- + d_{it} + I_{it}^+ \quad \forall i \in N; t \in T \quad (4.14)$$

Restrições relacionadas às decisões de sequenciamento

Os conjuntos de restrições a seguir determinam a sequência em que os padrões de moldagem são programados, considerando as operações de *Setup* I, II e III executadas ao longo do horizonte de planejamento. As restrições (4.15) definem se o *Setup* I é realizado no sub-período s . Ou seja, se a linha de produção precisa ser parada/reiniciada nesse sub-período para trocas de moldes. Note que o *Setup* I é necessário toda vez que, ao menos, um molde é trocado para configurar um novo padrão. O parâmetro B^I é um limitante superior associado ao número máximo de moldes para o produto i que poderia ser acoplado ou desacoplado no sub-período s , o qual pode ser determinado como $B_i^I = \max_{e \in E; p \in P_e} \{l_{ipe} n_{pe}\}$.

$$u_{is} \leq B_i^I v_s \quad \forall i \in N; s \in S \quad (4.15)$$

$$u_{is} = \left| \sum_{p \in P_{e'}} y_{ips} n_{pe'} - \sum_{p \in P_e} y_{ip(s-1)} n_{pe} \right| b_{ee's} \quad \forall e, e' \in E; i \in N; s \in S : s \geq 2 \quad (4.16)$$

As restrições não lineares (4.16) contabilizam quantos moldes do tipo i são acoplados ou desacoplados no sub-período s . Estas restrições podem ser substituídas pelas restrições lineares (4.17)-(4.18),

como segue.

$$u_{is} \geq \sum_{p \in P_{e'}} y_{ips} n_{pe'} - \sum_{p \in P_e} y_{ip(s-1)} n_{pe} - B_i^{II} (1 - b_{ee's}) \quad \forall e, e' \in E; i \in N; s \in S : s \geq 2 \quad (4.17)$$

$$u_{is} \geq \sum_{p \in P_e} y_{ip(s-1)} n_{pe} - \sum_{p \in P_{e'}} y_{ips} n_{pe'} - B_i^{II} (1 - b_{ee's}) \quad \forall s \in S : s \geq 2; e, e' \in E; i \in N \quad (4.18)$$

Note que a variável u_{is} depende da estrutura adotada em dois sub-períodos consecutivos, e dos tipos de moldes designados às posições de tais estruturas. Observe também que se $\sum_{p \in P_{e'}} y_{ips} n_{pe'} - \sum_{p \in P_e} y_{ip(s-1)} n_{pe} > 0$, significa que moldes para o produto i são acoplados no sub-período s , o que é representado pelas desigualdade (4.17). Similarmente, se $\sum_{p \in P_{e'}} y_{ips} n_{pe'} - \sum_{p \in P_e} y_{ip(s-1)} n_{pe} < 0$, então moldes para o produto i devem ser desacoplados da máquina no sub-período s , o que é representado pelas desigualdades (4.18).

As restrições (4.19) e (4.20) são equações de fluxo que definem se existe troca da estrutura e para a configuração e' no sub-período s . Estas restrições substituem as desigualdades na formulação clássica do GLSP, $b_{ee's} \geq z_{e(s-1)} + z_{e's} - 1$, que modelam *setups* dependentes da sequência. Finalmente, as expressões (4.21) especificam o domínio das variáveis do modelo.

$$\sum_{e' \in E} b_{ee's} = z_{e(s-1)} \quad \forall e \in E; s \in S : s \geq 2 \quad (4.19)$$

$$\sum_{e \in E} b_{ee's} = z_{e's} \quad \forall e' \in E; s \in S : s \geq 2 \quad (4.20)$$

$$I_{it}^+, I_{it}^-, x_{is}, w_s, u_{is} \in \mathbb{R}^+; \quad z_{is}, y_{ips}, v_s, b_{ee's} \in \{0, 1\}; \quad (4.21)$$

$$\forall i \in N; e, e' \in E; p \in P; s \in S; t \in T$$

4.1.3 Desigualdades válidas

Com o intuito de aprimorar a formulação anterior, dois conjuntos de restrições válidas são apresentados. O primeiro conjunto visa fortalecer a relação entre as variáveis de decisão que definem padrões de moldagem usados em cada configuração de processo, *i.e.*, variáveis de seleção de estruturas z_{es} e variáveis de designação de tipos de moldes a cada posição y_{ips} .

Seja M_i o número de moldes disponíveis para produtos do tipo i . A desigualdade a seguir é sempre válida para a abordagem MSPPP.

$$\sum_{e \in E} n_{pe} z_{es} \leq \sum_{i \in N} M_i y_{ips} \quad p \in P; s \in S \quad (4.22)$$

Note que, se $z_{es} = 1$, a relação $n_{pe} \leq \sum_{i \in N} M_i y_{ips}$ é sempre válida para $p \in P$, ou seja, o número de moldes para o produto i acoplado em determinado sub-período s não pode exceder o número de moldes disponíveis para tal produto. Esta restrição já é garantida na abordagem MSPPP pelas restrições (4.6), dado que o parâmetro de compatibilidade l_{ipe} leva em conta as limitações do número de moldes. No entanto, as desigualdades (4.22) também podem ser consideradas na modelagem, relacionando a designação de moldes a posições y_{ips} , de acordo com a estrutura adotada z_{es} e o número de moldes

disponíveis M_i .

Observe também que para uma solução relaxada, se $\sum_{e \in E} z_{es} > 0$, as restrições (4.22) forçam $\sum_{i \in N} y_{ips} > 0$, $\forall p \in P$. Desta forma, para soluções relaxadas, as desigualdades válidas (4.22) atribuem valores diferentes de 0 às variáveis y_{ips} em função de z_{es} , o que poderia melhorar eventualmente os limitantes inferiores da formulação.

O segundo conjunto de desigualdades está relacionado com as operações de *setup*. Na formulação original, as restrições (4.17)-(4.18) são relacionadas ao tipo de *Setup* II, entretanto as restrições (4.19) e (4.20) são relacionadas ao *Setup* III. Note que caso alguma das operações de *Setups* II ou III, ou as duas operações ocorram no sub-período s , o *Setup* I é obrigatório pelas restrições (4.15)-(4.18). Por outro lado, se o *Setup* I ocorre, então o *Setup* II também é realizado, porém o *Setup* III pode ou não ocorrer. Estas relações são definidas nas restrições (4.15) - (4.20), embora as variáveis v_s e $b_{ee's}$ não estejam diretamente relacionadas. A fim de fortalecer as relações das variáveis que representam as operações de *Setups* I, II e III, as restrições (4.23) são propostas.

$$1 - v_s \leq \sum_{e \in E} b_{ees} \quad \forall s \in S \quad (4.23)$$

Observe que se o *Setup* I acontece (*i.e.*, $v_s = 1$), o *Setup* III pode (*i.e.*, $\sum_{e, e' \in E: e \neq e'} b_{ee's} = 1$) ou não acontecer. Como mencionado na descrição das decisões do problema, o *Setup* III apenas acontece quando um ajuste na largura das faixas de separação dos transportadores é requerida, ou seja, quando os produtos a serem produzidos na configuração de processo definida em s são de largura diferente aos produtos produzidos na configuração imediatamente anterior (sub-período $s - 1$). Não obstante, se o *Setup* I não acontece no sub-período s , o *Setup* III não acontece (*i.e.*, $\sum_{e \in E} b_{ees} = 1$).

Desta forma, o Modelo MSPPP é apresentado para 4 variantes: **A** corresponde à formulação original (4.1) - (4.21); **B** é a formulação original MSPPP com as desigualdades válidas (4.22); **C** consiste na formulação MSPPP com as desigualdades válidas (4.23); e **D** considera a formulação original do MSPPP com as desigualdades (4.22) e (4.23). No próximo capítulo são apresentados os resultados computacionais dos experimentos para cada uma destas variantes da abordagem MSPPP.

4.2 Modelo integrado de configuração de processos, planejamento e programação da produção (MICPPP)

A abordagem MICPPP apresentada nesta seção diferencia-se da abordagem MSPPP da seção anterior principalmente na forma em que são tratadas as decisões de geração de padrões. Aqui, elas são determinadas sem a necessidade da definição antecipada de estruturas factíveis para a linha de produção. Embora esta formulação seja mais complexa que a anterior, acreditamos que o modelo resultante é mais flexível para ser adaptado a sistemas de produção de diferentes características, com diferentes equipamentos de moldagem e número de transportadores. Esta formulação é potencialmente mais adequada para problemas que representam ambientes de produção de polpa moldada maiores e com maior diversidade de produtos, nos quais o número de possíveis estruturas da linha de produção é muito grande ou difícil de determinar *a priori*. A abordagem de modelagem apresentada nesta seção foi reportada recentemente

no artigo [Martínez, Morabito e Toso \(2017\)](#). A seguir é apresentada uma descrição da forma em que as decisões de geração de padrões são abordadas e a formulação matemática do problema.

4.2.1 Geração de padrões de moldagem no MICPPP

Nesta formulação, as decisões de geração de padrões de moldagem são representadas usando uma notação específica para os equipamentos que conformam uma linha de produção. Considera-se que o ambiente de produção é composto por uma máquina de moldagem rotatória com várias faces e um conjunto de K transportadores, os quais funcionam simultaneamente e sincronizadamente. A máquina de moldagem possui um conjunto F de faces de largura L , nas quais são acoplados uma combinação específica de moldes. O conjunto total de moldes acoplados em todas as faces da máquina é o denominado padrão de moldagem.

O conjunto K de transportadores movimenta os produtos desde a máquina de moldagem até a etapa de empacotamento, passando através do forno industrial para o processo de secagem, de forma contínua e sem estoque intermediário. Os transportadores no conjunto K podem ser configurados de acordo com um conjunto de possíveis *arranjos* E . Um arranjo define quantas faixas de separação são configuradas no transportador (*i.e.*, $|P_e|$) e a largura de cada uma delas (*i.e.*, g_{pe} , $\forall e \in E; p \in P_e$). A Figura 4.2 ilustra dois exemplos de possíveis arranjos para um transportador, e os parâmetros relacionados a este conjunto. Do lado esquerdo tem-se um transportador configurado segundo o Arranjo 1, o qual consiste em três faixas de separação de largura g_{11} , g_{21} e g_{31} , respectivamente. O lado direito da figura mostra um transportador configurado para o Arranjo 2, o qual consiste em duas faixas de separação ($p = 1$ e $p = 2$) de larguras g_{12} e g_{22} , respectivamente.

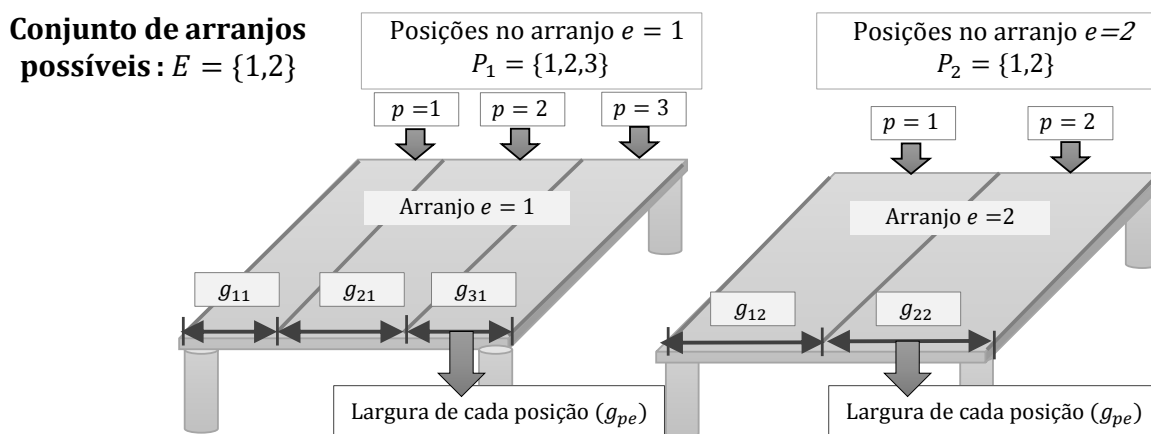
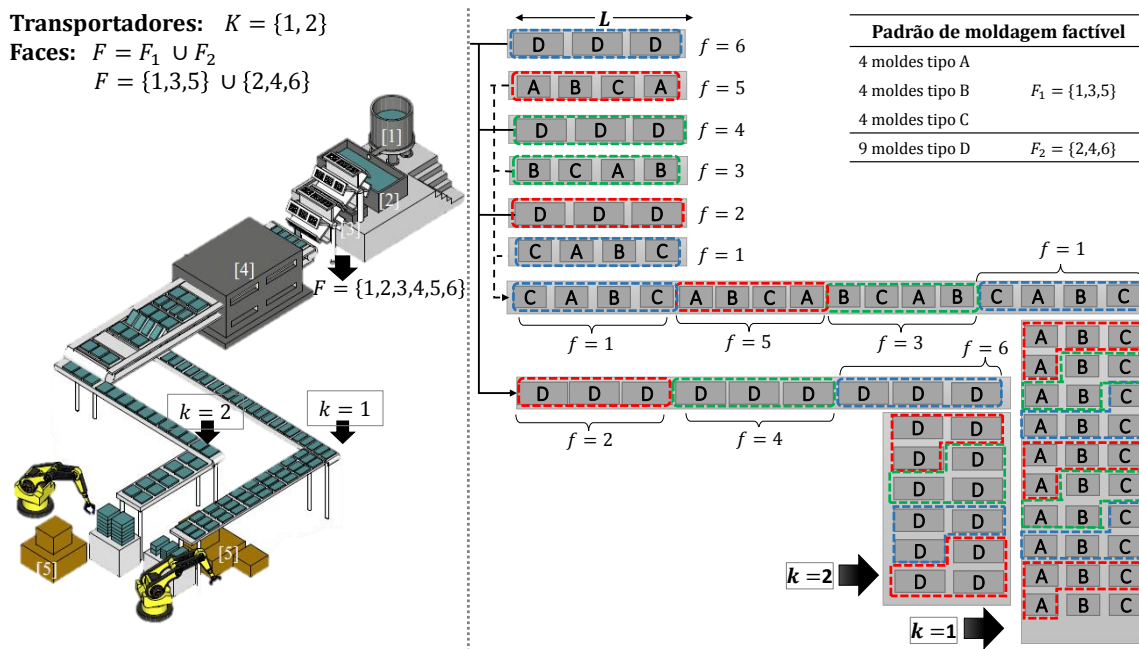


Figura 4.2: Exemplos da definição de arranjos para os transportadores

Como mencionado na descrição do problema, uma linha de produção é projetada de modo que cada face da máquina é dedicada para um transportador específico. Desta forma, para a formulação MICPPP considera-se que o conjunto de faces F da máquina de moldagem é dividido em sub-conjuntos disjuntos F_k , $\forall k \in K$, onde $F = \bigcup_{k \in K} F_k$ e $\bigcap_{k \in K} F_k = \emptyset$, de modo que os produtos obtidos a partir dos moldes acoplados ao sub-conjunto de faces F_k são exclusivamente descarregados e transportados pelo transportador k .

Como descrito na Seção 3.2.1, o total de moldes acoplados nas faces dedicadas a cada transportador k , F_k , deve ser tal que os produtos produzidos a partir destes moldes sejam sempre transportados na mesma ordem durante todo o tempo de utilização do padrão, *i.e.*, apenas um tipo de produto é transportado em cada faixa de separação de k . Para representar apropriadamente estas restrições tecnológicas do problema, as decisões de configuração do processo de moldagem nesta formulação são determinadas levando em conta o estado de preparação da máquina de moldagem, o estado de preparação dos transportadores e a sincronização entre estes equipamentos.

O estado de preparação da máquina de moldagem é definido ao determinar quantos moldes de cada tipo são acoplados em cada face da máquina. Uma vez que as decisões de geração de padrões consistem em determinar quais tipos de moldes e quantos moldes de cada tipo são acoplados na máquina, a ordem em que os moldes são dispostos em cada face não é considerada como uma decisão do problema. No entanto, é preciso considerar a especificação do número de moldes que deve ser acoplado em cada face, de modo a garantir as restrições tecnológicas e de sincronia. Assim, a ordem dos moldes em cada face por ser facilmente definida via pós-processamento da solução, evitando assim a inclusão deste ordenamento no modelo e, conseqüentemente, o aumento da complexidade do problema. Já o estado de preparação de cada transportador é definido ao decidir qual arranjo é configurado no mesmo, e qual tipo de produto é designado a cada faixa do arranjo configurado. A Figura 3.7 na Seção 3.2.1 é replicada nesta seção de modo a facilitar a compreensão das considerações da abordagem MICPPP.



Uma relação lógica entre o estado de preparação de cada transportador e a combinação de moldes acoplados nas faces dedicadas a este é definida para garantir a sincronia dos equipamentos. Observe que no transportador $k = 1$, os produtos A, B e C são transportados sempre na mesma seqüência apenas se, para cada rotação completa da máquina de moldagem, o número de moldes para o produto i acoplado em todas as faces para o transportador $k = 1$ é exatamente um múltiplo inteiro do número de faixas ocupadas por tal produto no transportador correspondente (*i.e.*, $k = 1$). Por outro lado, quando o mesmo tipo de produto é transportado em todas as faixas de um transportador k , *e.g.*, o produto D no transportador $k = 2$, nenhuma relação lógica para o número de moldes acoplados nas faces dedicadas a tal transportador é

imposta, dado que os produtos são transportados na mesma sequência de qualquer forma. Esta relação lógica entre as decisões do número de moldes na máquina e a configuração do transportador é modelada matematicamente por meio das restrições não lineares (4.39)-(4.40) na formulação MICPPP.

Além da sincronização entre o estado de preparação da máquina de moldagem e a configuração dos transportadores, outras particularidades do problema devem ser consideradas para garantir a factibilidade das configurações de processo a serem geradas: (i) o número de moldes disponíveis de cada tipo é limitado, de modo que a combinação de moldes definida em um padrão de moldagem não pode exceder o total disponível de cada tipo. Estas restrições são representadas pelas desigualdades (4.34) no modelo; (ii) em cada face deve ser acoplado o máximo número de moldes possíveis, representadas pelas restrições (4.32)-(4.33) no modelo; (iii) alguns produtos são incompatíveis entre si devido às diferenças de cor ou peso, portanto, não podem coexistir na mesma configuração de processo, representadas pelas restrições (4.31).

As decisões de dimensionamento determinam o tempo de produção de cada configuração de processo gerada. Já as decisões de sequenciamento são definidas levando em conta as operações de *Setups* I, II e III. Assim como na abordagem MSPPP, nesta formulação o *Setup* I representa a parada/reinício da linha de produção toda vez que uma troca de padrão de moldagem é necessária, enquanto o *Setup* II depende do número de moldes a serem acoplados ou desacoplados para gerar um novo padrão. O *Setup* III, que representa o ajuste das faixas nos transportadores para moldes de diferentes larguras, é representado nesta formulação através das trocas de arranjos designados a cada transportador, as quais envolvem tempos dependentes da sequência, ou seja, dependem de qual arranjo foi configurado previamente em cada transportador.

A seguir é apresentada a notação e representação matemática do problema para a abordagem MICPPP.

4.2.2 Formulação matemática

Conjuntos e índices:

T conjunto de períodos de tempo (indexado por t);

S_t conjunto de sub-períodos pertencentes ao período t (indexado por s);

S conjunto de sub-períodos, *i.e.*, $S = \bigcup_{t \in T} S_t$;

N conjunto de tipos de produto (indexado por i, i');

J conjunto de tipos de moldes (indexado por j);

O conjunto de pares de produtos (i, i') incompatíveis entre si;

A_j conjunto de produtos produzidos a partir do molde tipo j ;

$$A_j : N = \bigcup_{j \in J} A_j \text{ e } \bigcap_{j \in J} A_j = \emptyset;$$

F conjunto de faces da máquina de moldagem (indexado por f).

K conjunto de transportadores (indexado por k)

F_k conjunto de faces da máquina dedicadas para o transportador k ; $F_k : F = \bigcup_{k \in K} F_k$

$$\text{e } \bigcap_{k \in K} F_k = \emptyset$$

- E conjunto de possíveis arranjos para os transportadores (indexado por e, e')
 P_e conjunto de faixas no transportador quando configurado para o arranjo e (indexado por p)
 P conjunto de faixas nos transportadores, *i.e.*, $P = \bigcup_{e \in E} P_e$

Parâmetros:

- d_{it} demanda do produto i no período t ;
 Q_t capacidade total no período t (horas);
 R velocidade da máquina de moldagem (rotações por hora);
 L largura das faces da máquina de moldagem;
 l_j^m largura do molde tipo j ;
 l_i^p largura do produto tipo i : $l_i^p = l_j^m \quad \forall j \in J; i \in A_j$;
 M_j número total de moldes disponíveis do tipo J ;
 g_{pe} largura da faixa p de acordo ao arranjo e ;
 H_k parâmetro de proporção entre o tamanho das faces da máquina de moldagem e o tamanho dos transportadores: $\left\lfloor \frac{L}{\text{largura do transportador } k} \right\rfloor$;
 st^I tempo de *setup* para parada/reinício da linha de produção (*i.e.*, tempo para *Setup* I);
 st_j^{II} tempo de *setup* para acoplar/desacoplar um molde do tipo j (*i.e.*, tempo para *Setup* II);
 $st_{ee'}^{III}$ tempo de *setup* envolvido na troca do arranjo e para e' (*i.e.*, tempo para *Setup* III);
 sc^I custo de *Setup* I, *i.e.*, custo de parada/reinício da linha de produção;
 sc_j^{II} custo de *Setup* II, *i.e.*, custo de acoplar/desacoplar um molde do tipo j ;
 $sc_{ee'}^{III}$ custo de *Setup* III, *i.e.*, custo de troca do arranjo e para e' ;
 h_i^+ custo unitário de estocagem do produto i ;
 h_i^- custo unitário de atraso do produto i .

Variáveis relacionadas às decisões de configuração de processos:

- z_{kes} 1, se o transportador k é configurado para o arranjo e no sub-período s ;
0, caso contrário;
 y_{ipks} 1, se o produto i é designado à faixa p do transportador k no sub-período s ;
0, caso contrário;
 x_{jfs} número de moldes do tipo j acoplados na face f no sub-período s .

Variáveis relacionada às decisões de dimensionamento:

- w_s tempo de produção no sub-período s ;
 I_{it}^+ unidades em estoque do produto i ao final do período t ;
 I_{it}^- unidades atrasadas do produto i ao final do período t .

Variáveis relacionadas às decisões de sequenciamento:

- v_s 1, se a linha de produção é parada/reiniciada no sub-período s (*Setup* I);
0, caso contrário;

- u_{jks} número de moldes do tipo j acoplados/desacoplados nas faces da máquina de moldagem para o transportador k , no sub-período s (*Setup II*);
- $b_{ee'ks}$ 1, se há troca do arranjo e para o arranjo e' no transportador k no sub-período s (*Setup III*); 0, caso contrário.

Variáveis auxiliares:

- Y_{is} 1, se o produto i é produzido no sub-período s ; 0, caso contrário;
- α_{iks} 1, se o produto i é designado a todas as faixas do transportador k no sub-período s ; 0, caso contrário;
- β_{ks} variável inteira auxiliar para garantir a sincronia entre a configuração do transportador k e a combinação de moldes acoplada nas faces dedicadas ao mesmo F_k .

Função objetivo

A função (4.24) minimiza os custos totais que compreendem aos custos de *setups* tipo I, II, e III, custos de estocagem e atraso.

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{s \in S} sc^I v_s + \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} sc_j^II u_{jks} + \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{e, e' \in E} sc_{ee'}^{III} b_{ee'ks} \\ & + \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} (h_i^+ I_{it}^+ + h_i^- I_{it}^-) \end{aligned} \quad (4.24)$$

Restrições relacionadas às decisões de configuração de processo

As decisões de geração de padrões são determinadas ao definir o estado de preparação dos transportadores, da máquina de moldagem, e a sincronia entre eles. Três conjuntos de restrições são definidas para tal fim, respectivamente.

As restrições (4.25)-(4.31) definem o estado de preparação dos transportadores. Uma vez assumido que apenas uma configuração de processo pode ser definida e utilizada em cada sub-período s , as restrições (4.25) garantem que cada transportador k é configurado para apenas um arranjo em cada sub-período s .

$$\sum_{e \in E} z_{kes} = 1 \quad \forall s \in S; k \in K \quad (4.25)$$

As restrições (4.26) asseguram que em cada faixa de cada transportador seja designado, no máximo, um único tipo de produto, em cada sub-período s .

$$\sum_{i \in N} y_{ipks} \leq 1 \quad s \in S; k \in K; p \in P \quad (4.26)$$

As equações (4.27), em conjunto com as restrições (4.26), garantem que em cada faixa de cada transportador k seja designado exatamente um tipo de produto. Note que o número de faixas em cada transportador depende do arranjo configurado em cada sub-período, o qual é uma decisão a ser determinada no modelo, *i.e.*, $|P_e|z_{kes}$.

$$\sum_{i \in N} \sum_{p \in P} y_{ipks} = \sum_{e \in E} |P_e|z_{kes} \quad \forall s \in S; k \in K \quad (4.27)$$

As restrições (4.28) garantem que um produto i é designado à faixa p do transportador k no sub-

período s se e somente se a faixa p e o molde para tal produto são da mesma largura. Estas restrições (4.28) são válidas uma vez que assume-se que cada produto é obtido por meio de um único tipo de molde e, além disso, as restrições (4.26) impõem que $\sum_{i \in N} y_{ipks}$ é sempre, no máximo, igual a 1.

$$\sum_{i \in N} l_i^p y_{ipks} = \sum_{e \in E} g_{pe} z_{kes} \quad \forall s \in S; k \in K; p \in P \quad (4.28)$$

As restrições (4.29)-(4.30) definem se o produto i é produzido no sub-período s . Note que um tipo de produto é produzido no sub-período s se, e somente se, este produto é designado a, pelo menos, uma das faixas configuradas em algum dos transportadores no mesmo sub-período. As restrições (4.30) podem ser representadas por desigualdades mais fortes do tipo $Y_{is} \geq y_{ipks} \forall s \in S; i \in N; k \in K; p \in P$. No entanto, as restrições (4.30) implicam em um número menor de restrições no problema e, de acordo com experimentos computacionais preliminares, não existem diferenças significativas entre estas duas alternativas no desempenho dos métodos de solução aqui testados.

$$Y_{is} \leq \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} y_{ipks} \quad \forall s \in S; i \in N \quad (4.29)$$

$$|P||K|Y_{is} \geq \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} y_{ipks} \quad \forall s \in S; i \in N \quad (4.30)$$

As restrições (4.31), garantem que produtos incompatíveis não sejam produzidos simultaneamente em nenhum dos sub-períodos de produção.

$$Y_{is} + Y_{i's} \leq 1 \quad \forall s \in S; (i, i') \in O \quad (4.31)$$

O conjunto de restrições (4.32) - (4.34) define o estado de preparação da máquina de moldagem. As restrições (4.32) garantem que a largura total dos moldes acoplados em cada face da máquina não excede a largura da mesma.

$$\sum_{j \in J} l_j^m x_{jfs} \leq L \quad \forall s \in S; f \in F \quad (4.32)$$

As restrições (4.33) garantem que em cada face da máquina sejam acoplados o máximo de moldes possíveis, ou seja, o espaço remanescente em cada face $f \in F_k$ deve ser estritamente menor que a largura mínima das faixas configuradas no transportador k , para cada sub-período s . Estas são restrições tecnológicas impostas na prática a fim de evitar falhas e desgaste acelerado do equipamento de moldagem, e basicamente garantem que o espaço vazio nas faces dedicadas a cada transportador k seja estritamente menor que a largura do molde de menor tamanho usado em tal sub-período.

$$L - \sum_{j \in J} l_j^m x_{jfs} < \sum_{e \in E} \min_{p \in P} \{g_{pe}\} z_{kes} \quad \forall s \in S; k \in K; f \in F_k \quad (4.33)$$

Como descrito nas decisões de configuração de processo, os padrões de moldagem estão sujeitos à disponibilidade limitada de moldes de cada tipo. Neste sentido, restrições (4.34) garantem que em cada sub-período s , o padrão de moldagem gerado não excede o número total de moldes disponíveis de cada

tipo.

$$\sum_{f \in F} x_{jfs} \leq M_j \quad \forall s \in S; j \in J \quad (4.34)$$

Para representar matematicamente as restrições de sincronia do processo, o conjunto de restrições (4.35) garante que os tipos de moldes acoplados na máquina correspondam aos produtos a serem produzidos. Consequentemente, estas restrições garantem que, se os moldes do tipo j são acoplados em qualquer uma das faces para o transportador k ($f \in F_k$) no sub-período s , então algum produto $i : i \in A_j$ deve ser designado, no mínimo, a uma das faixas do transportador k no mesmo sub-período.

$$\sum_{f \in F_k} x_{jfs} \leq M_j \sum_{p \in P} \sum_{i \in A_j} y_{ipks} \quad \forall s \in S; j \in J; k \in K \quad (4.35)$$

$$x_{jfs} \geq H_k \sum_{p \in P} \sum_{i \in A_j} y_{ipks} \quad \forall s \in S; j \in J; k \in K; f \in F_k \quad (4.36)$$

As restrições (4.36) são incluídas para definir o número mínimo de moldes de cada tipo em cada face da máquina, de acordo com a relação entre os tamanhos das faces da máquina e dos transportadores. As restrições (4.36) podem ser excluídas sem perda de generalidade na representação do problema, porém estas melhoram significativamente os limitantes inferiores da formulação, sendo que as diferenças médias entre os limitantes podem atingir até 150%, de acordo com os resultados de experimentos computacionais preliminares. Estas restrições (4.36) garantem que, se um produto i é transportado no transportador k no sub-período s , logo o número de moldes para esse produto acoplado em cada face para o mesmo transportador (*i.e.*, $\forall f \in F_k$) é no mínimo, H_k vezes o número de faixas ocupadas pelo produto i .

Note que H_k é um parâmetro de proporção definido como $\left\lfloor \frac{L}{\text{largura do transportador } k} \right\rfloor$. Este parâmetro é requerido para designar o número correto de moldes a cada face, qualquer que seja a largura das faces da máquina e dos transportadores. Por exemplo, na Figura 3.7, a largura das faces é maior que a largura dos transportadores, porém $H_k < 2$ e o número mínimo de moldes em cada face corresponde a 1. No entanto, para os casos em que $H_k \geq 2$, este parâmetro é necessário para garantir que o correto número de moldes é acoplado em cada face da máquina.

A fim de sincronizar os estados de preparação da máquina de moldagem e dos transportadores, também é necessário determinar se produtos diferentes são transportados simultaneamente por um mesmo transportador ou não. Caso produtos diferentes sejam transportados simultaneamente em um transportador k , a combinação de moldes acoplados nas faces dedicadas a tal transportador deve garantir que os produtos sejam sempre transportados na mesma ordem durante o tempo de produção do padrão. Para representar estas restrições tecnológicas apropriadamente, as desigualdades (4.37) e (4.38) definem $\alpha_{iks} = 1$ se o transportador k transporta apenas o tipo de produto i no sub-período s , ou seja, se este produto é designado a todas as faixas desse transportador nesse sub-período.

$$\sum_{e \in E} |P_e| z_{kes} - \sum_{p \in P} y_{ipks} \geq 1 - \alpha_{iks} \quad \forall s \in S; i \in N; k \in K \quad (4.37)$$

$$\sum_{e \in E} |P_e| z_{kes} - \sum_{p \in P} y_{ipks} \leq |P|(1 - \alpha_{iks}) \quad \forall s \in S; i \in N; k \in K \quad (4.38)$$

Observe que o termo $\sum_{e \in E} |P_e| z_{kes}$ representa o número de faixas do transportador k no sub-período

s , de acordo com o arranjo selecionado para tal transportador. Já o termo $\sum_{p \in P} y_{ipks}$ representa o número de faixas do transportador k designadas ao produto i no mesmo sub-período. Desta forma, pode-se representar matematicamente que se a diferença entre esses termos é igual a 0, *i.e.* $\sum_{e \in E} |P_e| z_{kes} - \sum_{p \in P} y_{ipks} = 0$, implica que o produto i é designado a todas as faixas do transportador k , e, portanto, não há produção simultânea de produtos diferentes nesse transportador. Caso contrário, se a diferença entre os dois termos é maior que 0, devido às restrições (4.26) e (4.27) é correto afirmar que mais de um tipo de produto é transportado simultaneamente no mesmo transportador.

As restrições (4.39) e (4.40) garantem que caso produtos diferentes sejam transportados simultaneamente em qualquer k , o número total de moldes de cada tipo nas faces dedicadas ao transportador k é igual à variável inteira β_{ks} vezes o número de faixas designadas para o produto i . Desta forma garante-se que, para cada rotação inteira da máquina de moldagem, o número de produtos obtidos pelos moldes acoplados nas faces F_k é um múltiplo inteiro dos produtos designados ao transportador k e, portanto, é possível transportar tais produtos sempre na mesma ordem durante todo o tempo de produção. Nestas desigualdades o parâmetro BM_k^{II} representa um limitante superior para o número de moldes de qualquer tipo que poderiam ser acoplados em todas as faces dedicadas ao transportador k . Este limitante pode ser determinado como $BM_k^{II} = |F_k| \left\lfloor \frac{L}{\min_{e \in E; p \in P} \{g_{pe}\}} \right\rfloor$.

$$\sum_{f \in F_k} x_{jfs} \leq \beta_{ks} \sum_{p \in P} \sum_{i \in A_j} y_{ipks} + BM_k^{II} \sum_{i \in N} \alpha_{iks} \quad \forall s \in S; j \in J; k \in K \quad (4.39)$$

$$\sum_{f \in F_k} x_{jfs} \geq \beta_{ks} \sum_{p \in P} \sum_{i \in A_j} y_{ipks} - BM_k^{II} \sum_{i \in N} \alpha_{iks} \quad \forall s \in S; j \in J; k \in K \quad (4.40)$$

Note que o termo $\sum_{i \in N} \alpha_{iks}$ é sempre igual a 0 ou 1, como consequência das restrições (4.37) e (4.38). Caso $\sum_{i \in N} \alpha_{iks} = 1$, nenhuma relação é imposta entre o número de moldes nas faces para o transportador k e os produtos nas faixas do mesmo transportador, fazendo com que as variáveis x_{jfs} estejam sujeitas apenas às restrições de configuração da máquina (4.32) - (4.36). No caso em que produtos diferentes sejam designados simultaneamente ao transportador k no sub-período s (*i.e.*, $\sum_{i \in N} \alpha_{iks} = 0$), as restrições (4.39) - (4.40) impõem que o número total de moldes do tipo j acoplados em todas as faces dedicadas a tal transportador seja exatamente um múltiplo do número de faixas designadas aos produtos produzidos por tal molde no transportador k , uma vez que β_{ks} é uma variável inteira. Note assim que esta relação de sincronia entre máquina de moldagem e os transportadores resulta nos conjuntos de restrições não lineares (4.39) e (4.40).

Restrições relacionadas às decisões de dimensionamento

As restrições (4.41) representam o consumo de capacidade em horas da linha de produção em cada período do horizonte. Uma vez que as operações de *setup* são executadas de forma não simultânea, a capacidade em cada período é consumida pelos tempos de produção w_s de cada configuração de processo em $s \in S_t$ e a soma dos tempos de *Setups* I, II e III.

$$\sum_{s \in S_t} w_s + \sum_{s \in S_t} st^I v_s + \sum_{s \in S_t} \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} st_j^{II} u_{jks} + \sum_{s \in S_t} \sum_{k \in K} \sum_{e, e' \in E} st_{ee'}^{III} b_{ee'kt} \leq Q_t \quad \forall t \in T \quad (4.41)$$

As equações (4.42) representam o atendimento da demanda. Observe que as quantidades produzidas de cada produto são representadas como uma função que combina as decisões de geração de padrões e os tempos de produção, resultando nas restrições não lineares (4.42). Caso um produto i seja produzido no sub-período s ($Y_{is} = 1$), a quantidade obtida em tal sub-período é igual ao tempo de produção w_s , vezes a velocidade da máquina R , vezes o número de moldes para esse produto acoplados em todas as faces da máquina no mesmo sub-período.

$$I_{i(t-1)}^+ + \sum_{s \in S_t} Y_{is} w_s R \sum_{f \in F} x_{jfs} + I_{it}^- = I_{i(t-1)}^- + d_{it} + I_{it}^+ \quad \forall j \in J; i \in A_j; t \in T \quad (4.42)$$

Restrições relacionadas às decisões de sequenciamento

As restrições (4.43) representam as operações de *Setup* I, garantindo que esta operação seja executada toda vez que ao menos um molde seja desacoplado ou acoplado na máquina de moldagem. Estas restrições podem ser também representadas por desigualdades mais fortes do tipo $u_{jks} \leq M_j v_s \forall s \in S; j \in J; k \in K$. No entanto, isto implica em um maior número de restrições, e de acordo com experimentos computacionais preliminares, não resulta em diferenças significativas no desempenho dos métodos de solução aqui testados.

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} u_{jks} \leq \sum_{j \in J} M_j v_s \quad \forall s \in S \quad (4.43)$$

As restrições (4.44)-(4.45) representam as operações de *Setup* II e determinam o número de moldes acoplados e desacoplados em cada sub-período, respectivamente. Note que se $\sum_{f \in F_k} x_{jfs} > \sum_{f \in F_k} x_{jfs(s-1)}$, moldes do tipo j são acoplados nas faces da máquina $f \in F_k$ no sub-período s . Analogamente, se $\sum_{f \in F_k} x_{jfs} < \sum_{f \in F_k} x_{jfs(s-1)}$, implica que moldes do tipo j são desacoplados das faces dedicadas a k no sub-período s . Estas relações são representadas como nas restrições (4.44) e (4.45), uma vez que as variáveis $u_{jks} \geq 0$, e aparecem na função objetivo, a qual é de minimização.

$$u_{jks} \geq \sum_{f \in F_k} x_{jfs} - \sum_{f \in F_k} x_{jfs(s-1)} \quad \forall s \in S; j \in J; k \in K \quad (4.44)$$

$$u_{jks} \geq \sum_{f \in F_k} x_{jfs(s-1)} - \sum_{f \in F_k} x_{jfs} \quad \forall s \in S; j \in J; k \in K \quad (4.45)$$

Como representado pelas desigualdades (4.43), toda vez que ao menos um molde é acoplado ou desacoplado, a linha de produção precisa ser parada para executar tais operações. Caso os moldes a serem acoplados para configurar um novo padrão sejam da mesma largura que os moldes utilizados previamente, nenhum ajuste nas faixas dos transportadores precisa ser executado, portanto, apenas os *Setups* do tipo I e II ocorrem nas trocas de padrão. Caso os moldes sejam de largura diferentes, as faixas dos transportadores precisam ser ajustadas e o *Setup* III deve ser executado. As restrições (4.46) e (4.47) representam as operações de *Setup* III, determinando se há troca do arranjo e para o arranjo e' no transportador k no sub-período s . Como na primeira abordagem MSPPP, as restrições de fluxo (4.46) e (4.47) substituem as restrições tradicionais de sequenciamento originalmente propostas por Fleischmann

e Meyr (1997) na forma $b_{ee'ks} \geq z_{ke(s-1)} + z_{ke's} - 1$.

$$\sum_{e \in E} b_{ee'ks} = z_{ke's} \quad \forall s \in S : s \geq 2; k \in K; e' \in E \quad (4.46)$$

$$\sum_{e' \in E} b_{ee'ks} = z_{ke(s-1)} \quad \forall s \in S : s \geq 2; k \in K; e \in E \quad (4.47)$$

As restrições (4.48) correspondem a um dos conjuntos de desigualdades válidas proposto para o Modelo MSPPP. Estas restrições relacionam os *Setups* I e III e são incluídas diretamente no Modelo MICPPP dado que, de acordo com experimentos computacionais preliminares para este modelo e os resultados reportados para o Modelo MSPPP no próximo capítulo, estas melhoram os limitantes inferiores obtidos na resolução do problema.

$$1 - \sum_{e \in E} b_{eeks} \leq v_s \quad \forall s \in S; k \in K \quad (4.48)$$

Finalmente, as expressões (4.49) definem o domínio das variáveis desta formulação.

$$\begin{aligned} z_{eks}, y_{ipks}, Y_{is}, v_s, b_{ee'ks}, \alpha_{iks} \in \{0, 1\}; x_{jfs}, \beta_{ks} \in \mathbf{Z}^+; \\ u_{jks}, I_{it}^+, I_{it}^-, w_s \in \mathbf{R}^+ \forall t \in T; s \in S; i \in N; j \in J; k \in K; e \in E; f \in F; p \in P \end{aligned} \quad (4.49)$$

4.2.3 Estratégia de linearização para o MICPPP

A abordagem MICPPP compreende as restrições não lineares (4.39)-(4.40) e (4.42). As desigualdades (4.39)-(4.40) envolvem a multiplicação das variáveis inteiras β_{ks} e as variáveis binárias y_{ipks} . Similarmente, as restrições (4.42) compreendem a multiplicação das variáveis inteiras x_{jfs} pelas variáveis contínuas w_s e as variáveis binárias Y_{is} . Como técnica de linearização para este modelo, as variáveis inteiras β_{ks} e x_{jfs} são representadas por uma notação binária com base 2, de modo que as variáveis originais são substituídas por um conjunto de variáveis binárias e contínuas, além de um conjunto de restrições de acoplamento. Esta abordagem de linearização para formulações não lineares tem sido utilizada em outros problemas de planejamento de produção, como em Harjunoski et al. (1996), Yanasse e Morabito (2006) e Hajizadeh e Lee (2007), e mostram-se particularmente adequadas quando os limitantes superiores das variáveis inteiras a serem substituídas são relativamente pequenos. Desta forma, para a linearização das restrições (4.39)-(4.40), as variáveis inteiras β_{ks} podem ser substituídas pela seguinte representação.

$$\beta_{ks} = \sum_{r \in \tilde{R}_k} 2^{r-1} \mu_{rks}$$

onde $r \in \tilde{R}_k$ representa cada posição na notação e $\mu_{rks} \in \{0, 1\}$. O tamanho do conjunto \tilde{R}_k , *i.e.*, o número de posições mínimas (ou *bits*) necessárias para representar a variável β_{ks} , é calculado como segue:

$$\text{Limitante superior para } \beta_{ks} = 2^{|\tilde{R}_k|} - 1$$

De modo geral, é necessário um conjunto de *n-bits* para representar números inteiros entre 0 e $2^n - 1$. Assim, caso o valor máximo da variável β_{ks} seja 12, por exemplo, estas variáveis podem ser substituídas

sem perda de generalidade no modelo pela expressão acima, considerando $|\tilde{R}_k| = 4$. Desta forma, as restrições não lineares (4.39) e (4.40) são substituídas pelo conjunto de restrições lineares (4.50)-(4.55):

$$\sum_{f \in F_k} x_{jfs} \leq \sum_{r \in \tilde{R}_k} \sum_{i \in A_j} 2^{r-1} \delta_{riks} + BM_k^{II} \sum_{i' \in N} \alpha_{i'ks} \quad \forall s \in S; j \in J; k \in K \quad (4.50)$$

$$\sum_{f \in F_k} x_{jfs} \geq \sum_{r \in \tilde{R}_k} \sum_{i \in A_j} 2^{r-1} \delta_{riks} - BM_k^{II} \sum_{i' \in N} \alpha_{i'ks} \quad \forall s \in S; i \in N; k \in K \quad (4.51)$$

$$\delta_{riks} \leq \sum_{p \in P} y_{ipks} \quad \forall s \in S; i \in N; k \in K; r \in \tilde{R}_k \quad (4.52)$$

$$\delta_{riks} \leq |P| \mu_{rks} \quad \forall s \in S; i \in N; k \in K; r \in \tilde{R}_k \quad (4.53)$$

$$\delta_{riks} \geq \sum_{p \in P} y_{ipks} - |P|(1 - \mu_{rks}) \quad \forall s \in S; i \in N; k \in K; r \in \tilde{R}_k \quad (4.54)$$

$$\mu_{rks} \in \{0, 1\}; \delta_{riks} \in \mathbf{R}^+ \quad \forall s \in S; i \in N; k \in K; r \in \tilde{R}_k \quad (4.55)$$

Note que caso $\mu_{rks} = 1$, então $\delta_{riks} = \sum_{p \in P_k} y_{ipks}$. Por outro lado, se $\mu_{rks} = 0$, logo $\delta_{riks} = 0$. Esta abordagem de linearização substitui $|K||S|$ variáveis inteiras (β_{ks}) por $|\tilde{R}_k||K||S|$ variáveis binárias (μ_{rks}) e $|\tilde{R}_k||N||K||S|$ variáveis contínuas (δ_{riks}). Consequentemente, quanto maior o conjunto \tilde{R}_k , maior o número de variáveis binárias que são incluídas para a linearização do modelo, o que pode dificultar a sua resolução devido ao aumento no número de variáveis. No entanto, de acordo com as informações coletadas e os conjuntos de instâncias geradas, esta técnica de linearização é viável computacionalmente para o conjunto de instâncias baseadas em dados reais considerados nesta pesquisa.

A mesma técnica de linearização é também aplicada às restrições (4.42), as quais podem ser substituídas pelo seguinte conjunto de restrições e pela representação das variáveis inteiras x_{jfs} em notação posicional binária.

$$I_{i(t-1)}^+ + \sum_{s \in S_t} \sum_{f \in F} \sum_{\hat{r} \in \hat{R}} R(2^{r-1} \Theta_{\hat{r}ifs}) + I_{it}^- = I_{i(t-1)}^- + d_{it} + I_{it}^+ \quad \forall i \in N; t \in T \quad (4.56)$$

$$\Theta_{\hat{r}ifs} \leq w_s \quad \forall s \in S; f \in F; i \in N; \hat{r} \in \hat{R} \quad (4.57)$$

$$\Theta_{\hat{r}ifs} \leq Q_t Y_{is} \quad \forall t \in T; s \in S_t; f \in F; i \in N; \hat{r} \in \hat{R} \quad (4.58)$$

$$\Theta_{\hat{r}ifs} \leq Q_t \theta_{\hat{r}jfs} \quad \forall t \in T; s \in S_t; f \in F; j \in J; i \in A_j; \hat{r} \in \hat{R} \quad (4.59)$$

$$\Theta_{\hat{r}ifs} \geq w_s - Q_t(2 - \theta_{\hat{r}jfs} - Y_{is}) \quad \forall t \in T; s \in S_t; f \in F; j \in J; i \in A_j; \hat{r} \in \hat{R} \quad (4.60)$$

$$\theta_{\hat{r}ifs} \in \{0, 1\}; \Theta_{\hat{r}ifs} \in \mathbf{R}^+ \quad \forall s \in S; i \in N; \hat{r} \in \hat{R} \quad (4.61)$$

Este capítulo apresentou duas abordagens matemáticas para representar as decisões de planejamento na indústria objeto de estudo: um modelo de seleção de processos e planejamento da produção (MSPPP) e um modelo integrado de configuração de processos e planejamento da produção (MICPPP). As duas abordagens diferenciam-se principalmente na forma em que as decisões de configurações de processo são representadas: a formulação MSPPP consiste num modelo linear que utiliza estruturas definidas *a priori* para definir os padrões de moldagem, enquanto a abordagem MICPPP consiste numa formulação não linear que modela as restrições tecnológicas e de sincronia entre os equipamentos da linha para

determinar padrões de moldagem e configurações de processo factíveis. Desigualdades válidas para a abordagem MSPPP e uma técnica de linearização para as restrições não lineares da abordagem MICPPP também foram apresentadas. O próximo capítulo apresenta os resultados dos experimentos computacionais realizados para as abordagens apresentadas neste capítulo, a fim de analisar e comparar as soluções obtidas para cada uma das variantes da abordagem MSPPP e os resultados do MICPPP.

Capítulo 5

Experimentos computacionais com as abordagens MSPPP e MICPPP

Este capítulo apresenta experimentos computacionais para as duas formulações apresentadas no capítulo anterior, resolvidas usando o *solver* CPLEX. O objetivo destes experimentos é comparar as representações matemáticas do problema, comparar as soluções com planos de produção reais implementados da prática da empresa do setor e analisar o desempenho da resolução destas formulações via CPLEX.

A Seção 5.1 apresenta um exemplo ilustrativo que mostra particularmente como as decisões de configuração de processo são definidas em cada abordagem. A Seção 5.2 apresenta as soluções das abordagens propostas para exemplares reais e comparações com planos de produção implementados pela empresa. A Seção 5.3 apresenta experimentos computacionais para o Modelo MSPPP, de modo a analisar o efeito das desigualdades válidas propostas para esta formulação. Já a Seção 5.4 compara os resultados obtidos pelo caso de melhor desempenho do Modelo MSPPP e os resultados do Modelo MICPPP usando CPLEX.

5.1 Exemplo ilustrativo

Esta seção apresenta a solução obtida a partir dos modelos propostos para uma instância real em particular, ilustrando como as configurações de processo na solução das abordagens são representados por ambas as formulações propostas. As soluções das abordagens são também comparadas com um plano de produção real implementado pela fábrica para esse exemplo em particular.

A instância do problema considerada para este exemplo compreende um conjunto de 5 produtos $N = A, B, C, D, E$ e 5 tipos de moldes, um para cada tipo de produto. O horizonte de planejamento possui 4 períodos de tempo $|T| = 4$, cada um deles dividido em 3 sub-períodos de modo que $|S| = 12$. O estado de preparação inicial da linha e as manutenções programadas ao longo do horizonte são considerados como parâmetros conhecidos *a priori*.

Todas as possíveis estruturas requeridas como *input* para o MSPPP foram determinadas para este exemplar, resultando num total de 11 estruturas, apresentadas na Tabela 5.1 (*i.e.*, $|E| = 11$ para a abordagem MSPPP). Para a abordagem MICPPP, os parâmetros de entrada foram definidos de acordo com as

características da linha de produção da fábrica, a qual é conformada por uma máquina de moldagem de 6 faces e 2 transportadores (*i.e.*, $|F| = 6$, $|K| = 2$), e podem ser configurados para dois possíveis arranjos como mostra a Figura 5.1 ($|E| = 2$ para a abordagem MICPPP).

Estrutura	Posições			
	1	2	3	4
1	24	-	-	-
2	20	4	-	-
3	16	8	-	-
4	8	8	4	4
5	12	4	4	4
6	12	8	4	-
7	16	4	4	-
8	8	8	8	-
9	12	9	-	-
10	8	4	9	-
11	4	4	4	9

Tabela 5.1: Conjunto de estruturas possíveis do MSPPP para o exemplo ilustrativo

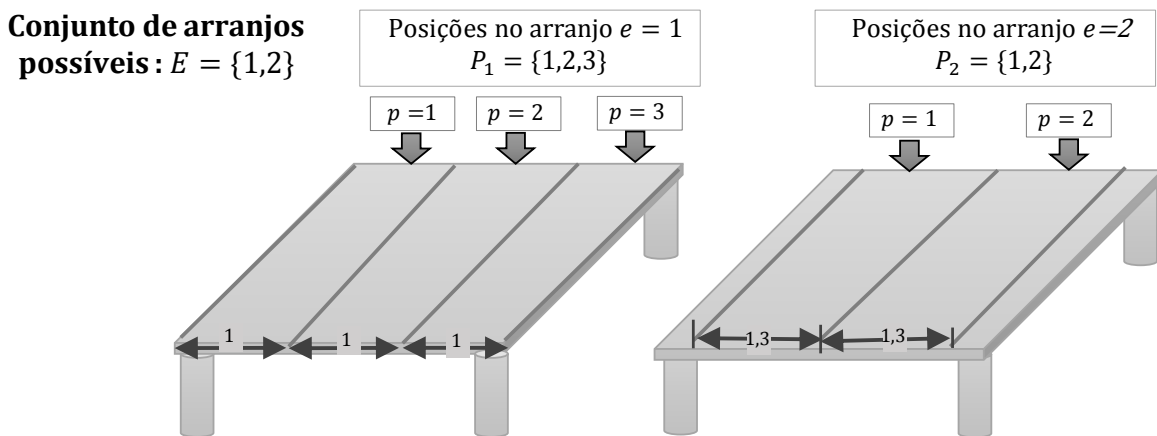


Figura 5.1: Conjunto de arranjos possíveis do MICPPP para o exemplo ilustrativo

A Figura 5.2 ilustra o plano de produção empregado pela fábrica para o exemplar em particular, e a solução ótima obtida por ambos os modelos MSPPP e MICPPP. Note que nos dois planos de produção, relacionados à solução da fábrica e às soluções ótimas obtidas para ambos os modelos neste exemplo, apenas 3 configurações de processo diferentes são utilizados ao longo do horizonte. A primeira configuração em ambos os planos consiste no Padrão 1, o qual é formado por 12 moldes para A e 9 moldes para E ($12[A]+9[E]$), corresponde ao estado de preparação inicial da linha. Observe que os padrões utilizados nas configurações de processo na solução dos modelos são diferentes dos utilizados pela fábrica, com exceção do padrão correspondente ao estado de preparação inicial.

Observe também que a solução ótima das abordagens resulta em um plano de produção com menor consumo de capacidade e custo total de *setup* em comparação com o plano da fábrica, como apresentado na Tabela 5.2. As diferenças na solução obtida pelos dois modelos e o plano da fábrica incluem

uma redução de aproximadamente 10% nos custos totais e 2,8 horas a menos no tempo total de *setup*, ilustrando o potencial das soluções dos modelos na prática.

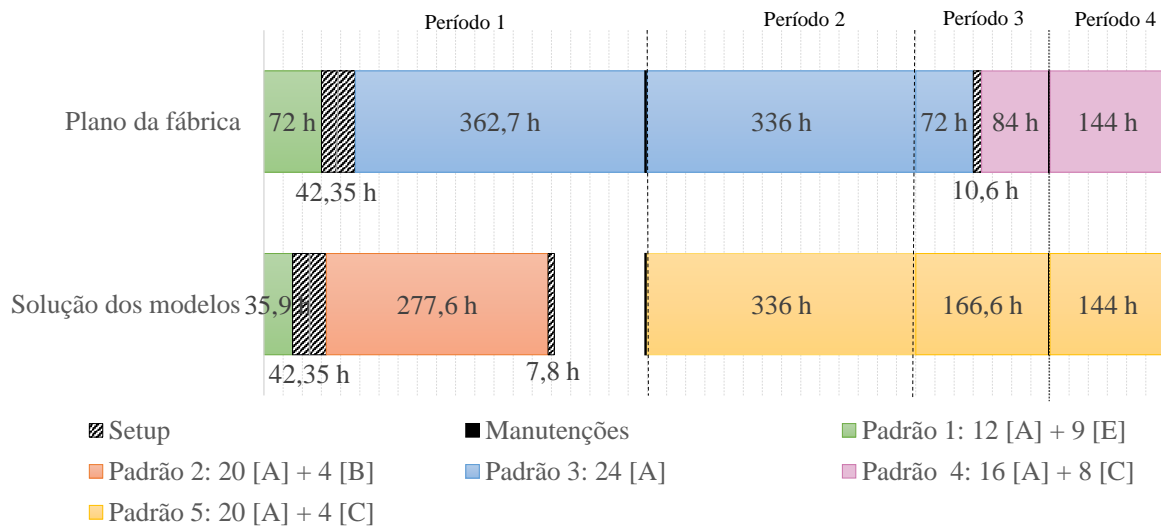


Figura 5.2: Plano da fábrica e soluções ótimas obtidas pelos modelos propostos para o exemplo ilustrativo

	Plano da fábrica	Solução dos modelos
Consumo de capacidade	100%	89,9%
# configurações de processo	3	3
Tempo total de <i>setup</i>	52,95 h	50,15 h
Custo total	67810,83	61116,06

Tabela 5.2: Plano da fábrica e solução ótima obtida pelos modelos propostos para o exemplo ilustrativo

As Figuras 5.3 e 5.4 mostram como o padrão de moldagem 5 do plano de produção na Figura 5.2 é representado pelos modelos MSPPP e MICPPP, respectivamente. Em particular, na Figura 5.3 são utilizadas cores diferentes para diferenciar as posições da estrutura usada pelo modelo MSPPP. Na abordagem MSPPP, o Padrão 5 é definido a partir da estrutura 2 apresentada na Tabela 5.1, a qual especifica que dois tipos de moldes diferentes são acoplados na máquina de moldagem, 20 moldes do primeiro tipo e 4 moldes do segundo. Assim, este padrão é gerado ao selecionar a estrutura 2 e designar o produto A na primeira posição e o produto C na segunda.

Na abordagem MICPPP, o padrão de moldagem 5 é obtido ao configurar os transportadores 1 e 2 de acordo com o arranjo 1, o qual envolve três faixas de separação. O produto A é transportado na segunda e terceira faixa do transportador 1 e em todas as faixas do transportador 2; enquanto o produto C é transportado apenas na primeira faixa do transportador 1.

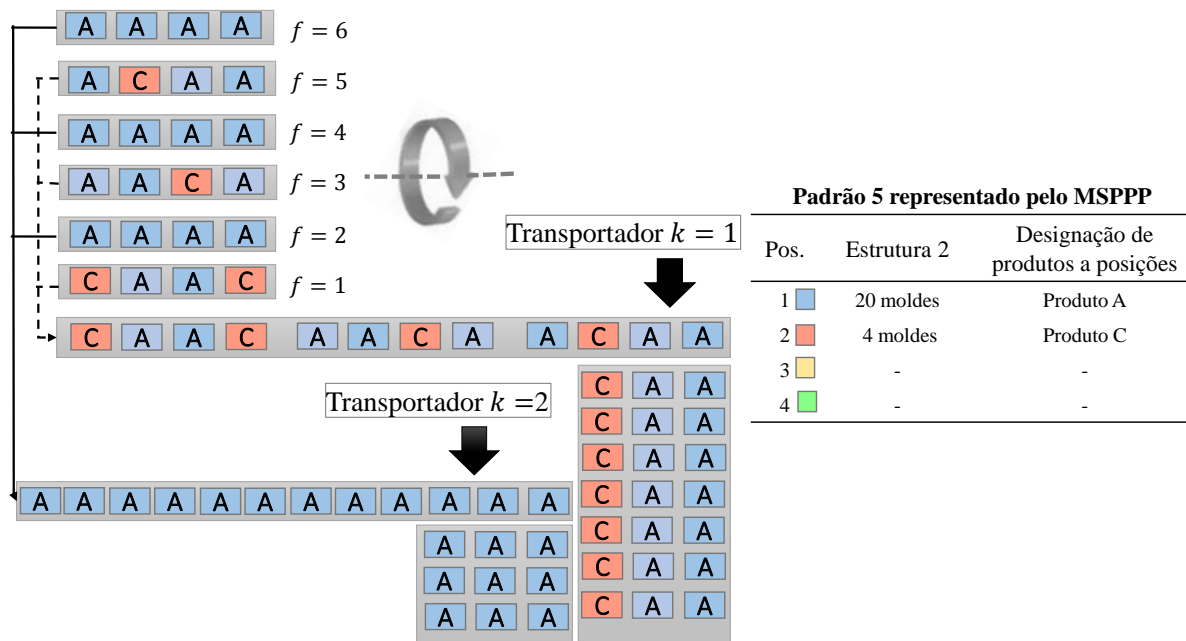


Figura 5.3: Padrões de moldagem 5 representado pelo Modelo MSPPP

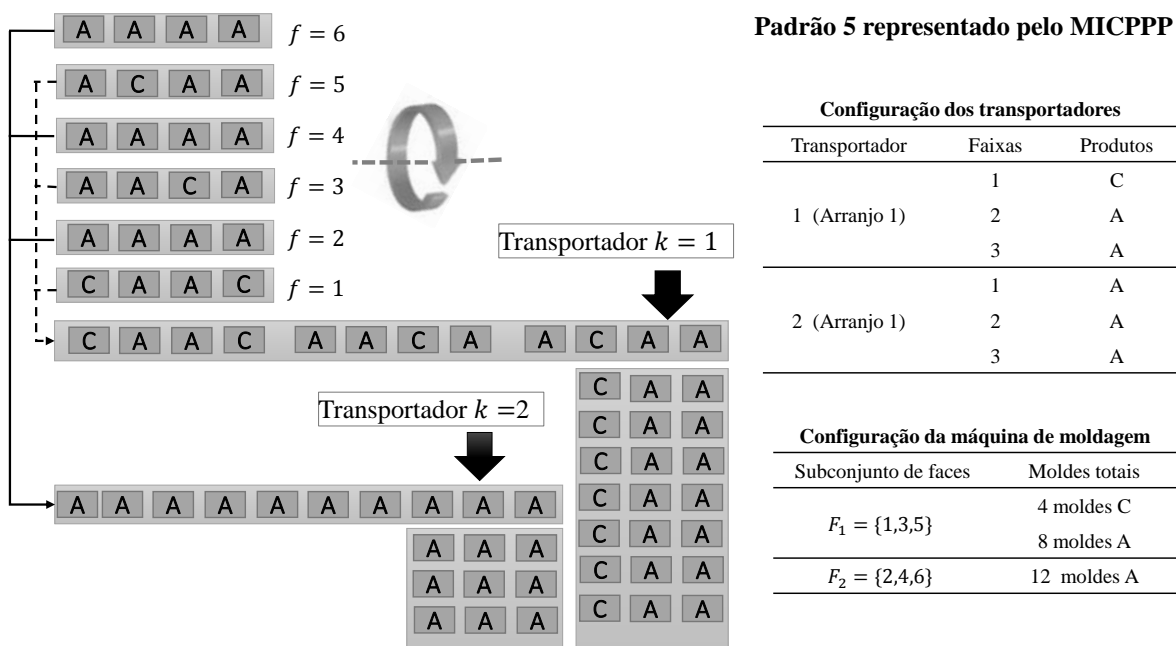


Figura 5.4: Padrões de moldagem 5 representado pelo Modelo MICPPP

5.2 Experimentos computacionais com dados reais de uma fábrica do setor

Esta seção apresenta resultados computacionais para três exemplares criados a partir de dados reais da fábrica no setor de embalagens moldadas. Estes exemplares correspondem às informações de demanda

de estojos para ovos para os meses de Janeiro, Maio e Junho de 2015, respectivamente. O escopo de itens comercializados inclui 11 produtos diferentes ($i \in \{1, \dots, 11\}$), os quais são obtidos a partir de 5 tipos de moldes (A, B, C, D, E). As informações de demanda concentram-se ao final de cada mês de acordo com as informações reais, portanto, para estes experimentos considera-se um horizonte de planejamento de um único período (1 mês), dividido em 6 sub-períodos de dimensão variável.

O sistema de produção real para produção de estojos consiste em três linhas de produção, cada uma com uma máquina de moldagem rotatória de seis faces e dois transportadores. Os equipamentos de moldagem e transporte são iguais para todas as linhas, *i.e.*, as máquinas de moldagem e transportadores. No entanto, a capacidade em termos de tempo pode ser diferente para cada uma delas.

Dado que o problema estudado nesta tese e as abordagens de otimização propostas são baseadas em ambientes de produção com uma única linha, um procedimento de solução baseado na abordagem integrada MICPPP foi desenvolvido para obter soluções comparáveis com o plano de produção da empresa. Para tal fim, os seguintes pressupostos e operações foram realizadas.

- Assume-se uma linha de produção como *input* para o MICPPP, composta por uma máquina de moldagem de 6 faces e três transportadores, de acordo com as especificidades das linhas de produção da fábrica. Considera-se que a capacidade em tempo desta linha é igual à soma das capacidades em tempo das três linhas de produção reais.
- O modelo MICPPP é resolvido 4 vezes. Na primeira execução, o estado de preparação inicial da super linha é igual ao estado de preparação da linha 1 no plano de produção da empresa; na segunda execução, o estado de preparação inicial da super linha é igual ao estado de preparação inicial da linha 2; na terceira execução, o estado de preparação inicial da super linha é igual ao estado de preparação inicial da linha 3; e na quarta execução, o estado de preparação da super linha é livre.
- Para cada solução obtida em cada execução, o plano de produção resultante é desagregado nas três linhas de produção reais. Esta desagregação é realizada levando em conta a capacidade em tempo das linhas de produção originais e o estado de preparação inicial destas. O objetivo é encontrar uma desagregação que incorra no menor tempo total de *setup*.
- Os custos totais de *setup* são recalculados após a desagregação da solução encontrada em cada execução. Finalmente, o plano de produção desagregado com menor custo total é selecionado e comparado com o plano de produção da fábrica.

Estes experimentos foram implementados na linguagem de programação Python 2.7 e resolvidos pelo *solver* CPLEX versão 12.6, em um computador com 2 processadores Intel(R) Xeon(R) X5675/3.07GHz e 96 GB de RAM. O tempo computacional limite para cada execução nestes experimentos foi fixado em 15 minutos.

A Figura 5.5 apresenta o plano de produção da fábrica, na parte esquerda, e o plano de produção obtido pela solução do MICPPP, na parte direita, para o primeiro exemplar testado. O plano de produção da fábrica utiliza 100% da capacidade em tempo das três linhas de produção, *i.e.*, 698 horas disponível na primeira linha, 696 horas na segunda linha e 712 horas na terceira linha. Cada configuração de processo diferente é representada por uma cor específica no diagrama. No total, para este exemplar em particular,

7 configurações de processo diferentes foram programadas pela fábrica, as quais implicaram o uso de 4 padrões de moldagem nas linhas de produção. Observe que uma mesma configuração é utilizada várias vezes na mesma linha de produção, *e.g.*, na linha 1. Isto acontece com frequência na prática devido a que o planejamento é realizado de forma intuitiva e reativa, principalmente entre configurações cujas trocas não envolvem tempos de *setup*.

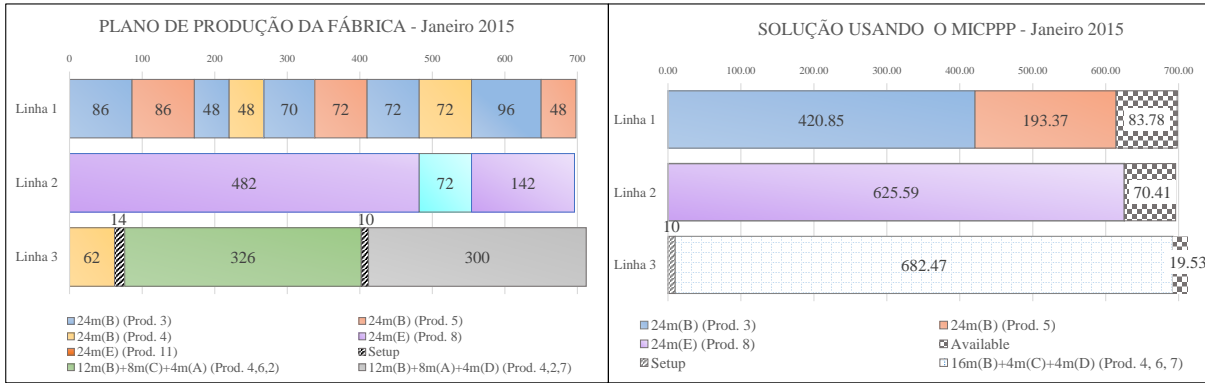


Figura 5.5: Comparação de planos de produção para o exemplar de Janeiro 2015

Note que, no plano da fábrica, a linha 1 usa 3 configurações de processo diferentes: (i) 24 moldes do tipo B para produzir o produto 3, indicado por conveniência na Figura 5.5 como 24m(B) (Prod.3); (ii) 24 moldes do tipo B para produzir o produto 4 (24m(B) (Prod.4)); e, (iii) 24 moldes do tipo B para produzir o produto 5 (24m(B) (Prod.5)). Estas configurações de processo usam o mesmo padrão de moldagem, havendo apenas trocas de produtos. Como mencionado na definição do problema, os tempos e custos de troca entre produtos são consideradas desprezíveis, portanto, o tempo total de *setup* na linha de produção 1 é nulo. Similarmente na linha 2, o mesmo padrão foi utilizado durante todo o horizonte de planejamento, havendo apenas trocas de produto na linha. Já na linha 3, três padrões de moldagem diferentes foram utilizados 24 moldes tipo B (24m(B)) para produzir o produto 4; 12m(B)+8m(C)+4m(A) para produzir os produtos 4, 6 e 2, respectivamente; e, 12m(B)+8m(A)+4m(D) para produzir os produtos 4, 2 e 7, respectivamente. O tempo total de *setup* nesta linha foi de 24 horas.

O plano de produção do MICPP, ilustrado à direita da Figura 5.5, utiliza apenas 4 configurações de processo diferentes nas três linhas, as quais envolvem 3 padrões de moldagem diferentes. Observe que, como apresentado na Tabela 5.3, a alternativa obtida a partir da resolução do modelo apresenta um plano de produção de menor custo em comparação com o plano da fábrica (*i.e.*, aproximadamente -65% dos custos totais), usando um menor número de configurações de processo e menor capacidade (91,8% da capacidade total). Note também que uma maior percentagem da demanda total é atendida na alternativa obtida por meio da resolução do modelo, gerando um volume menor de estoque e atraso ao final do horizonte.

Os resultados obtidos para este exemplar mostram que uma abordagem de otimização integrada para o planejamento da produção na indústria de polpa pode resultar em uma redução de custos totais significativa na prática. Note que um dos padrões usados na solução obtida pelo modelo, *i.e.*, o padrão 16m(B)+4m(C)+4m(D) programado na linha 3, não foi considerado no plano de produção da fábrica. Isto ressalta a importância de considerar as decisões de configuração de processos integrada ao planejamento e sequenciamento da produção.

	Alternativa da fábrica	Alternativa do MICPPP
Volume total produzido	18.304.250	16.900.019
Estoque total ao final do horizonte	1.918.583 (10,5% do total produzido)	35.000 (0,2% do total produzido)
Backlogging total ao final do horizonte	829.333 (4,8% da demanda total)	350.000 (2,0% da demanda total)
Atendimento da demanda	16.385.667 (95,2% da demanda total)	16.865.000 (98,0% da demanda total)
Tempo total de <i>setup</i>	24 horas	10 horas
Uso total da capacidade	2.106 horas (100%)	1.932,28 horas (91,8%)
Custo total de estoque	5.755,75	105 (-98,2%*)
Custo total de backlogging	8.293,33	3.500 (-57,8%*)
Custo total de <i>setup</i>	20.256	8.440 (-58,3%*)
Custo total	34.305,08	12.045,00 (-64,9%*)

* Em comparação com os custos da mesma denominação no plano de produção da fábrica

Tabela 5.3: Comparação dos planos de produção para o exemplar de Janeiro 2015

A Figura 5.6 e Tabela 5.4 apresentam os resultados para o segundo exemplar. Similarmente aos resultados para a instância anterior, o plano de produção da fábrica usa o total da capacidade disponível e um maior número de configurações de processos que o plano obtido pelo MICPPP. Para este exemplar em particular, o plano do MICPPP sugere um menor número de trocas efetuadas no plano da fábrica, porém incorrendo em um tempo e custo maior de *setup*. Note que os custos totais de *setup* no plano do MICPPP são aproximadamente 16,7% maiores que os custos totais de *setup* no plano da fábrica. No entanto, o plano de produção do MICPPP ainda implica um menor custo total, equivalente a -39,2% dos custos totais do plano de produção da fábrica, devido às reduções nos custos de estocagem e atraso. Observe que o plano do MICPPP consegue atender 97,7% da demanda total, envolvendo um atraso de 400.000 unidades e mantendo em estoque apenas o 3,5% do volume produzido. Já o plano de produção da fábrica atende 94,2% da demanda, atrasando os 5,8% restantes e mantendo em estoque aproximadamente 15,5% do total produzido.

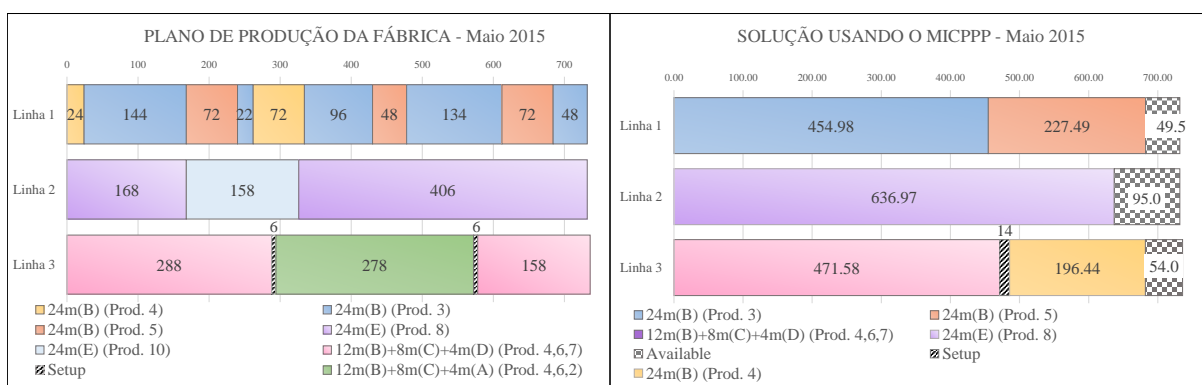


Figura 5.6: Comparação de planos de produção para o exemplar de Maio 2015

Por fim, a Figura 5.7 e Tabela 5.5 apresentam os resultados para o terceiro exemplar. Para esta instância obteve-se a maior redução dos custos totais, *i.e.*, a alternativa do MICPPP envolve custos totais de aproximadamente -76% dos custos totais envolvidos no plano de produção das fábrica. Note que o plano de produção das fábrica atende apenas o 74,9% da demanda total, atrasando os 25,1% restantes, equivalentes a 4.591.000 unidades. Observe que apesar de utilizar 100% da capacidade e a percentagem de atraso no atendimento da demanda ser significativa, os níveis de estoques também são altos ao final do horizonte (22,6% do total produzido ficou em estoque ao final do período). Isto evidencia oportunidades de melhoria na gestão da capacidade e particularmente nas decisões de dimensionamento de lotes. Já

	Alternativa da fábrica	Alternativa do MICPPP
Volume total produzido	19.236.167	17.473.011
Estoque total ao final do horizonte	2.975.166,7 (15,5% do total produzido)	612.000 (3,5% do total produzido)
Backlogging total ao final do horizonte	1.000.000 (5,8% da demanda total)	400.000 (2,3% da demanda total)
Atendimento da demanda	16.261.000 (94,2% da demanda total)	16.861.000 (97,7% da demanda total)
Tempo total de <i>setup</i>	12 horas	14 horas
Uso total da capacidade	2.200 horas (100%)	2.001,45 horas (91,0%)
Custo total de estoque	8.925,5	1.836,0 (-79,4%*)
Custo total de backlogging	10.000,0	4.000,0 (-60,0%*)
Custo total de <i>setup</i>	10.128,0	11.816,0 (+16,7%*)
Custo total	29.053,5	17.652,0 (-39,2%*)

* Em comparação com os custos da mesma denominação no plano de produção da fábrica

Tabela 5.4: Comparação dos planos de produção para o exemplar de Maio 2015

o plano de produção obtido pelo MICPP sugere o uso de 95,6% da capacidade para atender 96,2% da demanda total (*i.e.*, 21,3% a mais que o plano implementado na prática), e incorrendo na metade do tempo e custo total de *setup* do plano de produção real. As diferenças nos custos entre estes dois planos correspondem a 99,5% para os custos de estoque, 85% nos custos de atraso, 50% nos custos de *setup* e 75,9% dos custos totais, sendo o plano do MICPPP a melhor alternativa.

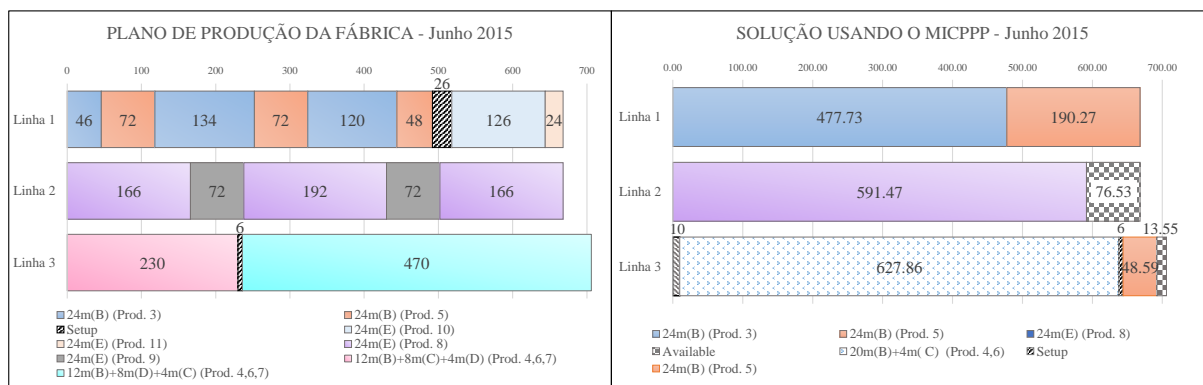


Figura 5.7: Comparação de planos de produção para o exemplar de Junho 2015

	Alternativa da fábrica	Alternativa do MICPPP
Volume total produzido	17.671.250	17.019.924
Estoque total ao final do horizonte	3.991.250 (22,6% do total produzido)	20.596,87 (0,1% do total produzido)
Backlogging total ao final do horizonte	4.591.000 (25,1% da demanda total)	690.701,56 (3,8% da demanda total)
Atendimento da demanda	13.680.000 (74,9% da demanda total)	17.580.298,44 (96,2% da demanda total)
Tempo total de <i>setup</i>	32 horas	16 horas
Uso total da capacidade	2.042 horas (100%)	1.951,92 horas (95,6%)
Custo total de estoque	11.973,75	61,79 (-99,5%*)
Custo total de backlogging	45.910,0	6.907,02 (-85,0%*)
Custo total de <i>setup</i>	27.008,0	13.504,0 (-50,0%*)
Custo total	84.891,75	20.472,81 (-75,9%*)

* Em comparação com os custos da mesma denominação no plano de produção da fábrica

Tabela 5.5: Comparação dos planos de produção para o exemplar de Junho 2015

Os resultados computacionais nesta seção dão uma ideia do possível ganho potencial em sistemas de produção reais ao se utilizar ferramentas de otimização que integram decisões de configuração de processo, dimensionamento e sequenciamento de lotes. Embora as soluções apresentadas tenham sido obtidas via um procedimento heurístico que adapta o MICPPP para fornecer planos de produção para

múltiplas linhas, o que implica que podem existir planos de produção ainda potencialmente melhores, tais soluções resultaram em planos de produção muito melhores que os implementados na prática para todos os exemplares. Os custos totais dos planos obtidos pelo MICPPP resultaram em -64,9%, -39,2% e -75,9% dos custos totais do plano real para os três exemplares testados, respectivamente. O uso da capacidade, as configurações de processo usadas, os níveis de atendimento da demanda, estoque e atraso nos planos de produção da abordagem MICPPP evidenciam melhores decisões de configurações de processo, dimensionamento, sequenciamento em comparação com a prática.

Embora estas análises sejam baseadas na prática de apenas uma empresa do setor, os resultados fornecem *insights* sobre o ganho potencial de abordagens de otimização integrada em sistemas de produção reais. As comparações foram realizadas com base em três das cinco linhas de produção de uma unidade fabril de polpa moldada no Brasil. A empresa colaboradora nesta pesquisa possui no total três unidades fabris de grande escala em diferentes cidades e considera-se uma das maiores no setor de polpa moldada no Brasil. Desta forma, as reduções de custos apresentadas para estes exemplares podem ser potencialmente maiores, levando-se em conta a otimização do sistema de produção de maneira global.

5.3 Experimentos computacionais para o MSPPP

Os experimentos computacionais nesta seção, assim como na próxima, compreendem 10 conjuntos de instâncias diferentes, cada um deles formado por 10 exemplares, conforme apresentado na Tabela 5.6. Estas instâncias foram geradas com base em informações reais de uma fábrica de embalagens de polpa para frutas e ovos, assim como informações do setor e fabricantes de equipamentos na indústria de polpa, de modo que os grupos de instâncias gerados representam diferentes ambientes de produção. Estes experimentos foram implementados na linguagem de programação Python 2.7 e resolvidos pelo *solver* CPLEX versão 12.6, em um *cluster* de computadores de 26 máquinas com 2 processadores Intel(R) Xeon(R) X5675/3.07GHz e 96 GB de RAM. O tempo limite de execução foi definido como 10.800 segundos (*i.e.*, 3 horas), para cada uma das instâncias.

Os nomes dos grupos de instâncias na Tabela 5.6 são definidos como segue: “T” indica o número de períodos de tempo no horizonte de planejamento; “P” o número de produtos; “F” o número de faces; “K” o número de transportadores da linha de produção; e “A” o número de arranjos possíveis que podem ser configurados em cada transportador. Cada período de tempo considera-se como uma semana e é dividido em 4 sub-períodos. Isto implica que, no máximo, 4 configurações de processo diferentes podem ser utilizadas por semana.

Estes grupos representam instâncias do problema de diferentes tamanhos e ambientes de produção. Os grupos “F6K2” representam instâncias do problema com a mesma linha de produção da fábrica, que consiste em uma máquina de moldagem de 6 faces e dois transportadores. A relação entre o tamanho das faces e os transportadores é tal que $l^* < L < 2l^*$, onde l^* representa a largura dos transportadores, de modo que o parâmetro $H_k = 1, \forall k \in K$ para o MICPPP. Os grupos “F6K3” representam instâncias do problema com uma linha de produção composta por uma máquina de 6 faces e três transportadores, sendo que o tamanho das faces desta máquina é maior que as faces dos grupos “F6K2”. Nestes casos, a largura das faces da máquina é exatamente o dobro da largura dos transportadores, *i.e.*, $L = 2l^*$ e $H_k = 2$. Os grupos “A1” representam instâncias onde todos os produtos demandados são da mesma largura, *i.e.*,

$|E| = 1$ para o MICPPP. Já os grupos “A2” e “A3” representam casos em que os produtos demandados possuem diferente larguras. Desta forma, por exemplo, o grupo “T2P5_F6K2A1” representa instâncias do problema estudado com horizonte planejamento de 2 semanas, onde 5 produtos da mesma largura são produzidos em uma linha de produção com uma máquina de moldagem de 6 faces e 2 transportadores. O grupo “T2P5_F6K2A2” possui as mesmas características que o grupo “T2P5_F6K2A1”, com exceção ao tamanho dos produtos, os quais são de larguras diferentes.

Grupo(# inst./grupo)	# per. $ T $	# sub-per. $ S $	# prod. $ N $	MSPPP		MICPPP		
				# estrut. $ E $	# faces $ F $	# transp. $ K $	# arranjos $ E $	
T2P5_F6K2A1(10)	2	8	5	10	6	2	1	
T2P8_F6K2A1(10)	2	8	8	11	6	2	1	
T2P8_F6K3A1(10)	2	8	8	29	6*	3	1	
T2P5_F6K2A2(10)	2	8	5	13	6	2	2	
T2P8_F6K2A2(10)	2	8	8	16	6	2	2	
T2P8_F6K3A3(10)	2	8	8	169	6*	3	3	
T4P5_F6K2A2(10)	4	16	5	13	6	2	2	
T4P5_F6K3A3(10)	4	16	5	85	6*	3	3	
T4P8_F6K2A2(10)	4	16	8	16	6	2	2	
T4P8_F6K3A3(10)	4	16	8	169	6*	3	3	

* A largura das faces desta máquina são maiores que as faces da máquina de moldagem representada nos grupos com dois transportadores (F6K2).

Tabela 5.6: Tamanho dos grupos de instâncias dos experimentos computacionais

Os primeiros três grupos de instâncias (T2P5_F6K2A1, T2P8_F6K2A1 e T2P8_F6K3A1) são considerados de menor tamanho. Estes conjuntos compreendem um horizonte de planejamento de dois períodos (*i.e.*, duas semanas) divididos em oito sub-períodos no total. A característica particular destes grupos consiste na representação de uma linha de produção, em que apenas moldes da mesma largura podem ser acoplados na máquina de moldagem. Assim, o número de possíveis arranjos que podem ser configurados nos transportadores é igual a 1 para estes grupos. Esta estratégia é implementada com frequência na prática, de modo que os transportadores nestas linhas sempre mantenham um único estado de preparação, evitando assim o ajuste nas faixas de separação das esteiras, que geralmente implica em tempos longos e altos custos de *setup*.

Os grupos T2P5_F6K2A2, T2P8_F6K2A2 e T2P8_F6K3A3 são instâncias de tamanho médio. Estes conjuntos compreendem o mesmo tamanho do horizonte de planejamento e número de produtos dos conjuntos de instâncias de menor tamanho. Porém, para estes grupos admite-se que os moldes acoplados na máquina de moldagem podem ser de diferentes larguras. Desta forma, o número de possíveis arranjos para os transportadores nestes conjuntos de instâncias é maior que 1 para todos os grupos. Já os quatro últimos grupos são de maior tamanho, e incluem um horizonte de planejamento de quatro períodos de tempo divididos em 16 sub-períodos no total.

A Tabela 5.6 apresenta os parâmetros em comum para as duas abordagens MSPPP e MICPPP, assim como os parâmetros requeridos para cada uma delas. Note que as características do ambiente de produção, *i.e.*, o tamanho da máquina de moldagem e o número de transportadores, afetam significativamente o número de possíveis estruturas definidas *a priori* para a abordagem MSPPP. Todas as possíveis estruturas para cada conjunto de instâncias foram definidas de antemão, para serem consideradas como *input* da abordagem MSPPP.

Os resultados reportados nesta seção compreendem experimentos para as 4 variantes da abordagem MSPPP, como descrito na apresentação do modelo na Seção 4.1.2: A corresponde à formulação origi-

nal MSPPP; **B** é a formulação MSPPP com as desigualdades válidas (4.22); **C** consiste na formulação MSPPP com as desigualdades válidas (4.23); e **D** considera a formulação original do MSPPP com as desigualdades (4.22) e (4.23). A Tabela 5.7 sumariza os experimentos computacionais realizados para esta abordagem.

Variantes	Grupos (# inst./grupo)	Total execuções
(A) MSPPP (B) MSPPP+Des. (4.22) (C) MSPPP+Des. (4.23) (D) MSPPP+Des. (4.22) & (4.23)	T2P5_F6K2A1 (10)	400
	T2P8_F6K2A1 (10)	
	T2P8_F6K3A1 (10)	
	T2P5_F6K2A2 (10)	
	T2P8_F6K2A2 (10)	
	T2P8_F6K3A3 (10)	
	T4P5_F6K2A2 (10)	
	T4P5_F6K3A3 (10)	
	T4P8_F6K2A2 (10)	
	T4P8_F6K3A3 (10)	

Tabela 5.7: Sumário dos experimentos computacionais para a abordagem MSPPP

As Tabelas 5.8, 5.9 e 5.10 apresentam a média dos resultados da abordagem MSPPP para os conjuntos de instâncias de menor tamanho, tamanho médio e grande, respectivamente. Estas tabelas apresentam informações sobre a média dos limitantes superiores, dos limitantes inferiores, do *gap* de otimalidade e do tempo de execução para cada grupo de instâncias. Informações adicionais sobre o número de vezes que a tolerância de otimalidade foi atingida, o número de vezes em que o limite de tempo foi atingido e o número de vezes que a execução foi interrompida por memória insuficiente, são reportadas para cada grupo na última coluna destas tabelas.

As diferenças entre as diferentes variantes para cada grupo de instâncias permite analisar o efeito das desigualdades válidas propostas para o MSPPP. Observe que para os três grupos da Tabela 5.8, e em geral para todos os conjuntos de instâncias, melhores limitantes inferiores são obtidos em média quando as desigualdades propostas são incluídas na formulação original do MSPPP. As maiores diferenças nos limitantes inferiores aparecem na variante **C**, quando o conjunto de desigualdades (4.23) são incluídas. As desigualdades (4.22) contribuem também na melhora dos limitantes inferiores, conforme os resultados para a variante **B**. No entanto, para este caso em particular, os limitantes superiores obtidos ao término do tempo de execução resultam em soluções de maior custo, em comparação com as outras variantes testadas.

Note que para a variante **B** do primeiro grupo T2P5_F6K2A1, a execução de uma das dez instâncias foi interrompida por memória insuficiente. Neste caso, os valores dos limitantes superiores, inferiores e *gap* reportados correspondem aos valores registrados instantes antes da interrupção. O tempo médio de execução não é reportado, dado que não é comparável com os resultados das outras variantes, em que todas as instâncias foram resolvidas até o tempo limite de execução, ou até que a tolerância de otimalidade foi atingida.

Os resultados para o grupo de instâncias T2P8_F6K3A1 mostram a dificuldade da resolução da abordagem MSPPP via CPLEX. Como mencionado anteriormente, este grupo representa um sistema de produção de maior tamanho, o qual influencia significativamente o tamanho do problema para a

Grupo	Var.	Lim. Sup.*	Lim. Inf.*	Gap*	Tempo (s)*	Inf. adic. °
T2P5_F6K2A1	A	17.336,0	15.578,3	10,67%	10.642,0	1/9/0
	B	17.369,3	15.773,6	9,67%	-	1/8/1
	C	17.336,0	15.710,3	9,87%	9.897,9	1/9/0
	D	17.336,0	15.789,5	9,39%	9.891,5	1/9/0
T2P8_F6K2A1	A	26.668,2	7.298,2	72,59%	10.800,0	0/10/0
	B	30.130,5	10.464,4	64,29%	10.800,0	0/10/0
	C	26.668,2	14.111,2	47,07%	10.800,1	0/10/0
	D	26.668,2	13.940,2	47,70%	10.800,0	0/10/0
T2P8_F6K3A1	A	39.149,8	0,0	100,00%	10.800,1	0/10/0
	B	40.901,2	0,0	100,00%	10.800,1	0/10/0
	C	23.977,0	4.360,7	81,76%	10.800,1	0/10/0
	D	24.190,2	4.220,0	82,50%	10.800,1	0/10/0

A: formulação original MSPPP; **B:** MSPPP + Des. (4.22); **C:** MSPPP + Des. (4.23); **D:** MSPPP + Des. (4.22) & (4.23)

* Média

° (1)/(2)/(3): (1) # instâncias em que a tolerância de otimalidade foi atingida; (2) # instâncias em que o tempo limite de execução foi atingido e ao menos uma solução factível foi encontrada; (3) # instâncias em que houve interrupção por memória insuficiente.

Tabela 5.8: Resultados da abordagem MSPPP para os grupos de instâncias T2P5_F6K2A1, T2P8_F6K2A1 e T2P8_F6K3A1

formulação MSPPP, devido ao grande número de estruturas definidas *a priori*. O número de possíveis estruturas para este grupo é aproximadamente 2,6 vezes o número de estruturas para o grupo de instâncias que representa um sistema de produção menor, com o mesmo número de produtos e horizonte de planejamento (grupo T2P8_F6K2A1). Para as variantes **A** e **B** do grupo T2P8_F6K3A1, soluções factíveis são encontradas nos primeiros segundos de execução, enquanto os limitantes inferiores se mantêm iguais a zero. Ao incluir as desigualdades (4.23) (**C** e **D**), e em particular na variante **C**, as soluções encontradas ao término do tempo limite de execução são aproximadamente 38,7% melhores que as soluções obtidas pela formulação original. As desigualdades válidas propostas permitem encontrar melhores limitantes inferiores em comparação com os demais casos, no entanto, estes ainda são significativamente fracos para este grupo de instâncias.

Os resultados apresentados na Tabela 5.9 para as instâncias de tamanho médio mostram também que os limitantes inferiores obtidos por meio do MSPPP são significativamente melhores quando as desigualdades válidas (4.22), e em particular as desigualdades (4.23), são incluídas na formulação. O caso de melhor desempenho, considerando *gap* médio das soluções e o tempo médio de execução, acontece na variante **D** para o primeiro e segundo grupo da Tabela 5.9. Observe que no grupo T2P5_F6K2A2, todas as instâncias são resolvidas até otimalidade em um tempo médio computacional de 5.809,6 segundos. Para o grupo T2P8_F6K2A2, não foi possível comprovar a otimalidade de nenhuma das 10 instâncias do grupo, no entanto, o *gap* médio é de apenas 3,33%, *i.e.*, 25,1% menor em relação ao *gap* médio das soluções ao se resolver a formulação original usando CPLEX.

Para o grupo T2P8_F6K3A3, não é possível encontrar soluções factíveis para a maioria das instâncias, inclusive quando as desigualdades válidas propostas são incluídas na formulação. Soluções factíveis para apenas duas instâncias deste grupo são encontradas na variante **C** após 3 horas de execução, cujos *gaps* de otimalidade resultam maiores que 85%. A dificuldade na resolução deste grupo de instâncias pode

Grupo	Var.	Lim. Sup.*	Lim. Inf.*	Gap*	Tempo (s)*	Inf. adic. °
T2P5_F6K2A2	A	22.271,1	22.186,6	0,37%	9.997,8	4/6/0
	B	22.271,1	22.155,6	0,50%	8.762,7	5/5/0
	C	22.271,1	22.270,1	0,00%	6.307,0	0/10/0
	D	22.271,1	22.269,9	0,01%	5.808,6	0/10/0
T2P8_F6K2A2	A	28.263,4	20.279,2	28,34%	10.800,0	0/10/0
	B	29.153,9	21.022,6	27,57%	10.800,0	0/10/0
	C	28.263,4	27.125,6	4,01%	10.800,0	0/10/0
	D	28.263,4	27.319,4	3,33%	10.800,0	0/10/0
T2P8_F6K3A3	A	-	-	-	-	-
	B	-	-	-	-	-
	C	37.531,8	4.499,4	87,86%	10.806,9	0/2/0
	D	-	-	-	-	-

A: formulação original MSPPP; B: MSPPP + Des. (4.22); C: MSPPP + Des. (4.23); D: MSPPP + Des. (4.22) & (4.23)

* Média

° (1)/(2)/(3): (1) # instâncias em que a tolerância de otimalidade foi atingida; (2) # instâncias em que o tempo limite de execução foi atingido e ao menos uma solução factível foi encontrada; (3) # instâncias em que houve interrupção por memória insuficiente.

Tabela 5.9: Resultados da abordagem MSPPP para os grupos de instâncias T2P5_F6K2A2, T2P8_F6K2A2 e T2P8_F6K3A3

ser explicado pelo grande número de estruturas definidas *a priori* para a abordagem MSPPP. Observe na Tabela 5.6 que o número de estruturas para este grupo é muito maior que o número de estruturas para os outros grupos de tamanho médio, como por exemplo, aproximadamente 7 vezes maior que o número de estruturas definidas *a priori* para o grupo T2P8_F6K2A2.

Em relação aos resultados para os conjuntos de instâncias de maior tamanho, a Tabela 5.10 confirma a dificuldade da abordagem MSPPP usando CPLEX para encontrar soluções factíveis para instâncias maiores do problema. Note que até um limite de tempo computacional de 3 horas, não foi possível encontrar soluções factíveis para nenhuma das instâncias dos grupos T4P5_F6K3A3 e T4P8_F6K3A3, em nenhuma das variantes A, B, C ou D.

Para os conjuntos de instâncias na Tabela 5.10, as instâncias do problema são difíceis de serem resolvidas usando CPLEX, sendo que o *gap* médio das soluções nestes conjuntos supera 44% em todos os casos. A inclusão das desigualdades válidas propostas tem ainda um efeito positivo no desempenho da abordagem MSPPP, porém o ganho obtido é significativamente menor que o obtido para os conjuntos de instâncias anteriores. Para o grupo T4P5_F6K2A2, melhores limitantes superiores e inferiores são encontrados na variante D, em comparação com a formulação original, reduzindo o *gap* médio das soluções em aproximadamente 3,6%. Já para o grupo T4P8_F6K2A2, o caso de melhor desempenho é a variante C, em que melhores soluções e limitantes inferiores são encontrados ao término de 3 horas de execução, incorrendo em um *gap* médio aproximadamente 5% menor em relação ao *gap* médio das soluções obtidas pela formulação original.

A partir dos resultados reportados nesta seção, podemos inferir a dificuldade na resolução da abordagem MSPPP usando o *solver* CPLEX, particularmente para o conjunto de instâncias do problema que representa sistemas de produção de maior tamanho, para os quais o número de possíveis estruturas definidas *a priori* aumenta significativamente. Isto implica em limitações na aplicação desta abordagem de

Grupo	Var.	Lim. Sup.*	Lim. Inf.*	Gap*	Tempo (s)*	Inf. adic. °
T4P5_F6K2A2	A	109.286,84	58.496,03	47,88%	10.800,0	0/10/0
	B	106.207,37	59.432,31	46,28%	10.800,0	0/10/0
	C	108.785,37	56.854,45	48,75%	10.800,1	0/10/0
	D	106.995,42	60.792,25	44,27%	10.800,0	0/10/0
T4P5_F6K3A3	A	-	-	-	-	-
	B	-	-	-	-	-
	C	-	-	-	-	-
	D	-	-	-	-	-
T4P8_F6K2A2	A	174.073,9	86.174,8	49,87%	10.800,1	0/10/0
	B	172.445,6	87.565,0	48,50%	10.800,1	0/10/0
	C	167.508,9	90.364,5	44,84%	10.800,3	0/10/0
	D	179.249,4	90.726,0	47,68%	10.800,1	0/10/0
T4P8_F6K3A3	A	-	-	-	-	-
	B	-	-	-	-	-
	C	-	-	-	-	-
	D	-	-	-	-	-

A: formulação original MSPPP; B: MSPPP + Des. (4.22); C: MSPPP + Des. (4.23); D: MSPPP + Des. (4.22) & (4.23)

* Média

° (1)/(2)/(3): (1) # instâncias em que a tolerância de otimalidade foi atingida; (2) # instâncias em que o tempo limite de execução foi atingido e ao menos uma solução factível foi encontrada; (3) # instâncias em que houve interrupção por memória insuficiente.

Tabela 5.10: Resultados da abordagem MSPPP para os grupos de instâncias T4P5_F6K2A2, T4P5_F6K3A3, T4P8_F6K2A2 e T4P8_F6K3A3

otimização em sistemas de produção maiores, nas quais o número de possíveis configurações de processo e estruturas usadas para sua definição é significativamente grande.

5.4 Comparação das abordagens MSPPP e MICPPP

Esta seção apresenta os resultados obtidos pela variante de melhor desempenho da abordagem MSPPP apresentado na seção anterior, e os resultados da abordagem integrada MICPPP, para os conjuntos de instâncias descritos na Tabela 5.6. Estes experimentos foram implementados na mesma linguagem e configurações descritas na seção anterior, considerando um limite de 3 horas de tempo de execução.

Nos experimentos da abordagem integrada MICPPP nos conjuntos de instância de menor tamanho, *i.e.*, grupos T2P5_F6K2A1, T2P8_F6K2A1 e T2P8_F6K3A1, algumas das decisões de configuração dos transportadores foram simplificadas, permitindo a fixação de algumas variáveis *a priori*. Uma vez que para estes grupos considera-se que todos os moldes possuem a mesma largura, o número de faixas e a largura destas permanece constante durante o horizonte de planejamento. Assim, como o número de arranjos possíveis para cada transportador é igual a 1, as variáveis z_{kes} da formulação MICPPP podem ser fixadas de antemão. As Tabelas 5.11, 5.12 e 5.13 apresentam os resultados detalhados para cada conjunto de instâncias, especificando o limitante superior, inferior, *gap* de otimalidade e tempo de execução na resolução das formulações propostas usando CPLEX.

Os resultados para a abordagem MSPPP na Tabela 5.11 correspondem à variante **D** para o grupo

T2P5_F6K2A1 e à variante C para os grupos T2P8_F6K2A1 e T2P8_F6K3A1, as quais referem-se aos casos de melhor desempenho do MSPPP reportada na seção anterior para tais grupos de instâncias. Observe que para estes conjuntos de problemas, a abordagem MSPPP apresenta melhor desempenho que a abordagem integrada MICPPP apenas para o grupo T2P5_F6K2A1, em que os limitantes inferiores são melhores que os obtidos pela abordagem integrada em aproximadamente 6,4%. Neste grupo em particular, em que apenas a primeira instância é resolvida até otimalidade por ambas as abordagens, o MSPPP encontra a solução ótima do problema em apenas 27,8% do tempo total utilizado pela abordagem MIPPP.

Para os grupos T2P8_F6K2A1 e T2P8_F6K3A1, as diferenças no desempenho das abordagens são significativas, principalmente em relação aos limitantes inferiores. Note que os limitantes inferiores obtidos pela abordagem integrada MICPPP resultam em média 34,71% melhores que os obtidos pela abordagem MSPPP para o grupo T2P8_F6K2A1. Já no grupo T2P8_F6K3A1, em que os limitantes da abordagem MSPPP são particularmente fracos, a média dos limitantes inferiores da abordagem MICPPP é aproximadamente 5,15 vezes maior que a média dos limitantes inferiores do MSPPP. Em relação aos limitantes superiores, as diferenças entre os resultados das abordagens são pequenas, sendo que a média das soluções obtidas pelo MICPPP resultam 0,3% e 1,76% melhores que as encontradas pelo MSPPP para os grupos T2P8_F6K2A1 e T2P8_F6K3A1, respectivamente.

A Tabela 5.12 apresenta os resultados para os conjuntos de instâncias de tamanho médio. Similarmente aos resultados anteriores, a abordagem MSPPP, a qual requer a definição de estruturas *a priori*, tem melhor desempenho para o grupo de instâncias menor, *i.e.*, grupo T2P5_F6K2A2. Para este conjunto em particular, a abordagem MSPPP encontra soluções ótimas para todas as instâncias em um tempo computacional médio de 5.808,6; enquanto a abordagem integrada MICPPP não consegue provar a otimalidade de nenhuma das soluções desse grupo até o tempo limite de execução. Observe que neste caso, as duas formulações encontram as mesmas soluções, porém os limitantes inferiores da abordagem MIPPP são mais fracos, incorrendo em um *gap* médio de otimalidade de 16,23%.

Em relação ao grupo T2M8P8_K2A2, os resultados para as duas abordagens são competitivos, sendo que as formulações encontram os mesmos limitantes superiores para todas as instâncias e os limitantes inferiores são diferentes em apenas 0,90%. Já para o último grupo nesta tabela, a abordagem integrada MICPPP apresenta claramente um melhor desempenho que a abordagem MSPPP, uma vez que encontra soluções factíveis para todas as instâncias com *gap* de otimalidade médio de 12,29%, enquanto o MSPPP encontra soluções factíveis para apenas duas das instâncias desse grupo.

Os resultados computacionais apresentados na Tabela 5.13 correspondem aos grupos de instâncias de maior tamanho. De modo geral, ainda na variante com melhor desempenho da abordagem MSPPP, não é possível encontrar soluções factíveis para os grupos T4P5_F6K3A3 e T4P8_F6K3A3, enquanto a abordagem integrada fornece soluções factíveis para todas estas. Considerando os conjuntos T4P5_F6K2A2, a abordagem MICPPP apresenta um desempenho significativamente melhor que o MSPPP, uma vez que fornece em média limitantes superiores 2,9% melhores, e limitantes inferiores aproximadamente 31,6% melhores, em comparação com o MSPPP. Já para o grupo T4P8_F6K2A2, a abordagem MSPPP fornece soluções ligeiramente melhores (aproximadamente 2%) que as fornecidas pelo MICPPP. No entanto, a abordagem integrada ainda apresenta limitantes inferiores aproximadamente 18,31% melhores que a abordagem MSPPP.

Grupo	Inst.	MSPPP*				MICPPP			
		Lim. sup.	Lim. inf.	Gap	Tempo (s)	Lim. sup.	Lim. inf.	Gap	Tempo (s)
T2P5_F6K2A1	1	25.334,3	25.331,9	0,01%	1.714,7	25.334,3	25.331,8	0,01%	6.156,2
	2	15.766,8	14.260,0	9,56%	10.800,0	15.766,8	13.672,8	13,28%	10.800,0
	3	16.563,6	14.904,5	10,02%	10.800,0	16.563,6	13.672,8	17,45%	10.800,0
	4	16.836,2	15.108,0	10,26%	10.800,0	16.836,2	13.672,8	18,79%	10.800,0
	5	16.148,2	14.552,4	9,88%	10.800,0	16.148,2	13.746,6	14,87%	10.800,0
	6	16.407,1	14.718,6	10,29%	10.800,0	16.407,1	13.672,8	16,67%	10.800,0
	7	16.477,3	14.762,1	10,41%	10.800,0	16.477,3	13.672,8	17,02%	10.800,0
	8	16.960,7	14.860,2	12,38%	10.800,0	16.960,7	13.672,8	19,39%	10.800,0
	9	16.362,0	14.880,9	9,05%	10.800,0	16.362,0	13.672,8	16,44%	10.800,0
	10	16.503,2	14.516,8	12,04%	10.800,0	16.503,2	13.672,8	17,15%	10.800,0
Média		17.336,0	15.789,54	9,39%	9.891,5	17.336,0	14.846,1	15,11%	10.335,6
T2M8P8_K2A1	1	26.378,0	13.785,0	47,74%	10.800,0	26.378,0	20.375,9	22,75%	10.800,0
	2	26.365,8	13.672,8	48,14%	10.800,0	26.604,1	18.535,4	30,33%	10.800,0
	3	26.528,0	14.596,5	44,98%	10.800,0	26.528,0	19.834,4	25,23%	10.800,0
	4	26.838,2	13.672,8	49,05%	10.800,0	26.838,2	19.452,4	27,52%	10.800,0
	5	26.974,8	11.309,6	58,07%	10.800,0	26.974,8	17.154,2	36,41%	10.800,0
	6	27.005,8	14.509,0	46,27%	10.800,0	27.005,8	20.054,7	25,74%	10.800,0
	7	26.212,0	15.529,6	40,75%	10.800,0	26.785,7	20.241,6	24,43%	10.800,0
	8	27.473,9	15.383,8	44,01%	10.800,2	27.473,9	17.790,4	35,25%	10.800,0
	9	26.731,1	14.168,4	47,00%	10.800,0	26.731,1	18.997,8	28,93%	10.800,0
	10	26.174,1	14.484,8	44,66%	10.800,7	26.174,1	17.659,1	32,53%	10.800,0
Média		26.668,18	14.111,22	47,07%	10.800,1	26.749,4	19.009,6	28,91%	10.800,0
T2M8P8_K3A1	1	23.328,4	4.220,0	81,9%	10.800,11	23.328,4	22.886,0	1,90%	10.800,0
	2	23.252,6	4.220,0	81,9%	10.800,02	23.252,6	21.434,0	7,82%	10.800,0
	3	23.703,0	5.626,7	76,3%	10.800,02	23.703,0	21.696,7	8,46%	10.800,0
	4	23.494,8	4.220,0	82,0%	10.800,17	23.494,8	23.125,6	1,57%	10.800,0
	5	28.048,3	4.220,0	85,0%	10.800,13	23.828,3	23.205,9	2,61%	10.800,0
	6	23.846,4	4.220,0	82,3%	10.800,09	23.846,4	20.872,9	12,47%	10.800,0
	7	23.724,8	4.220,0	82,2%	10.800,11	23.724,8	23.408,1	1,34%	10.800,0
	8	23.604,9	4.220,0	82,1%	10.800,14	23.604,9	21.409,4	9,30%	10.800,0
	9	23.497,4	4.220,0	82,0%	10.800,01	23.497,4	23.125,6	1,58%	10.800,0
	10	23.269,8	4.220,0	81,9%	10.800,01	23.269,8	23.125,6	0,62%	10.800,0
Média		23.977,0	4.360,7	81,8%	10.800,1	23.555,0	22.429,0	4,77%	10.800,0

* Resultados detalhados da variante do MSPPP com melhor desempenho reportado na Tabela 5.8

Tabela 5.11: Resultados das abordagens MSPPP e MICPPP para os grupos de instâncias T2P5_F6K2A1, T2M8P8_K2A1, T2M8P8_K3A1

Os resultados apresentados neste capítulo evidenciam que, embora a abordagem MICPPP seja mais complexa que MSPPP, ela é uma abordagem mais flexível para tratar problemas de planejamento em diferentes ambientes de produção. Note que para a abordagem MSPPP, o número de estruturas definidas *a priori*, e conseqüentemente o tamanho do problema, cresce significativamente para instâncias que representam sistemas de produção maiores, dificultando ainda mais sua resolução via o *solver* CPLEX. De modo geral, a abordagem MSPPP mostra vantagens sobre a abordagem MICPPP para apenas 2 dos 10 grupos de instâncias testados (grupos T2P5_F6K2A1 e T2P5_F6K2A2). Apenas para o Grupo T2M8P8_K2A2 em particular, as duas abordagens resultaram competitivas para a resolução das instâncias, atingindo as mesmas soluções com *gap* de otimalidade de até 3.3% em média. Já para os demais grupos de instâncias, a abordagem MICPPP consegue encontrar soluções factíveis e mostra-se competitiva para o grupo T2M8P8_K3A1, em particular. No entanto, fica evidente a dificuldade a resolução ótima das instâncias usando CPLEX, principalmente para os conjuntos de maior tamanho reportados na Tabela 5.13, o que motiva a pesquisa e o desenvolvimento de outros métodos de solução para

Grupo	Inst.	MSPPP*				MICPPP			
		Lim. sup.	Lim. inf.	Gap	Tempo (s)	Lim. sup.	Lim. inf.	Gap	Tempo (s)
T2P5_F6K2A2	1	21.926,9	21.924,8	0,0%	5.214,3	21.926,9	18.310,7	16,49%	10.800,0
	2	21.252,9	21.252,9	0,0%	5.154,3	21.252,9	18.210,6	14,31%	10.800,0
	3	22.825,5	22.825,5	0,0%	6.118,6	22.825,5	19.820,3	13,17%	10.800,0
	4	23.079,1	23.077,7	0,0%	4.514,8	23.079,1	19.781,2	14,29%	10.800,0
	5	21.004,4	21.004,4	0,0%	5.301,5	21.004,4	17.659,2	15,93%	10.800,0
	6	21.245,1	21.243,1	0,0%	4.395,3	21.245,1	17.270,5	18,71%	10.800,0
	7	22.751,1	22.748,9	0,0%	7.199,1	22.751,1	18.023,2	20,78%	10.800,1
	8	23.434,0	23.432,6	0,0%	6.826,1	23.434,0	19.894,4	15,10%	10.800,0
	9	22.235,8	22.233,7	0,0%	5.507,2	22.235,8	18.836,0	15,29%	10.800,0
	10	22.956,5	22.955,1	0,0%	7.854,5	22.956,5	18.783,0	18,18%	10.800,0
Média		22.271,1	22.269,9	0,0%	5808,6	22.271,1	18.658,9	16,23%	10.800,0
T2M8P8_K2A2	1	27.671,9	27.218,8	1,6%	10.800,0	27.671,9	27.218,8	1,64%	10.800,0
	2	28.005,3	27.548,8	1,6%	10.800,0	28.005,3	28.002,7	0,01%	6.014,9
	3	28.811,4	27.904,9	3,1%	10.800,0	28.811,4	28.044,9	2,66%	10.800,0
	4	28.477,6	27.785,4	2,4%	10.800,0	28.477,6	28.476,7	0,00%	4.979,6
	5	28.082,2	25.334,9	9,8%	10.800,0	28.082,1	27.225,4	3,05%	10.800,0
	6	28.836,1	27.407,5	5,0%	10.800,0	28.836,1	27.323,1	5,25%	10.800,0
	7	28.383,9	27.362,9	3,6%	10.800,0	28.383,9	26.181,3	7,76%	10.800,0
	8	29.323,2	28.565,3	2,6%	10.800,0	29.323,2	28.565,3	2,58%	10.800,0
	9	27.768,4	27.198,4	2,1%	10.800,0	27.768,4	27.767,1	0,00%	9.855,6
	10	27.274,3	26.867,0	1,5%	10.800,0	27.274,3	26.867,0	1,49%	10.800,0
Média		28.263,5	27.319,4	3,3%	10.800,0	28.263,5	27.567,2	2,45%	9.645,0
T2M8P8_K3A3	1	-	-	-	-	33.137,3	29.582,0	10,73%	10.800,0
	2	-	-	-	-	33.356,3	27.286,3	18,20%	10.800,0
	3	40.766,58	4.238,28	89,60%	10.803,9	34.224,3	30.268,1	11,56%	10.800,0
	4	-	-	-	-	33.711,6	30.148,6	10,57%	10.800,0
	5	-	-	-	-	33.627,9	29.606,5	11,96%	10.800,0
	6	-	-	-	-	34.297,1	28.723,8	16,25%	10.800,0
	7	-	-	-	-	33.712,4	29.913,3	11,27%	10.800,0
	8	-	-	-	-	35.031,5	30.987,5	11,54%	10.800,0
	9	-	-	-	-	33.282,1	29.807,9	10,44%	10.800,0
	10	34.297,12	4.760,50	86,12%	10.809,9	32.623,7	29.230,2	10,40%	10.800,0
Média		37.531,9	4.499,4	87,86%	10.806,9	33.700,4	29.555,4	12,29%	10.800,0

* Resultados detalhados da variante do MSPPP com melhor desempenho reportado na Tabela 5.9

Tabela 5.12: Resultados das abordagens MSPPP e MICPPP para os grupos de instâncias T2P5_F6K2A2, T2M8P8_K2A2, T2M8P8_K3A3

resolver as formulações propostas.

Grupo	Inst.	MSPPP*				MICPPP			
		Lim. sup.	Lim. inf.	Gap	Tempo (s)	Lim. sup.	Lim. inf.	Gap	Tempo (s)
T4P5_F6K2A2	1	64.884,5	13.582,8	79,1%	10.800,0	59.757,0	19.159,0	67,94%	10.800,0
	2	85.933,3	46.265,6	46,2%	10.800,03	85.933,3	57.951,2	32,56%	10.800,0
	3	136.799,5	83.859,3	38,7%	10.800,03	139.362,2	112.270,5	19,44%	10.800,3
	4	141.245,8	69.894,8	50,5%	10.800,03	143.885,8	102.387,2	28,84%	10.800,0
	5	89.963,2	39.899,2	55,6%	10.800,05	88.269,0	59.125,8	33,02%	10.800,0
	6	109.276,3	86.302,4	21,0%	10.800,01	102.518,0	92.433,3	9,84%	10.800,1
	7	172.625,2	94.925,6	45,0%	10.800,05	15.7262,4	141.059,6	10,30%	10.800,0
	8	82.320,2	54.766,8	33,5%	10.800,04	76.233,9	62.343,4	18,22%	10.800,0
	9	112.650,7	71.068,7	36,9%	10.800,02	111.072,7	90.549,0	18,48%	10.800,0
	10	74.255,4	47.357,4	36,2%	10.800,00	74.255,4	62.708,3	15,55%	10.800,6
Média		106.995,4	60.792,25	44,3%	10.800,03	103.855,0	79.998,7	25,42%	10.800,1
T4P5_F6K3A3	1	-	-	-	-	60.473,8	20.370,1	66,32%	10.800,0
	2	-	-	-	-	94.836,1	43.893,9	53,72%	10.800,0
	3	-	-	-	-	140.555,1	79.453,3	43,47%	10.800,0
	4	-	-	-	-	151.086,5	75.627,6	49,94%	10.800,0
	5	-	-	-	-	91.282,2	43.790,9	52,03%	10.800,0
	6	-	-	-	-	99.961,6	95.156,6	4,81%	10.800,3
	7	-	-	-	-	108.811,9	76.632,3	29,57%	10.800,0
	8	-	-	-	-	73.859,8	61.805,5	16,32%	10.800,0
	9	-	-	-	-	117.280,4	81.764,0	30,28%	10.800,0
	10	-	-	-	-	65.526,2	43.772,6	33,20%	10.800,0
Média		-	-	-	-	100.367,4	62.226,7	37,97%	10.800,0
T4P8_F6K2A2	1	195.746,1	116.045,0	40,72%	10.800,00	176.317,0	118.988,7	32,5%	10.800,0
	2	206.679,7	112.910,9	45,37%	10.800,85	263.334,4	119.241,0	54,7%	10.800,0
	3	212.553,5	83.263,2	60,83%	10.800,00	193.766,5	86.681,8	55,3%	10.800,0
	4	176.100,1	86.351,9	50,96%	10.800,03	212.516,0	90.509,1	57,4%	10.800,0
	5	201.907,2	88.006,6	56,41%	10.800,01	211.009,2	103.057,0	51,2%	10.800,0
	6	200.593,7	108.178,1	46,07%	10.800,15	174.856,0	109.804,3	37,2%	10.800,0
	7	137.693,7	91.471,7	33,57%	10.800,02	131.191,2	97.476,2	25,7%	10.800,0
	8	135.471,4	92.794,5	31,50%	10.800,06	134.206,1	99.211,7	26,1%	10.800,0
	9	138.443,8	86.425,3	37,57%	10.801,46	139.957,9	92.559,6	33,9%	10.800,0
	10	69.899,9	38.198,3	45,35%	10.800,05	71.501,6	41.743,1	41,6%	10.800,0
Média		167.508,9	90.364,6	44,84%	10.800,26	170.865,6	95.927,2	41,6%	10.800,0
T4P8_F6K3A3	1	-	-	-	-	184.823,8	118.601,6	35,8%	10.800,0
	2	-	-	-	-	187.638,5	121.083,7	35,5%	10.800,0
	3	-	-	-	-	170.685,3	85.156,9	50,1%	10.800,0
	4	-	-	-	-	175.410,6	76.924,4	56,1%	10.800,0
	5	-	-	-	-	197.898,7	90.810,3	54,1%	10.800,0
	6	-	-	-	-	164.805,9	10.8824,6	34,0%	10.800,0
	7	-	-	-	-	128.214,9	86.902,3	32,2%	10.800,0
	8	-	-	-	-	130.887,2	99.184,1	24,2%	10.800,0
	9	-	-	-	-	181.833,7	82.659,4	54,5%	10.800,0
	10	-	-	-	-	69.038,3	45.637,1	33,9%	10.800,0
Média		-	-	-	-	159.123,7	91.578,4	41,1%	10.800,0

* Resultados detalhados da variante com melhor desempenho reportado na Tabela 5.10

Tabela 5.13: Resultados das abordagens MSPPP e MICPPP para os grupos de instâncias T4P5_F6K2A2, T4P5_F6K3A3, T4P8_F6K2A2, T4P8_F6K3A3

Capítulo 6

Métodos de solução

Este capítulo descreve as propostas de desigualdades válidas e métodos de solução para o problema de otimização estudado. As abordagens aqui propostas são focadas na representação do problema na formulação integrada MICPPP visto que, de acordo com os resultados computacionais apresentados no Capítulo anterior, esta abordagem mostrou-se mais geral, flexível de ser adaptada e efetiva para tratar o problema de planejamento em diferentes ambientes de produção. As abordagens de solução apresentadas neste capítulo foram compiladas em um artigo científico submetido para publicação (MARTÍNEZ et al., 2017). A Seção 6.1 apresenta desigualdades válidas para a eliminação de soluções simétricas na formulação original MICPPP. A Seção 6.2 descreve um algoritmo *branch-and-cut* que explora as especificidades da formulação MICPPP para resolver o problema de otimização. Este método utiliza uma formulação relaxada do problema baseada na abordagem MICPPP, um procedimento de geração de cortes e um procedimento para encontrar soluções factíveis, de modo a resolver de forma exata o problema de otimização original. Finalmente, a Seção 6.3 apresenta uma heurística baseada em programação matemática para a resolução de instâncias maiores do problema em menores tempos computacionais.

6.1 Desigualdades válidas para a formulação MICPPP

Nesta seção são propostas desigualdades válidas específicas para a abordagem MICPPP. O primeiro conjunto de desigualdades está relacionado ao estado de preparação da linha em cada sub-período e à ordenação das trocas em cada período. O segundo e terceiro conjunto de desigualdades são propostos a fim de eliminar soluções simétricas geradas por múltiplas alternativas na configuração de transportadores.

As desigualdades (6.1) são definidas para fazer uma ordenação das trocas de padrões que acontecem em cada período. Como descrito e abordado na formulação clássica do GLSP em Fleischmann e Meyr (1997), o objetivo aqui é manter os sub-períodos em que não são executadas trocas de nenhum tipo, no final de cada período. Para este propósito, as restrições (6.1) são incluídas na formulação, onde S_t^f representa o primeiro sub-período de cada período de tempo t .

$$v_s \leq v_{s-1} \quad \forall t \in T : s \in S_t : s \geq S_t^f + 2 \quad (6.1)$$

Note que estas desigualdades ainda permitem que o tamanho do lote, *i.e.*, o tempo de produção de

cada configuração de processo, seja distribuído entre os sub-períodos com o mesmo estado de *setup*, sem alterações no valor da função objetivo dessas soluções. Um conjunto de desigualdades válidas para evitar soluções alternativas desse tipo também foram implementadas conforme propostas em [Fleischmann e Meyr \(1997\)](#), no entanto, os resultados nos testes preliminares não foram satisfatórios e, portanto, não foram reportados nesta tese.

As desigualdades (6.1) para a ordenação das trocas podem ser incluídas também na abordagem MSPPP da Seção 4.1. Experimentos computacionais foram realizados para analisar o efeito destas desigualdades no desempenho daquela abordagem, no entanto, os resultados demonstraram que não existe vantagem na inclusão delas e, portanto, estes resultados também não foram reportados nesta tese.

Os conjuntos de restrições (6.2) e (6.3) são propostas a fim de evitar soluções simétricas permitidas pela formulação original do MICPPP. O primeiro tipo de simetria está relacionado à designação de produtos para as faixas configuradas nos transportadores. Soluções simétricas deste tipo podem surgir uma vez que um mesmo subconjunto de produtos pode ser designado de diferentes formas às faixas dos transportadores, gerando a mesma combinação de moldes nas faces da máquina. Ou seja, diferentes valores para as variáveis y_{ipks} podem gerar o mesmo padrão de moldagem e configuração de processo, e, conseqüentemente, soluções simétricas para o problema, como ilustrado na Figura 6.1. Note que para os casos 1, 2 e 3, a combinação de moldes acoplados nas faces da máquina é a mesma, enquanto os valores das variáveis y_{ipks} são diferentes.

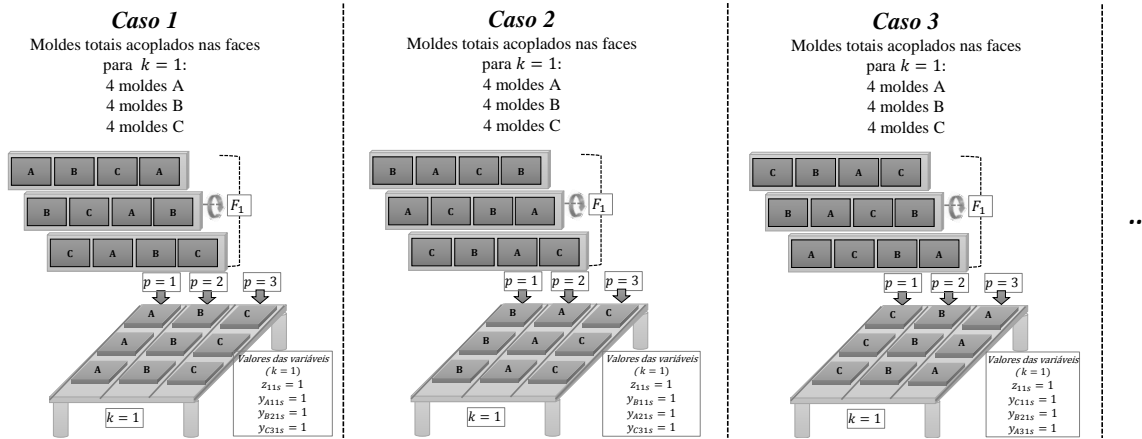


Figura 6.1: Soluções simétricas eliminadas pelas restrições (6.2)

As restrições (6.2) são propostas para evitar o tipo de simetria ilustrado nesta figura. Estas desigualdades assumem que os elementos do conjunto de produtos são ordenados de 1 até $|N|$, e os elementos do conjunto de faixas dos transportadores de 1 até $|P|$, de acordo com suas larguras, da menor para a maior.

$$\sum_{1 \leq i' < i} y_{i'(p-1)ks} \geq y_{ipks} \quad \forall s \in S; k \in K; p \in P : p > 1 \quad (6.2)$$

Similarmente ao tipo de simetria acima, a abordagem MICPPP permite também que uma mesma configuração de processo seja gerada a partir de diferentes valores das variáveis z_{kes} , as quais designam os tipos de arranjos configurados em cada transportador. Exemplos de soluções simétricas deste tipo são ilustradas na Figura 6.2. Embora o número de possíveis arranjos não seja grande na prática, as restrições (6.3) podem ter um efeito positivo nos limitantes inferiores obtidos pela abordagem integrada MICPPP.

Estas desigualdades assumem que todos os transportadores no conjunto K podem ser configurados para qualquer arranjo do conjunto E , sem exceção.

$$\sum_{1 \leq e' \leq e} z_{(k-1)e's} \geq z_{kes} \quad s \in S; k \in K; k > 1 \quad (6.3)$$

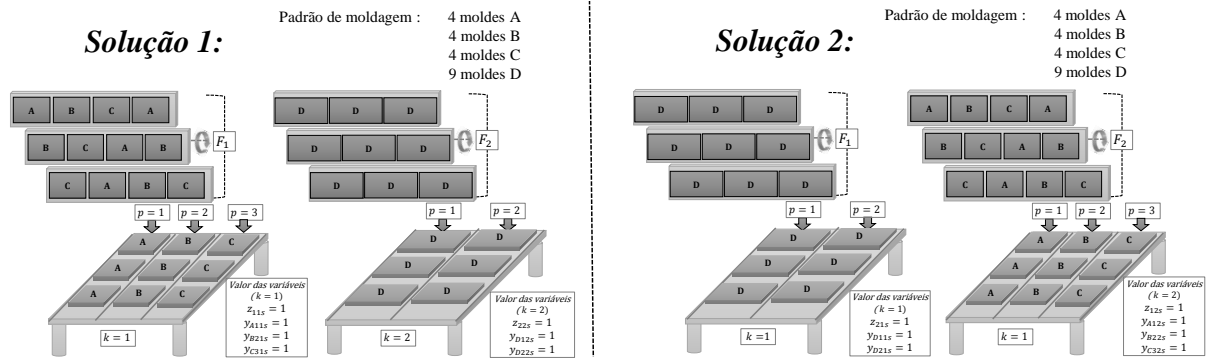


Figura 6.2: Soluções simétricas eliminadas pelas restrições (6.3)

Desta forma, o Modelo MICPPP é apresentado para diferentes variantes que incluem as desigualdades (6.1), (6.2), (6.3) e algumas combinações entre elas. A descrição destas variantes para o MICPPP e os resultados computacionais para cada uma destas são apresentados no Capítulo 7.

6.2 Algoritmo *Branch-and-cut* (B&C)

Como abordagem de solução exata alternativa à resolução do MICPPP usando o *solver* CPLEX, propõe-se um algoritmo *branch-and-cut*, o qual usa a estrutura do *branch-and-bound* do CPLEX e um conjunto de cortes baseados na abordagem *logic-based Benders decomposition* (LBB). O algoritmo B&C compreende três elementos principais descritos em detalhes nas Seções 6.2.1-6.2.3: formulação relaxada do problema, procedimento de geração de cortes e procedimento para encontrar soluções factíveis para o problema original.

O algoritmo proposto utiliza a árvore *branch-and-bound*, estratégias de ramificação e *callbacks* para problemas de otimização inteira mista do *solver* CPLEX, e é implementado como segue. Primeiramente, a relaxação linear da formulação relaxada apresentada na Seção 6.2.1 é resolvida. Se a solução da relaxação linear não é uma solução inteira factível, inicia a ramificação de variáveis na árvore de busca. Se uma solução inteira factível da formulação relaxada é encontrada, o procedimento de geração de cortes é chamado para detectar se tal solução é também uma solução inteira factível para o problema original. Se a solução inteira da formulação relaxada não é uma solução inteira factível para o problema original, um conjunto de cortes é adicionado ao programa, e o processo de busca continua. Uma vez que o procedimento de geração de cortes é realizado, o procedimento na Seção 6.2.3 é executado para encontrar soluções inteiras factíveis para o problema original. Caso a solução encontrada neste procedimento seja melhor que a solução incumbente, a primeira é fornecida como um limitante superior à árvore *branch-and-bound*.

6.2.1 Formulação relaxada

Para esta formulação, as restrições de atendimento da demanda (4.42) do MICPPP são relaxadas. Esta relaxação consiste em fazer a quantidade produzida de cada item igual à multiplicação do tempo de produção w_s , vezes a velocidade da máquina R , vezes uma aproximação do número de moldes para tal produto acoplado na máquina de moldagem em cada sub-período. Nesta relaxação, as restrições de atendimento da demanda são substituídas pelas restrições lineares (6.4)-(6.7), de modo que a estratégia de linearização e substituição de variáveis não é mais requerida. Note que soluções ótimas do problema relaxado são limitantes inferiores válidos para o problema original, os quais podem ser fortalecidos por meio da geração de cortes válidos na árvore *branch-and-bound*.

Seja $q_{is} \in \mathbf{R}^+$ a quantidade produzida do item i no sub-período s . Uma formulação relaxada do problema consiste em substituir as restrições (4.42) da abordagem MICPPP pelas restrições (6.4)-(6.7), como segue.

Função objetivo : (4.24)

Restrições relacionadas à geração de padrões de moldagem: (4.25)-(4.40)

Restrições relacionadas às decisões de sequenciamento : (4.43) - (4.48)

Restrições relacionadas às decisões de dimensionamento de lotes : (4.41), (4.49),

$$I_{i(t-1)}^+ + \sum_{s \in S_t} q_{is} + I_{it}^- = d_{it} + I_{i(t-1)}^- + I_{it}^+ \quad \forall t \in T; i \in N \quad (6.4)$$

$$q_{is} \leq w_s R M_j \quad \forall s \in S; i \in N; j : i \in A_j \quad (6.5)$$

$$q_{is} \leq Y_{is} B M_{is}^{II} \quad \forall t \in T; s \in S_t; i \in N; \quad (6.6)$$

$$q_{is} \geq \min_{k \in K} \{|F_k| H_k\} w_s R - B M_{is}^{II} (1 - Y_{is}) \quad \forall s \in S; i \in N \quad (6.7)$$

onde $B M_{is}^{II}$ é um limitante superior para q_{is} , definido como $B M_{is}^{II} = Q_t R M_j \quad \forall t \in T; s \in S_t; i \in N; j : i \in A_j$.

As restrições originais de atendimento da demanda (4.42) são equivalentes às restrições (6.4), sendo que $q_{is} = Y_{is} w_s R \sum_{f \in F} x_{jfs} \quad \forall s \in S; i \in N; j : i \in A_j$. No entanto, na formulação relaxada, q_{is} é definida como uma aproximação da quantidade original, limitada superiormente pelas desigualdades (6.5)-(6.6), e inferiormente pelas desigualdades (6.7).

Os limitantes impostos para as variáveis q_{is} são sempre válidos dado que, caso o produto i seja produzido em s (*i.e.*, $Y_{is} = 1$), a quantidade produzida é no máximo $w_s R M_j$, o que significa que o padrão de moldagem utilizado em s contém todos os moldes disponíveis para o produto $i : i \in A_j$. Este limitante é sempre válido, uma vez que as restrições (4.34) garantem que o número de moldes usados de qualquer tipo i é no máximo $M_j : i \in A_j$, para qualquer $s \in S$. Similarmente, se $Y_{is} = 1$, a quantidade de produto i produzida em s é maior ou igual ao tempo de produção em tal sub-período w_s , vezes a velocidade da máquina R , vezes o número mínimo de moldes de qualquer tipo acoplado na máquina de moldagem. Caso contrário, se $Y_{is} = 0$, então $q_{is} = 0$.

Para esta formulação relaxada é possível definir o número mínimo de moldes de qualquer tipo em um padrão de moldagem como igual a 1; no entanto, a análise das restrições (4.30) e (4.36) permite definir este número como $\min_{k \in K} \{|F_k| H_k\}$. Note que $Y_{is} = 1$ implica que o produto i é designado pelo menos

a uma faixa em algum dos transportadores, pelas restrições (4.30). Consequentemente, moldes para o produto i devem ser acoplados H_k vezes em cada uma das faces dedicadas ao transportador no qual o produto em questão é transportado (veja restrições (4.36)). Isto permite afirmar que o limitante inferior imposto em (6.7) é sempre válido para o problema original. Ao definir a expressão $\min_{k \in K} \{|F_k| H_k\}$ como o número mínimo de moldes de cada tipo em qualquer padrão de moldagem, os limitantes inferiores para o problema original obtidos pela resolução ótima do problema relaxado são significativamente mais fortes, em comparação com a qualidade dos limitantes quando esta estimativa do número de moldes é considerada igual a 1.

6.2.2 Procedimento de geração de cortes

Uma vez que a formulação relaxada apenas define limitantes válidos para a quantidade produzida de cada item q_{is} , as soluções encontradas podem não ser factíveis para a formulação não linear original do MICPPP, *i.e.*, $q_{is} \neq Y_{is} w_s R \sum_{f \in F} x_{jfs} \forall s \in S; i \in N; j : i \in A_j$. O procedimento de geração de cortes é executado toda vez que uma solução inteira factível da formulação relaxada é encontrada para verificar se os valores das variáveis q_{is} são válidos para a formulação original do problema, ou não. Caso os valores das variáveis q_{is} não sejam equivalentes ao problema original, os cortes (6.8) e (6.9) são adicionados à árvore, e o processo de ramificação continua.

$$\begin{aligned}
q_{is} \geq & \hat{Y}_{is} w_s R \sum_{f \in F} \hat{x}_{jfs} - BM_{is}^{II} \sum_{k \in K} \sum_{\substack{e \in E: \\ \hat{z}_{kes}=1}} (\hat{z}_{kes} - z_{kes}) - BM_{is}^{II} \sum_{k \in K} \sum_{e \in E: \hat{z}_{kes}=0} z_{kes} \\
& - BM_{is}^{II} \sum_{p \in P} \sum_{\substack{k \in K: \\ \hat{y}_{ipks}=1}} (\hat{y}_{ipks} - y_{ipks}) - BM_{is}^{II} \sum_{p \in P} \sum_{k \in K: \hat{y}_{ipks}=0} y_{ipks} \forall (i, s) \in \mathbf{S}
\end{aligned} \tag{6.8}$$

$$\begin{aligned}
q_{is} \leq & \hat{Y}_{is} w_s R \sum_{f \in F} \hat{x}_{jfs} + BM_{is}^{II} \sum_{k \in K} \sum_{\substack{e \in E: \\ \hat{z}_{kes}=1}} (\hat{z}_{kes} - z_{kes}) + BM_{is}^{II} \sum_{k \in K} \sum_{\substack{e \in E: \\ \hat{z}_{kes}=0}} z_{kes} \\
& + BM_{is}^{II} \sum_{p \in P} \sum_{\substack{k \in K: \\ \hat{y}_{ipks}=1}} (\hat{y}_{ipks} - y_{ipks}) + BM_{is}^{II} \sum_{p \in P} \sum_{\substack{k \in K: \\ \hat{y}_{ipks}=0}} y_{ipks} \forall (i, s) \in \mathbf{S}
\end{aligned} \tag{6.9}$$

onde \hat{Y}_{is} , \hat{x}_{jfs} , \hat{z}_{kes} e \hat{y}_{ipks} correspondem aos valores na solução inteira relaxada das variáveis Y_{is} , x_{jfs} , z_{kes} e $y_{ipks} \forall s \in S; i \in N; k \in K; p \in P; e \in E$, respectivamente, e \mathbf{S} é o conjunto de pares (i, s) para os quais \hat{q}_{is} não é válida para o problema original, *i.e.*, $q_{is} \neq Y_{is} w_s R \sum_{f \in F} x_{jfs} \forall s \in S; i \in N; j : i \in A_j$.

As desigualdades (6.8)-(6.9) são restrições baseadas nas técnicas de decomposição *Logic-based Benders*, propostas por Hooker e Ottosson (2003) e utilizadas para outras aplicações estudadas em Hooker (2007), Fazel-Zarandi e Beck (2009), Cao et al. (2010). Estas desigualdades determinam que, caso o estado de preparação em um sub-período s seja o mesmo que a solução inteira relaxada atual (*i.e.*, os valores das variáveis z_{kes} e y_{ipks} são iguais a \hat{z}_{kes} e \hat{y}_{ipks} , respectivamente), é imposto $q_{is} = \hat{Y}_{is} w_s R \sum_{f \in F} \hat{x}_{jfs}$ e consequentemente, a solução relaxada é também factível para o problema original. Caso contrário, q_{is}

é relaxada e sujeita somente às restrições (6.5)-(6.7).

6.2.3 Procedimento para encontrar soluções factíveis para o problema original

Este procedimento é incluído no B&C a fim de aproveitar as soluções inteiras factíveis da formulação relaxada, para construir soluções factíveis para o problema original. Esta rotina consiste em otimizar as decisões de dimensionamento, considerando a informação fornecida pelas soluções relaxadas em relação às configurações de processo geradas e sequenciamento dos mesmos. Desta forma, toda vez que uma solução inteira factível do problema relaxado é encontrada, o problema de otimização linear (6.10)-(6.13) é resolvido para redefinir os valores das variáveis w_s , q_{is} , I_{it}^+ , e I_{it}^- , de modo que a solução final seja factível para o problema original. O programa linear a ser resolvido compreende os seguintes parâmetros e variáveis.

Variáveis

- \tilde{w}_s tempo de produção no sub-período s
- \tilde{I}_{it}^+ unidades em estoque do produto i ao final do período t
- \tilde{I}_{it}^- unidades atrasadas do produto i ao final do período t

$$\text{Min} \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} h_i^+ \tilde{I}_{it}^+ + h_i^- \tilde{I}_{it}^- \quad (6.10)$$

$$\tilde{I}_{i(t-1)}^+ + \sum_{s \in S_t} \hat{Y}_{is} \tilde{w}_s R \sum_{f \in F} \hat{x}_{jfs} + \tilde{I}_{it}^- = d_{it} + \tilde{I}_{i(t-1)}^- + \tilde{I}_{it}^+ \quad \forall t \in T; i \in N; j : i \in A_j \quad (6.11)$$

$$\sum_{s \in S_t} \tilde{w}_s \leq Q_t - \hat{S}T_t \quad \forall t \in T \quad (6.12)$$

$$\tilde{w}_s, \tilde{I}_{it}^+, \tilde{I}_{it}^- \in \mathbf{R}^+ \quad \forall t \in T; s \in S_t; i \in N \quad (6.13)$$

onde \hat{Y}_{is} e \hat{x}_{jfs} correspondem aos valores das variáveis Y_{is} e x_{jfs} da solução atual na formulação relaxada, e $\hat{S}T_t$ corresponde ao tempo total de *setup* no período t da solução, definido como segue.

$$\hat{S}T_t = \sum_{s \in S_t} st^I \hat{v}_s + \sum_{s \in S_t} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} st_j^{II} \hat{u}_{jks} + \sum_{s \in S_t} \sum_{k \in K} \sum_{e, e' \in E} st_{ee'}^{III} \hat{z}_{kes}$$

Desta forma, uma solução factível para o problema original é obtida substituindo os valores das variáveis \hat{w}_s , \hat{I}_{it}^+ e \hat{I}_{it}^- da solução inteira relaxada, pelos valores da solução ótima do problema linear (6.10)-(6.13).

6.3 Heurística baseada em programação matemática

Esta seção descreve a proposta de uma heurística baseada em programação matemática, que tem como objetivo encontrar soluções competitivas em curtos tempos computacionais para o problema de otimização estudado. Como descrito em Algoritmo 1, este procedimento consiste principalmente em três fases: (i) determinar as configurações de processos factíveis para o planejamento; (ii) encontrar um plano de

produção factível para o problema usando as configurações de processo resultantes da fase (i); e (iii) aplicar um procedimento de melhoria para a solução encontrada na fase (ii).

Algoritmo 1 MIP heurística de 3-fases

- 1: **Fase 1:**
 - 2: Criar um conjunto, inicialmente vazio, de possíveis configurações de processo $\xi \leftarrow \emptyset$
 - 3: Executar o procedimento descrito na Seção 6.3.1 para gerar configurações de processo factíveis para a instância do problema considerada;
 - 4: Anexar à lista ξ as configurações de processo geradas nesta fase, assim como os parâmetros relacionados a cada uma delas $\epsilon \in \xi$;
 - 5: **Fase 2:** Considerar a lista ξ e os parâmetros indexados a este conjunto como dados de entrada para o modelo de programação inteira (B.2)-(B.12). Resolver o modelo usando CPLEX.
 - 6: **Fase 3:** Transformar a solução obtida no passo anterior em uma solução factível do espaço de solução da formulação não linear MICPPP.
 - 7: Executar o procedimento de melhoria descrito na Seção 6.3.3
 - 8: **retorna** Uma solução factível para a instância do problema original.
-

6.3.1 Fase 1

Nesta primeira fase, um conjunto de configurações de processos são gerados para cada instância do problema. O objetivo desta fase não é apenas gerar um conjunto de configurações factíveis para serem usadas na Fase 2, mas também gerar configurações com chance de serem utilizadas em soluções de boa qualidade para a instância considerada. Para isto, os algoritmos nesta fase usam informações de demanda e parâmetros relacionados às decisões de sequenciamento, além das informações tecnológicas requeridas para determinar configurações de processo factíveis.

Duas heurísticas *relax-and-fix* (R&F) baseadas na formulação MICPPP do problema original são executadas nesta fase, as quais usam o algoritmo B&C e o *solver* CPLEX para resolver os sub-problemas resultantes das partições de variáveis. As heurísticas do tipo R&F tem sido amplamente usadas na resolução de problemas de planejamento da produção, particularmente nos problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes (WOLSEY, 1998). Estas heurísticas visam encontrar uma solução factível para o problema de otimização inteira, por meio da sua decomposição em sub-problemas inteiros de menor tamanho. Este procedimento é realizado dividindo o conjunto de variáveis inteiras do problema em três partições: um subconjunto de variáveis fixas, um subconjunto de variáveis inteiras a serem otimizadas e um subconjunto de variáveis cuja integralidade é relaxada. Em cada iteração, as partições são definidas de acordo com uma estratégia particular e o sub-problema resultante é resolvido, de modo que uma solução factível do problema original seja encontrada ao final da última iteração.

A primeira estratégia R&F consiste em definir uma partição para as variáveis inteiras de acordo com as principais decisões do problema. Primeiramente, apenas as variáveis que determinam a configuração dos transportadores são consideradas como inteiras. Na segunda iteração, o conjunto de variáveis que determinam os produtos a serem produzidos são consideradas como inteiras. Na sequência, as variáveis relacionadas ao estado de preparação da máquina de moldagem são consideradas inteiras. E, finalmente, a integralidade das variáveis relacionadas às operações de *setup* é retomada. Algumas sobreposições nestas partições de variáveis são permitidas no algoritmo, de modo que os subproblemas sejam factíveis. Já a segunda estratégia R&F define partições das variáveis inteiras de acordo com a estrutura de tempo

da formulação MICPPP, de modo que os sub-problemas são criados para cada sub-período $s \in S$. As heurísticas R&F usadas nesta fase são descritas com mais detalhes nos Algoritmos 2 e 3 do Apêndice B.

O procedimento nesta primeira fase consiste em executar a primeira estratégia R&F uma vez, identificar as configurações de processo usadas na solução encontrada e anexá-las à lista de possíveis configurações ξ . Em seguida, um conjunto de restrições é incluído na formulação usada pela segunda estratégia R&F descrita no Algoritmo 3, a fim de evitar que a solução obtida por esta heurística use as configurações de processo já encontradas pela heurística R&F anterior. Em sequência, o Algoritmo 3 é executado e as configurações de processo usadas na solução obtida são também anexadas à lista ξ . Uma descrição mais ampla do procedimento executado nesta fase, as heurísticas usadas nesta fase e as restrições adicionadas encontra-se no Apêndice B.

6.3.2 Fase 2

Um modelo de dimensionamento e sequenciamento de lotes é resolvido nesta fase. Esta formulação usa as configurações de processo geradas na Fase 1 como parâmetros de entrada, além das informações de demanda e demais informações da instância do problema original. As decisões principais desta formulação compreendem a seleção das configurações de processo a serem utilizadas (dentre aquelas que fazem parte da lista ξ), o tempo de produção de cada uma delas e a sequência em que estas são programadas ao longo do horizonte de planejamento. Embora o modelo resolvido nesta fase compreenda decisões integradas de dimensionamento e sequenciamento, o qual representa um problema *NP-hard* em si (BITRAN; YANASSE, 1982), os resultados computacionais nesta pesquisa mostram que o *solver* CPLEX resolve de forma eficaz os subproblemas desta fase. A formulação matemática implementada nesta fase é apresentada na Seção B.2 do Apêndice B.

6.3.3 Fase 3

Nesta Fase, a solução obtida pelo modelo da fase anterior é tratada para se converter numa solução factível do espaço de solução da formulação não linear MICPPP, de modo que um procedimento de melhoria baseada nesta formulação seja aplicado. O procedimento implementado consiste numa heurística do *fix-and-optimize* (F&O), a qual utiliza a solução obtida na Fase 2 como solução inicial. Similarmente às heurísticas R&F, na heurística F&O o problema é dividido em várias partições, de modo que em cada iteração um subconjunto de variáveis é re-otimizado, enquanto o subconjunto remanescente se mantém fixo. A estratégia de partição implementada nesta heurística é baseada na estrutura de tempo do modelo, período a período.

Uma vez que este procedimento é baseado na formulação original do MICPPP, que inclui a geração implícita de configurações de processo, configurações diferentes daquelas incluídas na lista ξ podem ser geradas e, conseqüentemente, uma melhor solução para o problema original pode ser encontrada. O Algoritmo 4 na Seção B.3 do Apêndice B descreve isso.

Este capítulo apresentou propostas de desigualdades válidas para a formulação MICPPP e métodos de solução para o problema em estudo. Três conjuntos de desigualdades válidas para a formulação original foram apresentadas na Seção 6.1, as quais incluem restrições de eliminação de simetrias. Um algoritmo *branch-and-cut* baseado nas especificidades da formulação MICPPP foi apresentado na Seção 6.2

para resolver o problema. Finalmente, a proposta de uma heurística de 3 fases baseada em programação matemática foi apresentada na Seção 6.3. O próximo capítulo apresenta os resultados dos experimentos computacionais realizados com essas propostas de métodos de solução.

Capítulo 7

Experimentos computacionais com os métodos de solução

Este capítulo apresenta os experimentos computacionais realizados com os métodos de solução propostos no capítulo anterior. Os resultados obtidos pela resolução da linearização do MICPPP usando o CPLEX do Capítulo 5 são comparados com os resultados obtidos pelo algoritmo B&C proposto no capítulo anterior, para diferentes variantes do problema que incluem os três conjuntos de desigualdades válidas para a abordagem MICPPP: desigualdades (6.1), para a ordenação das trocas dentro de cada período; desigualdades (6.2), para eliminação de soluções simétricas relacionadas às variáveis y_{ipks} ; e, desigualdades (6.3), para eliminação de soluções simétricas relacionadas às variáveis z_{kes} . Estes resultados são apresentados na Seção 7.1. Já os resultados da heurística de 3 fases são comparados com os resultados do método exato de melhor desempenho, e são apresentados na Seção 7.2. Os conjuntos de instâncias apresentadas nestes capítulo, a linguagem de implementação e configuração de máquina utilizados correspondem aos mesmos descritos no Capítulo 5.

7.1 Resultados dos métodos de solução exatos

Esta seção apresenta os resultados das abordagens de solução exatas e desigualdades válidas para o MICPPP, para os conjuntos de instâncias menores, médias e grandes. Como mencionado no capítulo anterior e no Capítulo 5 de resultados dos modelos, a característica principal dos conjuntos de instâncias de menor tamanho considera que todos os produtos têm o mesmo tamanho e, portanto, existe um único arranjo possível para os transportadores. Assim, estes conjuntos de instâncias menores (grupos T2P5_F6K2A1, T2P8_F6K2A1 e T2P8_F6K3A1) permitem a fixação das variáveis z_{kes} *a priori*, visto que o arranjo configurado em cada transportador é conhecido de antemão e se mantém constante durante todo o horizonte de planejamento. Os resultados computacionais para estes conjuntos de instâncias não incluem as variantes da formulação com as desigualdades (6.3), uma vez que soluções simétricas são naturalmente eliminadas ao fixar as variáveis z_{kes} .

A Tabela 7.1 sumariza os experimentos computacionais realizados para os grupos de instâncias menores. As duas abordagens de solução, *i.e.*, a resolução da abordagem MICPPP usando o *solver* CPLEX

e o algoritmo B&C, são testadas para 5 variantes diferentes: **A** corresponde à formulação original para o MICPPP; **B** é a abordagem MICPPP incluindo as desigualdades (6.1); **C** é a abordagem MICPPP incluindo as restrições de eliminação de simetria (6.2); **D** é a abordagem MICPPP incluindo as desigualdades (6.1) e (6.2); e, por fim, o Caso **E** que corresponde à abordagem MICPPP incluindo as desigualdades (6.1), (6.2) e prioridade na ramificação das variáveis v_s . A configuração na prioridade de ramificação representado no caso **E** foi determinada com base em experimentos preliminares. Estes experimentos foram executados para diferentes alternativas na priorização de ramificação variáveis, mas a única estratégia que apresentou vantagens significativas no desempenho dos métodos foi dar maior prioridade à ramificação das variáveis v_s , e assim apenas esta configuração é reportada nos resultados a seguir.

Métodos de solução	Variantes	Grupos (# inst./grupo)	Total execuções
	(A) MIPPP		
Linearização	(B) MICPPP+Des. (6.1)	T2P5_F6K2A1 (10)	
resolvida via CPLEX	(C) MICPPP+Des. (6.2)	T2P8_F6K2A1 (10)	300
B&C	(D) MICPPP+Des. (6.1)& (6.2)	T2P8_F6K3A1 (10)	
	(E) MICPPP+Des. (6.1)& (6.2)+ prior. ram.		

Tabela 7.1: Experimentos computacionais dos métodos exatos para os conjuntos de instâncias menores

A Tabela 7.2 apresenta a média dos resultados para estes conjuntos de instâncias. Nesta tabela é apresentanda a média dos limitantes superiores, limitantes inferiores, *gap* de otimalidade, tempo de execução e informações adicionais sobre o número de vezes que a tolerância de otimalidade foi atingida, o número de vezes em que o limite de tempo foi atingido e o número de vezes que a execução foi interrompida por memória insuficiente. Por fim, a coluna que apresenta o conjunto de cortes agregados indica o número médio de vezes que o procedimento de geração de cortes foi executado durante o algoritmo B&C.

Grupo	Var.	MICPPPP - CPLEX					MICPPPP - B&C					
		Lim. sup.*	Lim. inf.*	Gap*	Tempo*	Inf. adic. °	Lim. sup.*	Lim. inf.*	Gap*	Tempo*	Inf. adic. °	# cortes *
T2P5_F6K2A1	A	17.336,0	14.846,1	15,11%	10.335,6	1/9/0	17.336,0	14.067,7	19,06%	5.600,19	0/0/10	-
	B	17.336,0	14.848,7	15,09%	10.252,4	1/9/0	17.336,0	14.605,6	16,30%	5.576,84	0/0/10	-
	C	17.336,0	14.961,1	14,41%	9.915,6	1/9/0	17.336,0	17.335,3	0,00%	196,40	10/0/0	46,6
	D	17.336,0	14.907,4	14,73%	9.837,7	1/9/0	17.336,0	17.335,6	0,00%	60,87	10/0/0	41,1
	E	17.336,0	14.942,2	14,53%	10.505,3	1/9/0	17.336,0	17.335,5	0,00%	49,27	10/0/0	43,5
T2P8_F6K2A1	A	26.749,4	19.009,6	28,91%	10.800,0	0/10/0	26.762,2	22.997,1	14,06%	10.549,8	0/8/2	50,9
	B	26.861,7	21.409,7	20,33%	10.800,0	0/10/0	26.689,0	24.074,0	9,76%	10.072,5	0/6/4	58,2
	C	27.162,1	18.223,0	32,89%	10.800,0	0/10/0	26.668,2	22.255,1	16,53%	10.800,0	0/10/0	35,0
	D	26.825,4	19.214,5	28,29%	10.800,0	0/10/0	26.668,2	24.539,6	7,94%	10.800,0	0/10/0	42,9
	E	26.776,9	20.598,9	23,08%	10.800,0	0/10/0	26.668,2	25.770,5	3,33%	9.824,2	4/6/0	35,1
T2P8_F6K3A1	A	23.555,0	22.429,0	4,77%	10.800,0	0/10/0	23.555,0	20.670,3	12,24%	4.536,0	0/0/10	-
	B	23.555,0	23.554,1	0,00%	6.713,6	10/0/0	23.555,0	20.762,4	11,85%	4.945,2	0/0/10	-
	C	23.555,0	21.835,7	7,27%	10.403,7	1/9/0	23.555,0	23.552,9	0,01%	3.812,4	10/0/0	102,7
	D	23.555,0	23.412,3	0,60%	7.151,0	8/2/0	23.555,0	23.553,8	0,01%	1.435,2	10/0/0	101,1
	E	23.555,0	23.379,1	0,74%	5.746,7	9/1/0	23.555,0	23.554,1	0,00%	1.129,9	10/0/0	100,9

A: MICPPPP; B: MICPP+Des. (6.1); C: MICPPPP+Des. (6.2); D: MICPP+Des. (6.1) & (6.2); E: MICPP+Des. (6.1) & (6.2) + prioridade na ramificação das variáveis v_8

* Média

° (1)/(2)/(3): (1) # instâncias em que tolerância de otimalidade foi atingida; (2) # instâncias em que o tempo limite de execução foi atingido; (3) # instâncias em que houve interrupção por memória insuficiente

Tabela 7.2: Média dos resultados dos métodos de solução exatos para os grupos de instâncias menores

Grupos T2P5_F6K2A1, T2P8_F6K2A1 e T2P8_F6K3A1

Os resultados para os conjuntos de instâncias menores mostram que o desempenho do algoritmo B&C melhora significativamente pelas restrições de eliminação de simetria e, além disso, reduções adicionais no tempo médio de execução são atingidas quando é dada uma maior prioridade de ramificação às variáveis de *Setup I*, v_s . Por outro lado, o caso de melhor desempenho do modelo linearizado resolvido via CPLEX é diferente para cada grupo de instâncias, sendo que o melhor caso para dois dos três grupos é obtido quando apenas as restrições de eliminação de simetria do primeiro tipo (6.1) são incluídas.

Os resultados para o algoritmo B&C mostram que o melhor desempenho é atingido na variante **E**, para todos os grupos da Tabela 7.2. No entanto, o seu desempenho para as variantes **A** e **B** é ineficiente e incorre em problemas de consumo de memória, devido ao grande número de cortes gerados e adicionados ao programa para soluções simétricas. Para os casos em que a execução do programa é interrompida por consumo de memória, as informações sobre os limitantes, *gap* e tempo de execução reportados correspondem às informações imediatamente antes da interrupção.

O melhor desempenho de cada abordagem, indicada em negrito na Tabela 7.2, mostra claramente que o algoritmo B&C resolve de forma mais eficiente os conjuntos de instâncias menores, em comparação com o *solver* CPLEX. Para o grupo T2P5_F6K2A1, o algoritmo B&C resolve de forma ótima todas as instâncias em um tempo médio de aproximadamente 50 segundos, enquanto que resolvendo o MICPPP via CPLEX é possível provar a otimalidade de apenas uma das instâncias até um tempo limite de execução de 3 horas. Note que este grupo apresenta as maiores diferenças no desempenho das abordagens, sendo que o B&C resolve todas as instâncias de forma ótima em poucos segundos, enquanto o CPLEX registra um *gap* médio de 14,4%. Para o grupo T2P8_F6K2A1, além de obter melhores limitantes inferiores, o algoritmo B&C encontra melhores soluções, em média. Já para o último grupo nesta categoria, as duas abordagens resolvem de forma ótima todas as instâncias, porém o B&C é mais eficiente dado que o tempo médio de resolução é aproximadamente 6 vezes menor que o tempo médio do CPLEX.

A Tabela 7.3 sumariza os experimentos computacionais realizados para os grupos de instâncias de tamanho médio e grande. Como nos experimentos anteriores, a solução do modelo via CPLEX e o algoritmo B&C proposto são testados para diferentes variantes da abordagem MICPPP. No total, foram testadas 7 variantes, as quais incluem experimentos para as restrições de eliminação de simetria (6.3). Soluções simétricas desse tipo podem aparecer, dado que para estas instâncias, considera-se que cada transportador pode ser configurado de acordo com um ou mais possíveis arranjos (*i.e.*, $|E| \geq 1$).

Métodos de solução	Variantes	Grupos (# inst./grupo)	Total execuções
Linearização resolvida via CPLEX	(A) MICPPP	T2P5_F6K2A2 (10)	980
	(B) MICPPP+Des. (6.1)	T2P8_F6K2A2 (10)	
	(C) MICPPP+Des. (6.2)	T2P8_F6K3A3 (10)	
	(D) MICPPP+Des. (6.3)	T4P5_F6K2A2 (10)	
	(E) MICPPP+Des. (6.2)&(6.3)	T4M5P5_K3A3 (10)	
B&C	(F) MICPPP+Des. (6.1),(6.2)&(6.3)	T4P8_F6K2A2 (10)	980
	(G) MICPPP+Des. (6.1),(6.2)&(6.3)+ prior. ram.	T4P8_F6K3A3 (10)	

Tabela 7.3: Experimentos computacionais dos métodos exatos para os conjuntos de instâncias médias e grandes

A Tabela 7.4 apresenta a média dos resultados para os conjuntos de instâncias de tamanho médio, T2P5_F6K2A2, T2P8_F6K2A2 e T2P8_F6K3A3. Assim como os resultados anteriores apresentados na Tabela 7.3, estes experimentos mostram que o desempenho das abordagens de solução pode ser signifi-

cativamente melhorado ao incluir as restrições de eliminação de simetria na formulação do problema. O caso de melhor desempenho para as duas abordagens é o da variante **G**, a qual inclui todas as restrições de eliminação de simetria propostas e maior prioridade na ramificação das variáveis v_s . Assim como nos experimentos para instâncias menores, nos casos em que as restrições de eliminação de simetria não são consideradas, o algoritmo B&C envolve um grande consumo de memória e desempenho ineficiente comparado com o CPLEX. Analisando os resultados de cada variante de forma independente, pode-se concluir que as restrições de eliminação de simetria relacionadas às variáveis y_{ipks} têm um impacto mais significativo na melhoria do desempenho das abordagens de solução. Isto era esperado, uma vez que existe um maior número de soluções simétricas associadas à designação de produtos aos transportadores, representadas pelas variáveis y_{ipks} .

Observe que as diferenças entre as abordagens de solução para estes grupos apresentam-se principalmente nos limitantes inferiores e tempos de execução. O algoritmo B&C consegue resolver de forma ótima todas as instâncias dos grupos T2P5_F6K2A2, T2M8P8_K2A e 7 das 10 instâncias do grupo T2P8_F6K3A3. Entretanto, o CPLEX resolve de forma ótima todas as instâncias do grupo T2P8_F6K2A2 e 3 das instâncias do grupo T2P8_F6K3A3, dentro de um tempo limite de 3 horas. Para os grupos T2P5_F6K2A2 e T2P8_F6K2A2, o algoritmo B&C é muito mais eficiente que o CPLEX, uma vez que soluções ótimas são encontradas para todas as instâncias em 47,3 e 54 segundos em média, respectivamente.

Grupo	Var.	MICPPP - CPLEX					MICPPP - B&C					
		Lim. sup.*	Lim. inf.*	Gap*	Tempo*	Inf. adic. °	Lim. sup.*	Lim. inf.*	Gap*	Tempo*	Inf. adic. °	# cortes*
T2P5_F6K2A2	A	22.271,1	18.658,9	16,23%	10.800,0	0/10/0	22.271,1	17.730,9	20,38%	9.317,69	0/5/5	226,4
	B	22.271,1	19.290,7	13,39%	10.800,0	0/10/0	22.271,1	17.637,0	20,79%	10.612,70	0/10/0	204,8
	C	22.271,1	20.027,2	10,06%	10.526,7	0/9/1	22.271,1	22.269,8	0,01%	186,04	10/0/0	60,0
	D	22.271,1	18.713,8	15,94%	10.800,0	0/10/0	22.271,1	17.637,0	20,77%	10.800,05	0/10/0	229,2
	E	22.271,1	19.750,8	11,30%	10.800,0	0/10/0	22.271,1	22.269,9	0,01%	157,70	10/0/0	62,2
	F	22.271,1	19.828,8	10,97%	10.800,1	0/10/0	22.271,1	22.270,5	0,00%	56,13	10/0/0	55,4
	G	22.271,1	20.078,0	9,83%	10.800,0	0/10/0	22.271,1	22.270,2	0,00%	47,32	10/0/10	54,7
T2P8_F6K2A2	A	28.263,4	27.567,2	2,45%	96.45,0	3/7/0	28.263,4	25.909,3	8,29%	8.559,2	0/6/4	98,0
	B	28.263,4	27.509,2	2,65%	10.800,0	0/10/0	28.263,4	27.116,4	4,05%	9.350,0	0/3/7	81,0
	C	28.263,4	27.761,1	1,76%	9.161,0	3/7/0	28.263,4	28.262,4	0,00%	543,8	10/0/0	49,8
	D	28.263,4	28.261,6	0,01%	6.161,5	10/0/0	28.263,4	25.733,3	8,94%	9052,4	0/5/5	84,8
	E	28.263,4	27.970,0	1,03%	8.704,8	0/5/5	28.263,4	28.262,7	0,00%	481,0	10/0/0	55,1
	F	28.263,4	28.262,5	0,00%	4.296,2	10/0/0	28.263,4	28.262,5	0,00%	133,3	10/0/0	48,4
	G	28.263,4	28.263,0	0,00%	1.717,9	10/0/10	28.263,4	28.263,3	0,00%	54,0	10/0/0	38,7
T2P8_F6K3A3	A	33.700,4	29.555,4	12,29%	10.800,0	0/10/0	33.700,4	27.559,1	18,22%	10.800,0	0/10/0	754,7
	B	33.700,4	31.954,5	5,13%	10.546,9	2/8/0	33.700,4	27.559,1	18,22%	8.888,8	0/6/4	624,5
	C	33.700,4	29.121,0	13,61%	10.800,0	0/10/0	33.700,4	30.308,1	10,09%	10.800,0	0/10/10	207,3
	D	33.700,4	30.201,1	10,38%	10.800,0	0/10/10	33.700,4	27.559,1	18,22%	10.655,4	0/9/1	837,1
	E	33.700,4	30.019,8	10,92%	10.800,0	0/10/0	33.700,4	31.153,5	7,55%	10.342,4	0/10/0	209,6
	F	33.700,4	31.574,3	6,31%	10.558,4	0/9/1	33.700,4	33.170,5	1,55%	9.033,2	5/5/0	201,7
	G	33.700,4	32.729,7	2,88%	10.287,9	3/7/0	33.700,4	33.380,4	0,95%	8.756,4	7/3/0	196,5

A: MIPPP; B: MICPPP+Des. (6.1); C: MICPPP+Des. (6.2); D: MICPPP+Des. (6.3); E: MICPPP+Des. (6.2) & (6.3); F: MICPPP+Des. (6.1), (6.2) & (6.3); G: MICPPP+Des. (6.1), (6.2) & (6.3) + prioridade na ramificação de variáveis v_s

* Média

° (1)/(2)/(3): (1) # instâncias em que tolerância de otimalidade foi atingida; (2) # instâncias em que o tempo limite de execução foi atingido; (3) # instâncias em que houve interrupção por memória insuficiente

Tabela 7.4: Média dos resultados dos métodos de solução exatos para os grupos de instâncias de tamanho médio

Grupos T2P5_F6K2A2, T2P8_F6K2A2 e T2P8_F6K3A3

A Tabela 7.5 apresenta a média dos resultados obtidos para os quatro grupos de instâncias de maior tamanho. Assim como nos resultados anteriores, o melhor desempenho é obtido pela variante **G**, que consiste em incluir todas as desigualdades válidas e restrições de eliminação de simetria. Como esperado, estes conjuntos de instâncias tornam-se mais difíceis de resolver devido ao aumento no tamanho do problema. Embora encontrar soluções ótimas e bons limitantes para estes conjuntos de instâncias é desafiante para as duas abordagens, pode-se afirmar que o desempenho do B&C é superior ao do *solver* CPLEX, uma vez que o valor médio dos limitantes superiores, inferiores, e *gaps* de otimalidade são melhores nos resultados do algoritmo exato proposto.

De acordo com os resultados da Tabela 7.5, o algoritmo B&C encontra melhores limitantes inferiores para as instâncias do problema, em comparação com os limitantes obtidos pelo CPLEX. Note que para todos os resultados reportados anteriormente e para os resultados das instâncias de maior tamanho apresentados em média na Tabela 7.5, os limitantes inferiores são significativamente melhores no B&C, exceto nas instâncias 3 e 5 do grupo T4P8_F6K2A2 e na instância 2 do grupo T4P8_F6K3A3. Nestes casos os limitantes do B&C são, no máximo, 0,6% piores que os limitantes inferiores obtidos pelo CPLEX. Para os outros casos, os limitantes inferiores obtidos pelo B&C são sempre melhores, sendo que as diferenças em comparação com o CPLEX variam entre aproximadamente 3% (Inst. 4, grupo T4M5P5_K3A3) e 50% (Inst. 1, grupo T4P5_F6K2A2). Os resultados detalhados para a variante com melhor desempenho de cada algoritmo são apresentados em detalhes na Tabela A.3 no Apêndice A.

Estes resultados permitem afirmar também que o algoritmo B&C proposto fornece melhores soluções para a maioria das instâncias nestes grupos. Note que os limitantes superiores obtidos pelo B&C são melhores que as soluções do CPLEX para os quatro grupos, principalmente no Grupo T4P8_F6K2A2, em que as soluções obtidas pelo B&C são em média 3,87% melhores que as soluções usando o CPLEX. Estas diferenças nos limitantes superiores e inferiores entre as duas abordagens fazem com que os *gaps* médios das soluções do B&C sejam sempre menores que os *gaps* médios do CPLEX para todas as instâncias.

Grupo	Var.	MICPPP - CPLEX					MICPPP - B&C					
		Lim. sup.*	Lim. inf.*	Gap*	Tempo*	Inf. adic. °	Lim. sup.*	Lim. inf.*	Gap*	Tempo*	Inf. adic. °	# cortes*
T4P5_F6K2A2	A	103.855,0	79998,74	25,42%	10.800,1	0/10/0	103.545,6	80.922,3	23,60%	8.081,7	0/3/7	200,7
	B	107.418,6	79.664,20	27,10%	10.800,1	0/10/0	103.184,9	85.700,4	19,16%	9.487,8	0/5/5	274,0
	C	104.236,3	79.099,31	26,61%	10.800,0	0/10/0	102.293,7	81.375,5	22,15%	10.398,9	0/8/2	81,9
	D	103.886,5	79.275,91	26,26%	10.800,0	0/10/0	102.875,5	80.070,2	24,26%	8.637,7	0/4/6	256,8
	E	103.849,6	80.049,29	25,38%	10.800,0	0/10/0	102.914,2	84.272,6	20,13%	9.402,3	0/5/5	86,6
	F	105.466,1	81.673,45	24,82%	10.800,0	0/10/0	102.070,8	89.743,6	13,56%	8.319,0	4/5/1	75,0
	G	103.342,8	82.637,84	22,46%	10.800,0	0/10/0	101.925,0	93.042,4	10,12%	8.086,1	4/6/0	89,8
T4M5P5_K3A3	A	100.367,4	62.226,68	37,97%	10.800,0	0/10/0	96.507,9	67.825,7	30,25%	10.194,7	0/9/1	480,4
	B	102.263,3	66.265,16	34,78%	10.453,8	0/10/0	98.006,6	70.004,1	28,76%	10.511,3	0/9/1	531,6
	C	100.995,7	63.472,66	37,26%	10.800,1	0/10/0	97.517,0	68.077,8	30,62%	9.735,2	1/7/2	196,4
	D	98.570,4	67.483,94	32,06%	10.800,0	0/10/0	97.105,1	69.503,0	29,08%	10.557,0	0/8/2	488,6
	E	99.096,0	68.107,97	31,41%	10.800,0	0/10/0	95.936,4	70.765,2	26,56%	10.117,0	1/9/0	177,7
	F	100.058,4	70.345,85	29,66%	10.437,2	1/9/0	97.428,1	74.300,0	23,81%	9.295,0	2/8/0	214,6
	G	96.675,4	69.830,49	28,09%	10.105,4	1/9/0	95.581,9	76.373,8	20,09%	9.135,5	2/8/0	229,3
T4P8_F6K2A2	A	170.865,6	95.927,2	41,55%	10.800,0	0/10/0	108.140,8	108.140,8	31,87%	9.931,9	0/7/3	173,0
	B	170.659,6	103.338,8	37,46%	10.800,1	0/10/0	163078,3	113.111,8	28,85%	10.363,4	0/8/2	180,1
	C	163.171,3	102.799,4	35,87%	10.800,0	0/10/0	158201,1	108.418,2	30,54%	10.764,6	0/9/1	73,6
	D	195.466,2	101.161,7	43,71%	10.800,0	0/10/0	159140,2	111.421,5	28,60%	10.800,0	0/10/0	135,9
	E	167.987,4	102.452,1	36,91%	10.800,0	0/10/0	160323,5	110.088,5	29,86%	10.800,0	0/10/0	58,3
	F	169.917,1	108.899,8	34,67%	10.800,0	0/10/0	164899,8	113.184,9	29,35%	10.800,0	0/10/0	68,2
	G	164.606,4	107.390,3	33,14%	10.800,0	0/10/0	158.235,7	114.611,8	25,48%	10.800,0	0/10/0	67,8
T4P8_F6K3A3	A	159.123,7	91.578,4	41,05%	10.800,0	0/10/0	160.077,5	99.292,0	35,15%	10.388,6	0/8/2	271,6
	B	162.639,4	95.926,8	39,81%	10.800,2	0/10/0	154.487,9	100.214,1	33,14%	10.294,2	0/9/1	300,3
	C	155.274,0	91.604,5	40,55%	10.800,1	0/10/0	152.467,8	97.570,1	35,14%	10.800,1	0/10/0	126,1
	D	156.920,4	96.728,5	37,43%	10.800,0	0/10/0	151.435,0	102.380,9	31,34%	10.800,0	0/10/0	305,6
	E	153.085,6	95.422,2	36,94%	10.800,0	0/10/0	152.870,3	1020.71,2	32,15%	10.800,0	0/10/0	140,4
	F	158.475,3	99.862,2	36,18%	10.800,0	0/10/0	154.929,2	103.509,7	31,81%	10.800,0	0/10/0	144,0
	G	155.393,2	98.040,6	36,1%	10.800,0	0/10/0	152.469,5	107.037,2	28,8%	10.800,1	0/10/0	164,8

A: MICPPP ; B: MICPPP+Des. (6.1); C: MICPPP+Des. (6.2); D: MICPPP+Des. (6.3); E: MICPPP+Des. (6.2) & (6.3); F: MICPPP+Des. (6.1), (6.2) & (6.3); G: MICPPP+Des. (6.1), (6.2) & (6.3) + prioridade na ramificação de variáveis v_s

* Média

o (1)/(2)/(3): (1) # instâncias em que tolerância de otimalidade atingida; (2) # instâncias em que o tempo limite de execução foi atingido; (3) # instâncias em que houve interrupção por memória insuficiente

Tabela 7.5: Média dos resultados dos métodos de solução exatos para os grupos de instâncias maiores
Grupos T4P5_F6K2A2, T4M5P5_K3A3, T4P8_F6K2A2 e T4P8_F6K3A3

7.2 Resultados do método de solução heurístico

Esta seção apresenta os resultados da heurística de 3 fases apresentada na Seção 6.3. O objetivo principal deste método é encontrar soluções competitivas em tempos computacionais menores, particularmente para os conjuntos de instâncias de tamanho médio e grande, em que encontrar soluções ótimas é ainda desafiante para os métodos exatos propostos nesta pesquisa. Assim, os resultados dos experimentos computacionais para o método heurístico são apresentados para instâncias médias e grandes nesta seção.

As Tabelas 7.6 e 7.7 apresentam os resultados obtidos para os conjuntos de instâncias de tamanho médio e grande, respectivamente. Estes resultados mostram a solução obtida ao término de cada fase da heurística, o tempo computacional acumulado ao término de cada fase, e o desvio da solução em comparação com a solução obtida pelo algoritmo B&C de melhor desempenho reportado na seção anterior.

Observe que, embora o objetivo da primeira fase da heurística seja gerar configurações de processo factíveis para a Fase 2, uma solução factível para o problema original é também obtida ao final desta, devido aos algoritmos utilizados nesta fase. O tempo computacional para resolver o modelo de programação inteira mista da Fase 2 é bastante curto, *i.e.*, poucos segundos para todas as instâncias, uma vez que a lista de possíveis configurações geradas na Fase 1 é relativamente pequena e o *solver* CPLEX pode resolver o modelo eficientemente. Note que as soluções obtidas após a segunda fase já representam soluções competitivas aos resultados do B&C, as quais são encontradas em tempos computacionais muito menores.

Para os grupos de instância de tamanho médio na Tabela 7.6, a heurística proposta encontra as mesmas soluções que a variante de melhor desempenho do algoritmo B&C, as quais correspondem às soluções ótimas desses problemas. Para os grupos T2P5_F6K2A2 e T2P8_F6K2A2, nos quais o desempenho do B&C foi claramente superior ao do CPLEX, a heurística encontra as soluções ótimas destes problemas em aproximadamente o mesmo tempo que o B&C. Para o Grupo T2P8_F6K3A3, em que a maioria das soluções do B&C foi provada ótima, a heurística encontra as mesmas soluções que o algoritmo exato, porém em um tempo computacional médio aproximadamente 8 vezes menor.

Para os grupos de instâncias maiores, a abordagem heurística encontra soluções competitivas em tempos computacionais significativamente mais curtos que as abordagens exatas. Para o primeiro conjunto de instâncias T4P5_F6K2A2, a heurística encontra soluções com desvio médio de 0,46% em comparação com as melhores soluções encontradas pelo B&C, envolvendo um tempo computacional de apenas 91 segundos aproximadamente. Para o grupo T4M5P5_K3A3, o desvio médio das soluções heurísticas é de aproximadamente 1,46% em relação às soluções do algoritmo B&C, as quais são encontradas em um tempo computacional que corresponde ao 3,8% do tempo de execução do B&C.

Note que para os grupos de instâncias com maior número de produtos, os grupos T4P8_F6K2A2 e T4P8_F6K3A3, a heurística encontra melhores soluções em tempos computacionais ao menos 8 vezes menores que o tempo de execução do B&C. Para o grupo T4P8_F6K2A2, a heurística encontra soluções iguais ou melhores que o algoritmo B&C para 8 das 10 instâncias. Em média, as soluções heurísticas neste grupo são aproximadamente 0,92% melhores que as soluções B&C, sendo que o tempo computacional é 8,5 vezes aproximadamente menor. Finalmente, para o grupo T4P8_F6K3A3, a heurística encontra melhores soluções para 8 das 10 instâncias do problema. O melhor dentre estes casos cor-

Grupo	Inst.	Fase 1			Fase 2			Fase 3		
		Solução	Tempo(s)	Desv. (B&C)	Solução	Tempo Acu.(s)	Desv. (B&C)	Solução	Tempo Acu.(s)	Desv. (B&C)
T2P5_F6K2A2	1	30.407,1	23,6	38,67%	21.926,9	23,7	0,00%	21.926,9	30,5	0,00%
	2	25.472,9	17,2	19,86%	21.252,9	17,3	0,00%	21.252,8	23,8	0,00%
	3	27.061,0	37,0	18,56%	22.825,5	37,1	0,00%	22.825,4	44,0	0,00%
	4	31.430,6	35,1	36,19%	23079,1	35,2	0,00%	23079,0	42,5	0,00%
	5	25.224,4	32,3	20,09%	21004,4	32,3	0,00%	21.004,4	38,9	0,00%
	6	25.515,5	15,0	20,10%	21245,1	15,0	0,00%	21.245,1	21,7	0,00%
	7	31.105,9	19,1	36,72%	22.751,1	19,2	0,00%	22.751,0	26,1	0,00%
	8	31.961,9	15,1	36,39%	23.434,0	15,2	0,00%	23.434,0	23,0	0,00%
	9	30.123,8	9,2	35,47%	22.235,8	9,2	0,00%	22.235,8	15,7	0,00%
	10	31.165,4	28,4	35,76%	22.956,5	28,5	0,00%	22.956,5	36,2	0,00%
Média	28.946,8	23,2	29,78%	22.271,1	23,3	0,00%	22.271,1	30,2	0,00%	
T2P8_F6K2A2	1	36.111,9	27,5	30,50%	27.671,9	27,6	0,00%	27.671,9	40,6	0,00%
	2	36.445,3	40,8	30,14%	28.005,3	40,9	0,00%	28.005,3	55,3	0,00%
	3	37.251,4	26,6	29,29%	28.811,4	26,7	0,00%	28.811,3	40,6	0,00%
	4	36.862,9	36,4	29,45%	28.477,6	36,6	0,00%	28.477,6	47,5	0,00%
	5	36.522,1	25,2	30,05%	28.082,1	25,4	0,00%	28.082,1	38,0	0,00%
	6	37.276,1	26,7	29,27%	28.836,1	26,8	0,00%	28.836,1	38,5	0,00%
	7	36.751,4	44,5	29,48%	28.383,9	44,6	0,00%	28.383,9	57,1	0,00%
	8	37.763,2	42,2	28,78%	29.323,2	42,3	0,00%	29.323,2	57,1	0,00%
	9	36208,4	40,5	30,39%	27768,4	40,6	0,00%	27768,4	54,1	0,00%
	10	35.714,3	37,1	30,94%	27.274,3	37,2	0,00%	27.274,3	47,9	0,00%
Média	36.690,7	34,8	29,83%	28.263,4	34,9	0,00%	28.263,4	47,7	0,00%	
T2P8_F6K3A3	1	37.357,3	545,0	12,73%	33.137,3	545,1	0,00%	33.137,2	574,3	0,00%
	2	41.796,3	1.456,0	25,30%	33.356,3	1456,1	0,00%	33.356,3	1.480,0	0,00%
	3	42.664,3	55,5	24,66%	34.224,3	55,7	0,00%	34.224,2	80,5	0,00%
	4	42.151,6	433,4	25,04%	33.711,6	433,6	0,00%	33.711,6	433,6	0,00%
	5	33.627,9	75,4	0,00%	33.627,9	75,5	0,00%	33.627,9	96,6	0,00%
	6	34.297,1	77,4	0,00%	34.297,1	77,7	0,00%	34.297,0	105,3	0,00%
	7	33.712,4	789,9	0,00%	33.712,4	790,0	0,00%	33.712,3	811,6	0,00%
	8	39.251,5	3654,5	12,05%	35.031,5	3.654,6	0,00%	35.031,5	3.681,5	0,00%
	9	37.502,1	90,9	12,68%	33.282,1	91,2	0,00%	33.282,0	118,5	0,00%
	10	41.063,7	3668,3	25,87%	32.623,7	3.668,4	0,00%	32.623,7	3.686,8	0,00%
Média	38.342,4	1.084,6	13,83%	33.700,4	1.084,8	0,00%	33.700,4	1.106,9	0,00%	

Tabela 7.6: Resultados da heurística de 3 fases para os grupos T2P5_F6K2A2, T2P8_F6K2A2 e T2P8_F6K3A3

responde à instância 9, onde a solução heurística é 12,24% melhor que a solução do B&C. O tempo computacional médio para este grupo é ainda 9,4 vezes menor que o tempo de execução do algoritmo B&C, encontrando soluções com custo total aproximadamente 3,45% menor.

Este capítulo apresentou os experimentos computacionais para os métodos de solução propostos para o problema integrado estudado nesta pesquisa. Desigualdades válidas para a formulação MICPPP, um algoritmo B&C e uma heurística de 3 fases baseada em programação matemática foram testados em diferentes conjuntos de instâncias. Os resultados mostram que as desigualdades válidas propostas permitem melhorar o desempenho do CPLEX e o algoritmo B&C na resolução das instâncias. No entanto, estas são particularmente mais efetivas no algoritmo B&C proposto, o qual obteve melhor desempenho que o CPLEX para a resolução das instâncias de tamanho menor e médio. Já para as instâncias de maior tamanho, o B&C ainda apresenta melhores limitantes inferiores e soluções que o CPLEX. No entanto, ainda é desafiante encontrar soluções ótimas para esses conjuntos de instâncias por meio desta abordagem de solução. A heurística de 3 fases mostra-se competitiva nestes casos, uma vez que encontra soluções ótimas para as instâncias de tamanho médio e soluções melhores que as obtidas pelo B&C na maioria das instâncias de tamanho grande, envolvendo tempos computacionais significativamente menores que o envolvido na resolução das instâncias via métodos exatos (entre 91 e 1.263 segundos). Porém, não tem garantia de encontrar soluções ótimas, diferentemente dos métodos anteriores.

Grupo	Inst.	Fase 1			Fase 2			Fase 3		
		Solução	Tempo(s)	Desv. (B&C)	Solução	Tempo(s)	Desv. (B&C)	Solução	Time(s)	Desv. (B&C)
T4P5_F6K2A2	1	60.356,6	118,0	18,64%	51.158,5	120,0	0,56%	50.872,4	148,3	0,00%
	2	90.153,3	71,2	4,91%	85.933,3	73,4	0,00%	85.933,3	90,7	0,00%
	3	146.134,8	53,6	6,82%	136.799,5	58,6	0,00%	136.799,5	78,5	0,00%
	4	154.163,6	64,2	10,89%	143.039,3	65,6	2,89%	142.566,1	222,5	2,55%
	5	94.852,2	67,1	11,23%	86.989,8	72,3	2,01%	86.989,8	94,0	2,01%
	6	109.876,6	26,7	7,18%	102.518,0	27,5	0,00%	102.517,9	52,0	0,00%
	7	184.727,4	30,1	17,46%	157.262,4	34,9	0,00%	157.262,4	49,0	0,00%
	8	79.028,3	33,0	3,67%	76.233,9	33,8	0,00%	76.233,8	52,0	0,00%
	9	111.582,4	48,1	0,46%	111.072,7	51,8	0,00%	111.072,7	68,9	0,00%
	10	78.475,4	36,9	5,68%	74.255,4	39,3	0,00%	74.255,4	54,8	0,00%
Média		110.935,1	54,9	8,69%	102.526,3	57,7	0,55%	102.450,3	91,1	0,46%
T4M5P5_K3A3	1	63.588,4	660,0	19,87%	56.935,7	705,1	7,33%	56.935,7	790,2	7,33%
	2	112.521,7	234,0	18,65%	98.010,8	235,5	3,35%	95.386,1	344,0	0,58%
	3	139.510,0	188,3	12,00%	128.948,4	192,6	3,52%	124.566,2	248,2	0,00%
	4	151.721,8	330,1	10,93%	141.689,6	336,0	3,59%	140.203,2	1.253,6	2,51%
	5	91.890,0	135,6	2,06%	87.670,0	141,1	-2,62%	87.670,0	186,5	-2,62%
	6	99.969,1	45,7	0,01%	99.961,6	45,9	0,00%	99.961,6	82,9	0,00%
	7	115.436,3	122,8	5,27%	115.436,3	130,1	5,27%	115.436,2	202,5	5,27%
	8	73.859,8	50,1	0,00%	73.859,8	50,6	0,00%	73.859,8	84,4	0,00%
	9	113.036,3	124,6	0,00%	113.036,3	127,1	0,00%	113.036,3	160,2	0,00%
	10	70.866,3	90,5	18,02%	60.964,9	92,7	1,53%	60.964,9	119,7	1,53%
Média		103.240,0	198,2	8,68%	97.651,3	205,7	2,20%	96.802,0	347,2	1,46%
T4P8_F6K2A2	1	176.390,9	164,6	7,20%	164.829,6	244,4	0,17%	164.543,5	303,4	0,00%
	2	247.141,2	547,8	19,77%	210.112,8	554,1	1,83%	210.112,8	578,2	1,83%
	3	211.653,4	313,8	15,11%	180.926,2	338,6	-1,60%	180.926,2	393,3	-1,60%
	4	216.212,8	6.173,1	15,94%	190.458,3	6.179,0	2,13%	181.813,7	6.664,5	-2,51%
	5	217.630,2	3.767,4	5,05%	211.047,1	3.789,6	1,87%	200.091,2	3.832,7	-3,41%
	6	186.635,1	142,3	4,15%	168.822,7	172,8	-5,79%	168.822,6	225,3	-5,79%
	7	134.824,1	88,9	8,20%	124.608,0	94,1	0,00%	124.607,9	121,7	0,00%
	8	136.192,9	72,3	3,64%	131.411,7	78,7	0,00%	131.411,7	111,5	0,00%
	9	141.367,1	151,3	9,73%	128.828,1	214,5	0,00%	128.828,0	246,1	0,00%
	10	76.791,6	66,7	9,86%	72.197,6	91,8	3,29%	71.501,6	154,6	2,29%
Média		174.483,9	1.148,8	9,87%	158.324,2	1.175,8	0,19%	156.265,9	1.263,17	-0,92%
T4P8_F6K3A3	1	181.369,3	1.036,5	-3,36%	169.889,9	1.069,1	-9,48%	168.631,2	1.272,9	-10,15%
	2	191.390,0	791,3	12,66%	170.631,0	798,0	0,44%	169.221,9	1.804,0	-0,39%
	3	171.344,1	931,5	5,14%	162.633,1	962,5	-0,21%	156.108,1	1.081,3	-4,21%
	4	172.136,8	1.295,6	5,24%	165.580,9	1.327,6	1,23%	165.580,8	1.389,4	1,23%
	5	165.729,3	1.905,3	0,71%	157.584,7	1.933,2	-4,24%	157.584,7	2.226,8	-4,24%
	6	169.503,7	455,3	-3,25%	162.920,5	465,5	-7,01%	160.012,6	553,4	-8,67%
	7	129.728,6	176,8	1,93%	122.554,4	201,7	-3,71%	122.554,3	300,2	-3,71%
	8	128.167,7	162,5	0,00%	128.122,8	163,8	-0,04%	128.122,7	272,6	-0,04%
	9	170.258,9	1.864,1	-4,85%	159.696,1	2.100,3	-10,75%	157.034,7	2.269,2	-12,24%
	10	73.683,4	148,7	10,87%	71.735,2	164,8	7,94%	71.735,1	267,8	7,94%
Média		155.331,2	876,8	2,51%	147.134,9	918,6	-2,58%	145.658,6	1.143,8	-3,45%

Tabela 7.7: Resultados da heurística de 3 fases para os grupos T4P5_F6K2A2, T4M5P5_K3A3, T4P8_F6K2A2 e T4P8_F6K3A3

Capítulo 8

Considerações finais

Neste trabalho é estudado o problema de planejamento da produção na indústria de embalagens de polpa moldada. Pesquisas desenvolvidas no setor e revisão de trabalhos similares na literatura mostram que, para alguns contextos industriais, as decisões de planejamento da produção dependem diretamente da seleção e/ou configuração dos processos, por meio dos quais são produzidos diversos produtos de forma simultânea. A configuração destes processos é dependente do sistema de produção de cada indústria em particular, e geralmente incluem restrições tecnológicas específicas do ambiente de produção, as quais devem ser atendidas de modo a gerar planos de produção factíveis na prática. Neste sentido, esta pesquisa abordou um problema de otimização que integra as decisões de configuração de processos, dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção, no contexto industrial de processos de produção de embalagens de polpa moldada. Esta pesquisa contou com a colaboração de uma empresa típica deste setor, localizada no estado de São Paulo e pertencente a um grupo multinacional de fabricantes de equipamentos e produtos diversos na mesma indústria.

Duas formulações matemáticas para representar o problema foram propostas. Ambas as modelagens representam um sistema de produção mono-estágio, mono-linha de produção, múltiplos períodos, múltiplos itens, com tempos e custos de *setup* dependentes da sequência. As formulações consistem em modelos matemáticos de programação linear e não linear inteira mista que representam de forma alternativa as decisões do problema, particularmente as decisões de configuração de processos. A primeira abordagem proposta (MSPPP) admite que configurações de processo sejam geradas a partir de estruturas para a linha de produção determinadas *a priori*. Esta abordagem simplifica a modelagem das restrições tecnológicas do problema, porém requer a enumeração e definição *a priori* de parâmetros relacionadas às possíveis estruturas da linha. Os resultados mostram que esta abordagem representa adequadamente o problema, porém o número de estruturas possíveis é significativamente dependente das características do ambiente de produção, de modo que, para alguns sistemas, o número de possibilidades aumenta consideravelmente com o tamanho do problema, dificultando a resolução desta formulação. Desigualdades válidas foram propostas para este modelo, cujos resultados evidenciam melhorias no desempenho dos métodos de solução. Em geral, melhores limitantes inferiores são obtidos ao incluir as desigualdades válidas para abordagem MSPPP, atingindo reduções no *gap* médio que variam entre 0,36% e 28,52% para cada grupo de instâncias.

A segunda abordagem de modelagem (MICPPP) representa matematicamente o problema sem a ne-

cessidade da determinação *a priori* de estruturas predefinidas para a linha de produção. Esta formulação matemática é mais complexa que a primeira proposta, uma vez que modela diretamente as restrições tecnológicas, resultando em um modelo com restrições não-lineares. Experimentos computacionais da resolução das abordagens via *solver* CPLEX mostram que a segunda abordagem MICPPP apresenta um melhor desempenho na maioria dos grupos de instâncias testados e fornece soluções factíveis para alguns grupos em que a abordagem MSPPP é limitada e não encontra soluções factíveis.

Além das abordagens de modelagem matemática, um método de solução exato e um método de solução heurístico baseado em programação matemática também foram propostos neste trabalho. A ideia principal do algoritmo exato proposto consiste em um método *branch-and-cut* (B&C) que usa uma formulação relaxada do problema, um procedimento de geração de cortes e um procedimento que fornece soluções factíveis para o problema original durante o processo de ramificação na árvore *branch-and-bound*. Os resultados computacionais demonstram que o algoritmo B&C fornece, em geral, melhores soluções e limitantes inferiores para o problema, em comparação com a resolução das formulações originais via CPLEX. Este algoritmo mostra-se particularmente eficiente para instâncias de menor tamanho, as quais são resolvidas de forma ótima em poucos segundos. Os resultados computacionais mostram também que as desigualdades de eliminação de simetria propostas para a formulação MICPPP são fundamentais para o bom desempenho do B&C, dado que a formulação original permite um grande número de soluções simétricas que influenciam a convergência do método. Os conjuntos de desigualdades válidas e restrições de quebra de simetria para a abordagem MICPPP permitem reduções no *gap* médio entre 2,45% e 9,88% quando resolvidas pelo CPLEX, e entre 6,35% e 20,38% quando resolvidas pelo algoritmo B&C aqui proposto. Embora esse algoritmo seja baseado na formulação MICPPP, acredita-se que este método possa ser aplicado também para resolução de problemas de planejamento da produção similares, particularmente aqueles que combinam decisões de configuração ou seleção de processos com decisões de dimensionamento e sequenciamento de lotes.

O método de solução heurístico proposto é baseado em programação matemática e compreende 3 fases na sua execução. Na primeira fase um conjunto de configurações de processo factíveis para cada instância do problema é gerado; na segunda fase, uma solução é construída a partir das possíveis configurações definidas na Fase 1; e na terceira fase, um procedimento de melhoria é aplicado à solução encontrada ao término da Fase 2. Esta heurística mostra-se eficiente na resolução de problemas de tamanho médio, nas quais soluções ótimas são encontradas em tempos computacionais relativamente curtos (*i.e.*, entre 30 e 1.107 segundos). Estes resultados são consistentes também para os problemas de maior tamanho, em que iguais ou melhores soluções que a abordagem exata de melhor desempenho foram encontradas pelo método heurístico para 72,5% destas instâncias, envolvendo tempos computacionais que variam entre 91 e 1.263 segundos em média (*i.e.*, entre 0,80% e 11,69% do tempo computacional médio usado pelas abordagens exatas). Porém, esse método não tem garantia de encontrar soluções ótimas diferentemente dos métodos anteriores.

Oportunidades de pesquisas decorrentes do desenvolvimento desta tese são mencionadas a seguir.

- **Formulações e métodos de solução para a aplicação estudada.** Encontrar soluções ótimas para o problema estudado nesta tese é ainda um desafio para instâncias maiores, o que motiva a proposta e desenvolvimento de métodos de solução alternativos possivelmente mais efetivos. Particularmente, a estrutura das decisões que são integradas neste problema parece adequada para

aplicação de métodos de decomposição Dantzig-Wolfe e Geração de colunas. Nesta direção, a determinação das configurações de processo poderia ser considerada como um sub-problema, enquanto as decisões de dimensionamento e sequenciamento poderiam conformar o problema mestre. No entanto, a aplicação e eficiência deste método são perguntas de pesquisa importantes, que demandam um significativo investimento de pesquisa. Alternativamente, reformulações do problema com foco em problemas de otimização similares bem estudados na literatura, como problemas de corte, empacotamento e/ou roteamento de veículos, também são oportunidades de pesquisa interessantes para dar continuidade ao estudo do problema de planejamento e programação da produção aplicado apresentado nesta tese.

- **Extensões do problema de otimização estudado.** Esta pesquisa foi focada na integração de decisões de configurações de processo, dimensionamento e sequenciamento para ambientes de produção de polpa moldada com uma única linha de produção. No entanto, na prática encontra-se com frequência sistemas de produção que compreendem um conjunto de linhas de produção, as quais são dedicadas para a produção de famílias de produtos. A consideração de múltiplas linhas de produção tem implicações importantes, principalmente nas decisões de configuração de processos, uma vez que o número de moldes a partir dos quais são formados os padrões de moldagem são recursos limitados que precisam ser administrados eficientemente no sistema. Esta oportunidade de pesquisa, que envolve a sincronia na utilização dos moldes num sistema de produção de múltiplas linhas, representa um problema de otimização desafiante, tanto para a proposta de formulações matemáticas como de métodos de solução. Nesta direção, alguns pontos de partida podem ser encontrados em trabalhos existentes na literatura relacionados aos problemas de gestão de ferramentas e planejamento da produção em ambientes de manufatura flexível. Por exemplo, [Almeder e Almada-Lobo \(2011\)](#) apresenta formulações para a integração de decisões de planejamento e programação, em que as ferramentas usadas para o processamento dos produtos nas máquinas é considerado um recurso escasso, e a sua utilização interfere nas decisões de preparação, dimensionamento e sequenciamento das máquinas.
- **Revisão e estudo de problemas integrados de configuração de processos e dimensionamento de lotes.** Na revisão bibliográfica realizada nesta tese, encontram-se diversos trabalhos que estudam aplicações de planejamento e programação da produção que incluem de alguma forma decisões de seleção e/ou configurações de processo. Estes problemas possuem características em comum que merecem uma revisão e exame cuidadosos, e que poderiam ser melhor exploradas nos métodos de solução. Neste sentido, uma oportunidade de pesquisa nesta direção envolve um estudo da sistematização e classificação destes trabalhos, assim como a proposta de métodos de solução que explorem as especificidades das decisões integradas de cada classe de problema e que possam ser aplicáveis ao planejamento e programação da produção desses contextos industriais.

Apêndice A

Resultados detalhados das abordagens propostas

Este apêndice apresenta os resultados detalhados dos experimentos computacionais realizados para 10 conjuntos de instâncias do problema, cujas características são apresentadas na Tabela 5.6 do Capítulo 5. Estes resultados correspondem ao caso de melhor desempenho das três abordagens de solução propostas: a abordagem MSPPP resolvida usando CPLEX, a abordagem MICPPP usando CPLEX e a abordagem MICPPP resolvida pelo algoritmo B&C.

	MSPPP - CPLEX ^a					MICPPP - CPLEX ^b				MICPPP - B&C ^b			
	Inst.	Lim. sup.	Lim. inf.	Gap	Tempo	Lim. sup.	Lim. inf.	Gap	Tempo	Lim. sup.	Lim. inf.	Gap	Tempo
T2P5_F6K2A1	1	25.334,3	25.331,9	0,01%	1.714,7	25.334,3	25.331,8	0,01%	19.55,6	25.334,3	25.333,0	0,01%	34,0
	2	15.766,8	14.260,0	9,56%	10.800,0	15.766,8	13.672,8	13,28%	10.800,0	15.766,8	15.766,8	0,00%	30,6
	3	16.563,6	14.904,5	10,02%	10.800,0	16.563,6	13.902,3	16,07%	10.800,0	16.563,6	16.563,5	0,00%	62,8
	4	16.836,2	15.108,0	10,26%	10.800,0	16.836,2	13.672,8	18,79%	10.800,0	16.836,2	16.835,3	0,01%	82,0
	5	16.148,2	14.552,4	9,88%	10.800,0	16.148,2	13.672,8	15,33%	10.800,0	16.148,2	16.147,0	0,01%	53,6
	6	16.407,1	14.718,6	10,29%	10.800,0	16.407,1	13.837,8	15,66%	10.800,0	16.407,1	16.407,1	0,00%	43,3
	7	16.477,3	14.762,1	10,41%	10.800,0	16.477,3	13.672,8	17,02%	10.800,0	16.477,3	16.477,3	0,00%	37,9
	8	16.960,7	14.860,2	12,38%	10.800,0	16.960,7	13.928,8	17,88%	10.800,0	16.960,7	16.959,5	0,01%	61,5
	9	16.362,0	14.880,9	9,05%	10.800,0	16.362,0	13.943,3	14,78%	10.800,0	16.362,0	16.362,0	0,00%	49,2
	10	16.503,2	14.516,8	12,04%	10.800,0	16.503,2	13.975,7	15,32%	10.800,0	16.503,2	16.503,2	0,00%	37,8
	Média	17.336,0	15.789,54	9,39%	9.891,5	17.336,0	14.961,1	14,41%	9.915,6	17.336,0	17.335,5	0,00%	49,3
T2P8_F6K2A1	1	26.378,0	13.785,0	47,74%	10.800,0	27.080,0	20.846,8	23,02%	10.800,0	26.378,0	26.375,4	0,01%	9.344,3
	2	26.365,8	13.672,8	48,14%	10.800,0	26.604,1	22.914,1	13,87%	10.800,0	26.365,8	25.237,5	4,28%	10.800,0
	3	26.528,0	14.596,5	44,98%	10.800,0	26.528,0	18.317,4	30,95%	10.800,0	26.528,0	26.525,4	0,01%	6.822,5
	4	26.838,2	13.672,8	49,05%	10.800,0	26.838,2	20.619,1	23,17%	10.800,0	26.838,2	24.479,6	8,79%	10.800,2
	5	26.974,8	11.309,6	58,07%	10.800,0	26.974,8	21.717,3	19,49%	10.800,0	26.974,8	25.003,7	7,31%	10.800,0
	6	27.005,8	14.509,0	46,27%	10.800,0	27.308,3	21.610,4	20,87%	10.800,0	27.005,8	26.281,8	2,68%	10.800,0
	7	26.212,0	15.529,6	40,75%	10.800,0	26.598,2	23.404,7	12,01%	10.800,0	26.212,0	26.209,4	0,01%	10.366,2
	8	27.473,9	15.383,8	44,01%	10.800,2	27.473,9	23.055,0	16,08%	10.800,0	27.473,9	25.090,9	8,67%	10.800,0
	9	26.731,1	14.168,4	47,00%	10.800,0	27.037,6	22.854,6	15,47%	10.800,0	26.731,1	26.329,3	1,50%	10.800,0
	10	26.174,1	14.484,8	44,66%	10.800,7	26.174,1	18.757,4	28,34%	10.800,0	26.174,1	26.171,9	0,01%	6.908,6
	Média	26.668,18	14.111,22	47,07%	10.800,1	26.861,7	21.409,7	20,33%	10.800,0	26.668,2	25.770,5	3,33%	9.824,2
T2P8_F6K3A1	1	23.328,4	4.220,0	81,9%	10.800,11	23.328,4	23.326,3	0,01%	3.130,2	23.328,4	23.327,3	0,00%	1045,2
	2	23.252,6	4.220,0	81,9%	10.800,02	23.252,6	23.252,6	0,00%	6.687,3	23.252,6	23.250,9	0,01%	1.681,7
	3	23.703,0	5.626,7	76,3%	10.800,02	23.703,0	23.701,4	0,01%	10.683,5	23.703,0	23.702,0	0,00%	1.256,0
	4	23.494,8	4.220,0	82,0%	10.800,17	23.494,8	23.493,9	0,00%	5.615,1	23.494,8	23.494,8	0,00%	824,8
	5	28.048,3	4.220,0	85,0%	10.800,13	23.828,3	23.828,1	0,00%	6.156,2	23.828,3	23.826,0	0,01%	1.095,4
	6	23.846,4	4.220,0	82,3%	10.800,09	23.846,4	23.844,1	0,01%	10.652,0	23.846,4	23.844,9	0,01%	1.590,8
	7	23.724,8	4.220,0	82,2%	10.800,11	23.724,8	23.724,8	0,00%	3.802,3	23.724,8	23.724,8	0,00%	826,9
	8	23.604,9	4.220,0	82,1%	10.800,14	23.604,9	23.603,8	0,00%	5.799,5	23.604,9	23.604,9	0,00%	1.148,2
	9	23.497,4	4.220,0	82,0%	10.800,01	23.497,4	23.497,4	0,00%	8.523,2	23.497,4	23.497,4	0,00%	1.127,1
	10	23.269,8	4.220,0	81,9%	10.800,01	23.269,8	23.269,0	0,00%	6087,2	23.269,8	23.268,1	0,01%	702,8
	Média	23.977,0	4.360,7	81,8%	10.800,1	23.555,0	23.554,1	0,00%	6.713,6	23.555,0	23.554,1	0,00%	1.129,9

^a Caso de melhor desempenho reportado na Tabela 5.8; ^b Caso de melhor desempenho reportado na Tabela 7.2

Tabela A.1: Resultados detalhados dos casos de melhor desempenho das abordagens propostas para os Grupos T2P5_F6K2A1, T2P8_F6K2A1 e T2P8_F6K3A1

	MSPPP - CPLEX ^a				MICPPP - CPLEX ^b				MICPPP - B&C ^b				
	Inst.	Lim. sup.	Lim. inf.	Gap	Tempo	Lim. sup.	Lim. inf.	Gap	Tempo	Lim. sup.	Lim. inf.	Gap	Tempo
T2P5_F6K2A2	1	21.926,9	21.924,75	0,0%	5.214,3	21.926,9	19.680,2	10,25%	10.800,0	21.926,9	21.925,6	0,01%	62,7
	2	21.252,9	21.252,9	0,0%	5.154,3	21.252,9	19.618,3	7,69%	10.800,0	21.252,9	21.252,9	0,00%	34,4
	3	22.825,5	22.825,5	0,0%	6.118,6	22.825,5	20.680,1	9,40%	10.800,0	22.825,5	22.824,5	0,00%	38,4
	4	23.079,1	23077,7	0,0%	4.514,8	23.079,1	20.716,5	10,24%	10.800,0	23.079,1	23.079,1	0,00%	56,3
	5	21.004,4	21.004,4	0,0%	5.301,5	21.004,4	18.695,7	10,99%	10.800,0	21.004,4	21.004,4	0,00%	28,1
	6	21.245,1	21.243,1	0,0%	4.395,3	21.245,1	19.231,2	9,48%	10.800,0	21.245,1	21.243,7	0,01%	40,8
	7	22.751,1	22.748,9	0,0%	7.199,1	22.751,1	20.351,8	10,55%	10.800,0	22.751,1	22.749,2	0,01%	60,9
	8	23.434,0	23.432,6	0,0%	6.826,1	23.434,0	20.999,5	10,39%	10.800,0	23.434,0	23.433,4	0,00%	63,2
	9	22.235,8	22.233,7	0,0%	5.507,2	22.235,8	20.347,5	8,49%	10.800,0	22.235,8	22.235,3	0,00%	33,6
	10	22.956,5	22.955,1	0,0%	7.854,5	22.956,5	20.459,8	10,88%	10.800,0	22.956,5	22.954,4	0,01%	54,9
Média	22.271,1	22.269,9	0,0%	5808,6	22.271,1	20.078,0	9,83%	10800,0	22.271,1	22.270,2	0,00%	47,3	
T2P8_F6K2A2	1	27.671,9	27.218,80	1,6%	10.800,0	27.671,9	27.671,9	0,00%	870,8	27.671,9	27.671,9	0,00%	43,0
	2	28.005,3	27.548,8	1,6%	10.800,0	28.005,3	28.004,6	0,00%	1.066,0	28.005,3	28.005,3	0,00%	49,1
	3	28.811,4	27.904,9	3,1%	10.800,0	28.811,4	28.811,4	0,00%	1.075,1	28.811,4	28.811,4	0,00%	61,5
	4	28.477,6	27.785,4	2,4%	10.800,0	28.477,6	28.477,6	0,00%	2.869,0	28.477,6	28.477,6	0,00%	29,6
	5	28.082,2	25.334,9	9,8%	10.800,0	28.082,1	28.082,1	0,00%	736,7	28.082,1	28.082,1	0,00%	90,4
	6	28.836,1	27.407,5	5,0%	10.800,0	28.836,1	28.834,5	0,01%	1.375,3	28.836,1	28.836,1	0,00%	37,8
	7	28.383,9	27.362,9	3,6%	10.800,0	28.383,9	28.381,6	0,01%	1.364,1	28.383,9	28.383,9	0,00%	41,7
	8	29.323,2	28.565,3	2,6%	10.800,0	29.323,2	29.323,2	0,00%	3.250,2	29.323,2	29.323,2	0,00%	45,4
	9	27.768,4	27.198,4	2,1%	10.800,0	27.768,4	27.768,4	0,00%	3.889,0	27.768,4	27.768,4	0,00%	64,5
	10	27.274,3	26.867,0	1,5%	10.800,0	27.274,3	27.274,3	0,00%	682,4	27.274,3	27.272,5	0,01%	77,0
Média	28.263,5	27.319,4	3,3%	10.800,0	28.263,4	28.263,0	0,00%	1.717,9	28.263,4	28.263,3	0,00%	54,0	
T2P8_F6K3A3	1	-	-	-	-	33.137,3	33.134,3	0,01%	9.135,5	33.137,3	33.134,3	0,01%	6.753,7
	2	-	-	-	-	33.356,3	33.354,0	0,01%	9.640,7	33.356,3	33.353,2	0,01%	8.216,1
	3	40.766,58	4.238,28	89,60%	10.803,9	34.224,3	34.080,2	0,42%	10.800,0	34.224,3	34.221,3	0,01%	7.976,3
	4	-	-	-	-	33.711,6	30.956,2	8,17%	10.800,0	33.711,6	33.708,2	0,01%	9.286,2
	5	-	-	-	-	33.627,9	30.680,9	8,76%	10.800,0	33.627,9	32.147,6	4,40%	10.800,0
	6	-	-	-	-	34.297,1	32.615,9	4,90%	10.800,0	34.297,1	34.022,4	0,80%	10.800,0
	7	-	-	-	-	33.712,4	32.748,3	2,86%	10.800,0	33.712,4	32.289,4	4,22%	10.800,0
	8	-	-	-	-	35.031,5	35.029,9	0,00%	8.503,0	35.031,5	35.028,0	0,01%	10371,6
	9	-	-	-	-	33.282,1	33.199,8	0,25%	10.800,0	33.282,1	33.278,9	0,01%	7695,9
	10	34.297,12	4.760,50	86,12%	10.809,9	32.623,7	31.497,6	3,45%	10.800,0	32.623,7	32.620,9	0,01%	4.863,8
Média	37.531,9	4.499,4	87,86%	10.806,9	33.700,4	32.729,7	2,88%	10.287,9	33.700,4	33.380,4	0,95%	8.756,4	

^a Caso de melhor desempenho reportado na Tabela 5.8; ^b Caso de melhor desempenho reportado na Tabela 7.2

Tabela A.2: Resultados detalhados dos casos de melhor desempenho das abordagens propostas para os Grupos T2P5_F6K2A2, T2P8_F6K2A2 e T2P8_F6K3A3

	Inst.	MSPPP - CPLEX ^a				MICPPP - CPLEX ^b				MICPPP - B&C ^b			
		Lim. sup.	Lim. inf.	Gap	Tempo	Lim. sup.	Lim. inf.	Gap	Tempo	Lim. sup.	Lim. inf.	Gap	Tempo
T4P5_F6K2A2	1	64.884,5	13.582,84	79,1%	10.800,00	61.655,7	20.853,3	66,18%	10.800,0	50.872,4	31.334,1	38,4%	10.800,0
	2	85.933,3	46.265,6	46,2%	10.800,03	88.558,0	63.132,0	28,71%	10.800,0	85.933,3	72567,5	15,6%	10.800,0
	3	136.799,5	83.859,3	38,7%	10.800,03	136.799,5	112.270,5	17,93%	10.800,0	136.799,5	125218,8	8,5%	10.800,0
	4	141.245,8	69.894,8	50,5%	10.800,03	139.665,8	104.566,9	25,13%	10.800,0	139.026,0	114859,9	17,4%	10.800,0
	5	89.963,2	39.899,2	55,6%	10.800,05	85.276,6	63.108,8	26,00%	10.800,0	85.276,6	73.533,0	13,8%	10.800,0
	6	109.276,3	86.302,4	21,0%	10.800,01	102.648,3	93.990,2	8,43%	10.800,0	102.518,0	102.508,1	0,0%	1.685,6
	7	172.625,2	94.925,6	45,0%	10.800,05	157.262,4	147.118,9	6,45%	10.800,0	157.262,4	157.246,7	0,0%	6.648,2
	8	82.320,2	54.766,8	33,5%	10.800,04	76.233,9	60.243,2	20,98%	10.800,0	76.233,9	76.226,9	0,0%	5.085,3
	9	112.650,7	71.068,7	36,9%	10.800,02	111.072,7	93.575,4	15,75%	10.800,0	111.072,7	102.681,0	7,6%	10.800,0
	10	74.255,4	47.357,4	36,2%	10.800,00	74.255,4	67.519,1	9,07%	10.800,0	74.255,4	74.248,1	0,0%	2.641,4
Média	106.995,4	60.792,25	44,3%	10800,03	103.342,8	82.637,8	22,46%	10.800,0	101.925,0	93.042,4	10,1%	8.086,1	
T4P5_F6K3A3	1	-	-	-	-	57.906,3	25.064,9	56,71%	10.800,0	53.048,5	27.777,0	47,6%	10.800,0
	2	-	-	-	-	94.836,1	60.795,0	35,89%	10.800,0	94.836,1	63.063,5	33,5%	10.800,0
	3	-	-	-	-	12.8786,3	90.044,3	30,08%	10.800,0	124.566,3	101.110,4	18,8%	10.800,0
	4	-	-	-	-	13.5002,0	85.091,3	36,97%	10.800,0	136.772,8	87.886,4	35,7%	10.800,0
	5	-	-	-	-	87.670,0	48.639,0	44,52%	10.800,0	90.033,2	62.241,7	30,9%	10.800,0
	6	-	-	-	-	99.961,6	99.953,1	0,01%	3.853,9	99.961,6	99.953,2	0,0%	676,2
	7	-	-	-	-	111.232,2	79.133,9	28,86%	10.800,0	109.657,5	91.483,2	16,6%	10.800,0
	8	-	-	-	-	73.859,8	64.921,7	12,10%	10.800,0	73.859,8	73.852,4	0,0%	4.278,8
	9	-	-	-	-	116.862,1	93.671,9	19,84%	10.800,0	113.036,3	100.075,7	11,5%	10.800,0
	10	-	-	-	-	60.637,9	50.989,8	15,91%	10.800,0	60.047,1	56.294,3	6,2%	10.800,0
Média	-	-	-	-	-96.675,4	69.830,5	28,09%	10.105,4	95.581,9	76.373,8	20,1%	9.135,5	
T4P8_F6K2A2	1	195.746,1	116.045,0	40,72%	10.800,00	184.113,5	125.033,6	32,1%	10.800,0	164.543,5	135.017,9	17,9%	10.800,0
	2	206.679,7	112.910,9	45,37%	10.800,85	216.198,6	130.305,4	39,7%	10.800,0	206.340,0	137.484,8	33,4%	10.800,0
	3	212.553,5	83.263,2	60,83%	10.800,00	186.671,3	113.620,0	39,1%	10.800,0	183.862,7	113.257,3	38,4%	10.800,0
	4	176.100,1	86.351,9	50,96%	10.800,03	187.616,3	98.781,3	47,3%	10.800,0	186.492,4	115.949,1	37,8%	10.800,0
	5	201.907,2	88.006,6	56,41%	10.800,01	230.896,4	115.146,6	50,1%	10.800,0	207.164,8	114.445,8	44,8%	10.800,0
	6	200.593,7	108.178,1	46,07%	10.800,15	168.822,7	127.348,9	24,6%	10.800,0	179.206,0	135.575,1	24,3%	10.800,0
	7	137.693,7	91.471,7	33,57%	10.800,02	126.971,2	107.332,6	15,5%	10.800,0	124.608,0	121.944,2	2,1%	10.800,0
	8	135.471,4	92.794,5	31,50%	10.800,06	133.774,9	107.812,8	19,4%	10.800,0	131.411,7	111.583,7	15,1%	10.800,0
	9	138.443,8	86.425,3	37,57%	10.801,46	133.218,1	101.780,5	23,6%	10.800,0	128.828,1	108.543,2	15,7%	10.800,0
	10	69.899,9	38.198,3	45,35%	10.800,05	77.780,5	46.741,1	39,9%	10.800,0	69.899,9	52.316,9	25,2%	10.800,0
Média	167.508,9	90.364,6	44,84%	10.800,26	164.606,4	107.390,3	33,1%	10.800,0	158.235,7	114.611,8	25,5%	10.800,0	
T4P8_F6K3A3	1	-	-	-	-	180620,8	127061,3	29,7%	10800,0	187680,1	132560,9	29,4%	10800,0
	2	-	-	-	-	181.695,0	129.848,2	28,5%	10.800,0	169.881,6	129.757,5	23,6%	10.800,0
	3	-	-	-	-	176.842,4	89.234,3	49,5%	10.800,0	162.970,1	100.881,9	38,1%	10.800,0
	4	-	-	-	-	171.476,1	86.642,3	49,5%	10.800,0	163.568,1	100.533,3	38,5%	10.800,0
	5	-	-	-	-	172.064,4	100.848,6	41,4%	10.800,0	164.562,6	110.544,7	32,8%	10.800,0
	6	-	-	-	-	175.780,1	118.470,2	32,6%	10.800,0	175.196,6	123.087,9	29,7%	10.800,0
	7	-	-	-	-	128.054,5	90.426,1	29,4%	10.800,0	127.278,3	102.634,7	19,4%	10.800,0
	8	-	-	-	-	133.000,7	100.440,9	24,5%	10.800,0	128.167,7	114.867,3	10,4%	10.800,7
	9	-	-	-	-	166.475,0	89.783,2	46,1%	10.800,0	178.930,3	105.405,4	41,1%	10.800,0
	10	-	-	-	-	67.923,0	47.651,1	29,8%	10.800,0	66.459,5	50.098,7	24,6%	10.800,0
Média	-	-	-	-	155.393,2	98.040,6	36,1%	10.800,0	152.469,5	107.037,2	28,8%	10.800,1	

^a Caso de melhor desempenho reportado na Tabela 5.8; ^b Caso de melhor desempenho reportado na Tabela 7.2

Tabela A.3: Resultados detalhados dos casos de melhor desempenho das abordagens propostas para os Grupos T4P5_F6K2A2, T4P5_F6K3A3, T4P8_F6K2A2 e T4P8_F6K3A3

Apêndice B

Procedimentos usados na heurística de 3 fases

Este apêndice apresenta com mais detalhes os procedimentos que compõem a heurística de 3 fases descrita na Seção 6.3 no Capítulo 6.

B.1 Abordagens para a Fase 1

Nesta fase, heurísticas *relax-and-fix* são executadas a fim de criar a lista ξ de possíveis configurações requeridas na Fase 2. Uma vez que estas heurísticas usam a formulação original MICPPP para o problema integrado, os resultados ao término desta fase também incluem soluções factíveis para o problema original. Nesta fase, o Algoritmo 2 é executado uma vez, de modo que as configurações de processo usadas na solução obtida sejam anexadas à lista ξ . Em seguida, as desigualdades (B.1) são incluídas na formulação usada no Algoritmo 3, de modo que as configurações de processo já listadas em ξ não sejam usadas na solução obtida por este algoritmo. Na sequência, a heurística R&F no Algoritmo 3 é executada e as configurações de processo usadas na solução obtida são incluídas na lista ξ .

A primeira heurística R&F considera partições de variáveis de acordo com as principais decisões integradas no problema original. Primeiramente as decisões de arranjo configurado em cada transportador são tomadas, em seguida, define-se os produtos a serem produzidos e, por fim, a combinação de moldes acoplada na máquina de moldagem. O procedimento em detalhe é apresentado como segue.

As desigualdades (B.1) são incluídas na formulação usada na heurística R&F no Algoritmo 3. Estas desigualdades consideram $\hat{z}_{\epsilon ke}$ e $\hat{y}_{\epsilon ipk}$ como os valores das variáveis z e y do problema original, as quais geram a configuração ϵ da lista ξ . Estas desigualdades garantem que as configurações de processo em ξ não sejam consideradas na solução obtida pela segunda estratégia R&F.

Algoritmo 2 R&F: estratégia de partição por decisões

- 1: Considere a formulação relaxada do problema, apresentada na Seção 6.2.1 , com todas as variáveis definidas como contínuas;
 - 2: **Passo 1:** *definindo o arranjo de cada transportador*
 - 3: Retome a integralidade das variáveis z_{kes} e $b_{ee'ks}$ e resolva a formulação relaxada usando CPLEX;
 - 4: **Passo 2:** *definindo os tipos de produtos a serem produzidos*
 - 5: Fixe os valores das variáveis z_{kes} e $b_{ee'ks}$ obtidas na solução do **Passo 1**.
 - 6: Retome a integralidade das variáveis Y_{is} e resolva a formulação relaxada usando CPLEX;
 - 7: **Passo 3:** *definindo a configuração da máquina de moldagem*
 - 8: Fixe os valores das variáveis Y_{is} obtidas na solução do **Passo 2**;
 - 9: Retome a integralidade das variáveis remanescentes, definidas originalmente como inteiras na formulação relaxada, e resolva o sub-problema usando CPLEX;
 - 10: **se** o sub-problema no **Passo 3** é inactível **then**
 - 11: libere os valores previamente fixados para as variáveis Y_{is} e resolva o sub-problema usando CPLEX;
 - 12: **fim se**
 - 13: **Passo 4 :** *modificando os padrões de moldagem de acordo com as informações de demanda*
 - 14: Fixe os valores das variáveis Y_{is} . Fixe também os valores das variáveis α_{iks} , β_{ks} e x_{jfs} apenas para os casos em que $s \in S$; $i \in N$; $j : i \in A_j$; $k \in K$, $f \in F_k : \alpha_{iks} = 1$,
 - 15: Resolva o problema usando o algoritmo B&C;
 - 16: **retorna** Uma solução factível para o problema original.
-

$$\begin{aligned} \sum_{k \in K} \sum_{\substack{e \in E: \\ \hat{z}_{eke}=1}} (\hat{z}_{eke} - z_{kes}) + \sum_{k \in K} \sum_{\substack{e \in E: \\ \hat{z}_{eke}=0}} z_{kes} + \sum_{p \in P} \sum_{\substack{k \in K: \\ \hat{y}_{eipk}=1}} (\hat{y}_{eipk} - y_{ipks}) \\ + \sum_{p \in P} \sum_{\substack{k \in K: \\ \hat{y}_{eipk}=0}} y_{ipks} \geq 1 \quad \forall e \in \xi; s \in S \end{aligned} \quad (\text{B.1})$$

A partição de variáveis na segunda estratégia R&F está relacionada à estrutura de tempo dividida em sub-períodos da formulação original. O algoritmo é apresentado em detalhes, como segue.

Algoritmo 3 R&F: estratégia de partição por sub-períodos

- 1: Considere a formulação apresentada na Seção 6.2.1 em conjunto com as restrições (B.1);
 - 2: **para todo** $s \in S$ **faça**
 - 3: Mantenha a integralidade das variáveis z_{kes} , y_{ipks} , Y_{is} , x_{jfs} , α_{iks} , β_{ks} , v_s e $b_{ee'ks} \quad \forall i \in N; j : i \in A_j; k \in K; e, e' \in E; p \in P$;
 - 4: Relaxe as variáveis inteiras z_{kes^*} , y_{ipks^*} , Y_{is^*} , x_{jfs^*} , α_{iks^*} , β_{ks^*} , v_{s^*} e $b_{ee'ks^*} \quad \forall s^* > s : s^* \in S; i \in N; j : i \in A_j; k \in K; e, e' \in E_k; p \in P_k$;
 - 5: Resolva o sub-problema usando o algoritmo B&C;
 - 6: Fixe os valores das variáveis z_{kes} , y_{ipks} , Y_{is} , x_{jfs} , α_{iks} , β_{ks} , v_s , $b_{ee'ks}$, u_{iks} , e β_{ks} para as seguintes iterações;
 - 7: **fim for**
 - 8: **retorna** Uma solução factível para o problema original
-

B.2 Abordagens para a Fase 2

Nesta fase, o modelo de programação inteira mista, apresentado a seguir, é construído usando as saídas da Fase 1 e em seguida resolvido usando CPLEX. Esta formulação é também baseada no modelo clássico GLSP e usa como parâmetros de entrada as configurações de processo da lista ξ , além dos parâmetros da

formulação original MICPPP.

Conjuntos e índices:

- T conjunto de períodos de tempo (indexado por t)
- S_t conjunto de sub-períodos pertencentes ao período t (indexado por s)
- S conjunto de sub-períodos. $S = \bigcup_{t \in T} S_t$
- ξ conjunto de possíveis configurações de processo (indexada por ϵ)
- N conjunto de tipos de produtos (indexada por i)
- J conjunto de tipos de moldes (indexada por j)
- A_j conjunto de produtos obtidos pelo molde tipo j
- K conjunto de transportadores (indexado por k)
- E conjunto de possíveis arranjos para os transportadores (indexado por e)

Parâmetros:

- $X_{\epsilon i}$ número de moldes para o produto i de acordo com a configuração ϵ
- $\tilde{R}_{i\epsilon}$ taxa de produção do produto i de acordo com a configuração ϵ (unidades por hora)
- $Z_{\epsilon k e}$ arranjo configurado no transportador k de acordo à configuração ϵ , i.e., 1, se o transportador k é configurado para o arranjo e de acordo com a configuração ϵ ; 0, caso contrário.
- d_{it} demanda do produto i no período t
- Q_t capacidade total em horas t
- st^I tempo de *setup* para parada/reinício da linha de produção (i.e., tempo de *Setup* I)
- st_j^{II} tempo de *setup* para acoplar/desacoplar um molde do tipo j (i.e., tempo de *Setup* II)
- $st_{e e'}^{III}$ tempo de *setup* para troca do arranjo e para e' (i.e., tempo *Setup* III)
- sc^I custo de *Setup* I
- sc_j^{II} custo de acoplar/desacoplar um molde do tipo J (i.e., custo de *Setup* II)
- $sc_{e e'}^{III}$ custo de troca do arranjo e para e' (i.e., custo de *Setup* III)
- h_i^+ custo de estocagem unitário para o produto i
- h_i^- custo de atraso unitário para o produto i

Variáveis de decisão:

- $y_{\epsilon s}$ 1, se a configuração de processo ϵ é usada no sub-período s ; 0, caso contrário
- $w_{\epsilon s}$ tempo de produção da configuração ϵ no sub-período s
- I_{it}^+ unidades do produto i em estoque ao final do período t
- I_{it}^- unidades atrasadas do produto i ao final do período t
- v_s 1, se a linha de produção é parada para troca de configuração no sub-período s ; 0, caso contrário
- u_{js} número de moldes do tipo j acoplados ou desacoplados no sub-período s
- $b_{e e' ks}$ 1, se existe uma troca do arranjo e para o arranjo e' no transportador k , no sub-período s ; 0, caso contrário

$$\text{Min } \sum_{s \in S} s c^I v_s + \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} s c_j^{II} u_{js} + \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{e, e' \in E} s c_{ee'}^{III} b_{ee'ks} + \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} (h_i^+ I_{it}^+ + h_i^- I_{it}^-) \quad (\text{B.2})$$

$$\sum_{\epsilon \in \xi} y_{\epsilon s} = 1 \quad \forall s \in S \quad (\text{B.3})$$

$$w_{\epsilon s} \leq Q_t y_{\epsilon s} \quad \forall t \in T; s \in S_t; \epsilon \in \xi \quad (\text{B.4})$$

$$\sum_{s \in S_t} \sum_{\epsilon \in \xi} w_{\epsilon s} + \sum_{s \in S_t} v_s s t^I + \sum_{s \in S_t} \sum_{j \in J} u_{js} s t_j^{II} + \sum_{s \in S_t} \sum_{k \in K} \sum_{e, e' \in E} b_{ee'ks} s t_{ee'}^{III} \leq Q_t \quad \forall t \in T \quad (\text{B.5})$$

$$I_{i(t-1)}^+ + \sum_{s \in S_t} \sum_{\epsilon \in \xi} w_{\epsilon s} \tilde{R}_{i\epsilon} + I_{it}^- = d_{it} + I_{i(t-1)}^- + I_{it}^+ \quad \forall t \in T; i \in N \quad (\text{B.6})$$

$$u_{is} \leq M_i v_s \quad \forall i \in N; s \in S \quad (\text{B.7})$$

$$u_{js} \geq \sum_{\epsilon \in \xi} y_{\epsilon s} X_{\epsilon i} - \sum_{\epsilon \in \xi} y_{\epsilon(s-1)} X_{\epsilon i} \quad \forall s \in S; i \in N \quad (\text{B.8})$$

$$u_{is} \geq \sum_{\epsilon \in \xi} y_{\epsilon(s-1)} X_{\epsilon i} - \sum_{\epsilon \in \xi} y_{\epsilon s} X_{\epsilon i} \quad \forall s \in S; i \in N \quad (\text{B.9})$$

$$\sum_{e \in E} b_{ee'ks} = \sum_{\epsilon \in \xi} Z_{\epsilon ke'} y_{\epsilon s} \quad \forall s \in S; k \in K; e' \in E \quad (\text{B.10})$$

$$\sum_{e' \in E} b_{ee'ks} = \sum_{\epsilon \in \xi} Z_{\epsilon ke} y_{\epsilon(s-1)} \quad \forall s \in S; k \in K; e \in E \quad (\text{B.11})$$

$$v_s, y_{\epsilon s}, b_{ee'ks} \in \{0, 1\}; \quad w_{\epsilon s}, u_{is}, I_{it}^+, I_{it}^- \in \mathbf{R}^+ \quad (\text{B.12})$$

$$\forall t \in T; s \in S; \epsilon \in \xi; i \in N; k \in K; e, e' \in E$$

B.3 Abordagens para a Fase 3

Nesta fase da heurística, um procedimento de melhoria é aplicado à solução obtida na fase anterior como apresentado no Algoritmo 4. Os primeiros passos nesta abordagem consistem em transformar a solução obtida ao término da Fase 2 em uma solução factível no espaço de solução da formulação MICPPP.

O procedimento de melhoria aplicado nesta fase consiste em uma heurística *fix-and-optimize* com partição de variáveis de acordo com os períodos do horizonte de planejamento. O algoritmo é descrito como segue.

Algoritmo 4 F&O por períodos

- 1: Considere a formulação original apresentada na Seção 6.2.1 ;
 - 2: Transforme a solução obtida na Fase 2 em uma solução factível da formulação original. Considere esta como a solução inicial \mathbf{S}_0 , e fixe os valores de todas as variáveis da solução;
 - 3: **para todo** $t^* \in T$ **faça**
 - 4: Libere as variáveis indexadas ao período t^* e $s \in S_{t^*}$, exceto as variáveis z_{kes} e $b_{ee'ks} \quad \forall s \in S_t; k \in K; e, e' \in E; p \in P$;
 - 5: Resolva o sub-problema usando B&C;
 - 6: **se** a solução atual é melhor que \mathbf{S}_0 **then**
 - 7: Atualize \mathbf{S}_0
 - 8: **fim se**
 - 9: Fixe as variáveis indexadas no período t^* e $s \in S_{t^*}$, tal como definidas em \mathbf{S}_0
 - 10: **fim for**
 - 11: **retorna** Uma solução factível para o problema original.
-

Referências Bibliográficas

- ALMADA-LOBO, B.; JAMES, R. J. Neighbourhood search meta-heuristics for capacitated lot-sizing with sequence-dependent setups. *International Journal of Production Research*, v. 48, n. 3, p. 861–878, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/00207540802446787>.
- ALMADA-LOBO, B. et al. Single machine multi-product capacitated lot sizing with sequence-dependent setups. *International Journal of Production Research*, v. 45, n. 20, p. 4873–4894, 2007. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/00207540601094465>.
- ALMADA-LOBO, B.; OLIVEIRA, J. F.; CARRAVILLA, M. A. Production planning and scheduling in the glass container industry: A VNS approach. *International Journal of Production Economics*, v. 114, n. 1, p. 363–375, jul. 2008. ISSN 09255273.
- ALMEDER, C.; ALMADA-LOBO, B. Synchronisation of scarce resources for a parallel machine lotsizing problem. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 49, n. 24, p. 7315–7335, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00207543.2010.535570>.
- ARAÚJO, S.; ARENALES, M. N.; CLARK, A. R. Lot sizing and furnace scheduling in small foundries. *Computers & Operations Research*, v. 35, n. 3, p. 916–932, mar. 2008. ISSN 03050548.
- BALDO, T. A. et al. An optimization approach for the lot sizing and scheduling problem in the brewery industry. *Computers & Industrial Engineering*, Elsevier Ltd, v. 72, p. 58–71, jun. 2014.
- BAUMANN, P.; FORRER, S.; TRAUTMANN, N. Planning of a make-to-order production process in the printing industry. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, v. 27, n. 4, p. 534–560, Dec 2015. ISSN 1936-6590. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10696-014-9203-1>.
- BAUMANN, P.; TRAUTMANN, N. Efficient symmetry-breaking formulations for grouping customer orders in a printing shop. In: *2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 506–510. ISSN 2157-3611.
- BERRETTA, R.; RODRIGUES, L. F. A memetic algorithm for a multistage capacitated lot-sizing problem. *International Journal of Production Economics*, v. 87, n. 1, p. 67 – 81, 2004. ISSN 0925-5273. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527303000938>.
- BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations & Production Management*, v. 22, n. 2, p. 241–264, 2002. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1108/01443570210414338>.
- BITRAN, G. R.; YANASSE, H. H. Computational complexity of the capacitated lot size problem. *Management Science*, INFORMS, v. 28, n. 10, p. 1174–1186, 1982.
- BRAHIMI, N. et al. Single item lot sizing problems. *European Journal of Operational Research*, v. 168, n. 1, p. 1 – 16, 2006. ISSN 0377-2217. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221704003923>.

- BUSCHKÜHL, L. et al. Dynamic capacitated lot-sizing problems: a classification and review of solution approaches. *OR Spectrum*, v. 32, n. 2, p. 231–261, 2010. ISSN 1436-6304. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s00291-008-0150-7>).
- CAO, J. X. et al. The integrated yard truck and yard crane scheduling problem: Benders decomposition-based methods. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Elsevier, v. 46, n. 3, p. 344–353, 2010.
- CLARK, A. R.; MORABITO, R.; TOSO, E. A. V. Production setup-sequencing and lot-sizing at an animal nutrition plant through ATSP subtour elimination and patching. *Journal of Scheduling*, v. 13, n. 2, p. 111–121, out. 2010. ISSN 1094-6136.
- COFIL, K. et al. Simultaneous lotsizing and scheduling problems: a classification and review of models. *OR Spectrum*, v. 39, n. 1, p. 1–64, 2017. ISSN 1436-6304.
- CRONE, A. *Investigating the World of Molded Pulp Packaging: Trends, Technology, and Future Developments*. 2014. Publicado por Be Green Packaging. Disponível em: <http://begreenpackaging.com/blog-detail/2016/2/26/investigating-the-world-of-molded-pulp-packaging-trends-technology-and-future-developments>). Acesso em: 10 de Agosto, 2015.
- DEGRAEVE, Z.; VANDEBROEK, M. A mixed integer programming model for solving a layout problem in the fashion industry. *Management Science*, v. 44, n. 3, p. 301–310, 1998. Disponível em: <https://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/mnsc.44.3.301>).
- DREXL, A.; HAASE, K. Proportional lotsizing and scheduling. *International Journal of Production Economics*, v. 40, p. 73–87, 1995.
- DREXL, A.; KIMMS, A. Lot sizing and scheduling - Survey and extensions. *European Journal of Operational Research*, v. 99, p. 221–235, 1997.
- EMFA. *European Moulded Fibre Association*. 2017. Accessed: 2017-04-01. Disponível em: <http://www.emfa.eu>).
- FANDEL, G.; STAMMEN-HEGENE, C. Simultaneous lot sizing and scheduling for multi-product multi-level production. *International Journal of Production Economics*, v. 104, n. 2, p. 308 – 316, 2006. ISSN 0925-5273. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527305002240>).
- FAZEL-ZARANDI, M. M.; BECK, J. C. Solving a location-allocation problem with logic-based benders decomposition. In: SPRINGER. *International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming*. [S.l.], 2009. p. 344–351.
- FERREIRA, D. et al. Single-stage formulations for synchronised two-stage lot sizing and scheduling in soft drink production. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 136, n. 2, p. 255–265, abr. 2012. ISSN 09255273.
- FERREIRA, D.; MORABITO, R.; RANGEL, S. Solution approaches for the soft drink integrated production lot sizing and scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, Elsevier B.V., v. 196, n. 2, p. 697–706, jul. 2009. ISSN 03772217.
- FIGUEIRA, G.; SANTOS, M. O.; ALMADA-LOBO, B. A hybrid VNS approach for the short-term production planning and scheduling: A case study in the pulp and paper industry. *Computers & Operations Research*, v. 40, n. 7, p. 1804–1818, jul. 2013. ISSN 03050548.

- FIOROTTO, D. J.; ARAUJO, S. A. de. Reformulation and a lagrangian heuristic for lot sizing problem on parallel machines. *Annals of Operations Research*, v. 217, n. 1, p. 213–231, 2014. ISSN 1572-9338. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10479-014-1570-1>).
- FLEISCHMANN, B. The discrete lot-sizing and scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, v. 44, p. 337–348, 1990.
- FLEISCHMANN, B. The discrete lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent setup costs. *European Journal of Operational Research*, v. 75, n. 2, p. 395 – 404, 1994. ISSN 0377-2217. Lotsizing models for production planning. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221794900833>).
- FLEISCHMANN, B.; MEYR, H. The general lotsizing and scheduling problem. *OR Spektrum*, v. 19, p. 11–21, 1997.
- FMIG; LTD., C. P. *Moulded Fibre Pulp Packaging Market: F&B Packaging Segment to Retain Its Dominance Throughout the Forecast Period: Global Industry Analysis and Opportunity Assessment, 2016-2026*. [S.l.], 2017. Report ID: 4767928.
- FURLAN, M. et al. Unequal individual genetic algorithm with intelligent diversification for the lot-scheduling problem in integrated mills using multiple-paper machines. *Computers & Operations Research*, v. 59, p. 33 – 50, 2015. ISSN 0305-0548. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054814003293>).
- GAUDREAU, J. et al. Combined planning and scheduling in a divergent production system with co-production: A case study in the lumber industry. *Computers & Operations Research*, Elsevier, v. 38, n. 9, p. 1238–1250, set. 2011. ISSN 03050548.
- GICQUEL, C.; MINOUX, M.; DALLERY, Y. On the discrete lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent changeover times. *Operations Research Letters*, Elsevier B.V., v. 37, n. 1, p. 32–36, jan. 2009. ISSN 01676377.
- GICQUEL, C.; WOLSEY, L. A.; MINOUX, M. On discrete lot-sizing and scheduling on identical parallel machines. *Optimization Letters*, v. 6, n. 3, p. 545–557, fev. 2012. ISSN 1862-4472.
- GOREN, H. G.; TUNALI, S.; JANS, R. A review of applications of genetic algorithms in lot sizing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, v. 21, n. 4, p. 575–590, 2010. ISSN 1572-8145. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10845-008-0205-2>).
- GÖTHE-LUNDGREN, M.; LUNDGREN, J.; PERSSON, J. An optimization model for refinery production scheduling. *International Journal of Production Economics*, v. 78, p. 255–270, 2002.
- GUIMARAES, L.; KLABJAN, D.; ALMADA-LOBO, B. Modeling lotsizing and scheduling problems with sequence dependent setups. *European Journal of Operational Research*, v. 239, n. 3, p. 644 – 662, 2014. ISSN 0377-2217. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221714004251>).
- GUPTA, D.; MAGNUSSON, T. The capacitated lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent setup costs and setup times. *Computers & Operations Research*, v. 32, n. 4, p. 727 – 747, 2005. ISSN 0305-0548. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054803002648>).
- HAASE, K. Capacitated lot-sizing with sequence dependent setup costs. *Operations-Research-Spektrum*, Springer-Verlag, v. 18, n. 1, p. 51–59, 1996. ISSN 0171-6468. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/BF01539882>).

- HAJIZADEH, I.; LEE, C.-G. Alternative configurations for cutting machines in a tube cutting mill. *European Journal of Operational Research*, v. 183, n. 3, p. 1385 – 1396, 2007. ISSN 0377-2217.
- HANS, E.; VELDE, S. The lot sizing and scheduling of sand casting operations. *International Journal of Production Research*, v. 49, n. 9, p. 2481–2499, maio 2011. ISSN 0020-7543.
- HARJUNKOSKI, I. et al. Different formulations for solving trim loss problems in a paper-converting mill with ilp. *Computers & Chemical Engineering*, v. 20, Supplement 1, p. S121 – S126, 1996. ISSN 0098-1354.
- HARRIS, F. W. How Many Parts to Make at Once. *Factory, The Magazine of management*, v. 10, n. 2, p. 135–136, 152, 1913.
- HARRIS, F. W. How Much Stock to Keep on Hand. *Factory, The Magazine of management*, v. 10, p. 240–241, 281–284, 1913.
- HOOKER, J. N. Planning and scheduling by logic-based benders decomposition. *Operations Research, INFORMS*, v. 55, n. 3, p. 588–602, 2007.
- HOOKER, J. N.; OTTOSSON, G. Logic-based benders decomposition. *Mathematical Programming, Springer*, v. 96, n. 1, p. 33–60, 2003.
- IMFA. *International Molded Fiber Association*. 2017. Accessed: 2017-04-25. Disponível em: <http://www.imfa.org>.
- JANS, R.; DEGRAEVE, Z. An industrial extension of the discrete lot-sizing and scheduling problem. *IIE Transactions*, v. 36, n. 1, p. 47–58, 2004. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/07408170490247296>.
- JANS, R.; DEGRAEVE, Z. Meta-heuristics for dynamic lot sizing: A review and comparison of solution approaches. *European Journal of Operational Research*, v. 177, n. 3, p. 1855 – 1875, 2007. ISSN 0377-2217. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221705008416>.
- JANS, R.; DEGRAEVE, Z. Modeling industrial lot sizing problems: a review. *International Journal of Production Research*, v. 46, n. 6, p. 1619–1643, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/00207540600902262>.
- JOHNSON, L.; MONTGOMERY, D. *Operations research in production planning, scheduling, and inventory control*. Wiley, 1974. ISBN 9780471446187. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=EOFTAAAMA AJ>.
- KACZMARCZYK, W. Proportional lot-sizing and scheduling problem with identical parallel machines. *International Journal of Production Research*, v. 49, n. 9, p. 2605–2623, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2010.532929>.
- KARIMI, B.; GHOMI, S. F.; WILSON, J. The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms. *Omega*, v. 31, n. 5, p. 365–378, out. 2003. ISSN 03050483.
- KIMMS, A.; DREXL, A. Proportional lot sizing and scheduling: Some extensions. *Networks*, Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company, v. 32, n. 2, p. 85–101, 1998. ISSN 1097-0037. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0037\(199809\)32:2<85::AID-NET2>3.0.CO;2-E](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1097-0037(199809)32:2<85::AID-NET2>3.0.CO;2-E).
- KUIPER, J.; KOOPMANS, A. *Moulded fibre products comprising modified starch and process for producing the same*. [S.l.]: Google Patents, 2001. WO Patent App. PCT/NL2000/000,788.
- LUCHE, J. R.; MORABITO, R.; PUREZA, V. Combining process selection and lot sizing models for production scheduling of electrofused grains. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, v. 26, n. 3, p. 421–443, 2009.

- LUCHE, J. R. D.; MORABITO, R. Otimização na programação da produção de grãos eletrofundidos: um estudo de caso. *Gestão & Produção*, scielo, v. 12, p. 135 – 149, 04 2005. ISSN 0104-530X. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-530X2005000100012&nrm=iso).
- MARINELLI, F.; NENNI, M. E.; SFORZA, A. Capacitated lot sizing and scheduling with parallel machines and shared buffers: A case study in a packaging company. *Annals of Operations Research*, v. 150, n. 1, p. 177–192, jan. 2007. ISSN 0254-5330.
- MARTÍNEZ, K. Y.; TOSO, E. A.; MORABITO, R. Production planning in the molded pulp packaging industry. *Computers & Industrial Engineering*, v. 98, p. 554 – 566, 2016. ISSN 0360-8352.
- MARTÍNEZ, K. Y. P. et al. An exact optimization approach for an integrated process configuration, lot sizing and scheduling problem. 2017. Submitted to C&OR; in revision for the second round.
- MARTÍNEZ, K. Y. P.; MORABITO, R.; TOSO, E. A. V. A coupled process configuration, lot sizing and scheduling model for production planning in the molded pulp industry. 2017. Submitted to IJPE; in revision for the second round.
- MARTÍNEZ, K. Y. P.; TOSO, E. A. V. Planejamento da produção na indústria de embalagens de polpa moldada. *Gestão & Produção*, 2015. In press.
- MATEUS, G. R. et al. Capacitated lot sizing and sequence dependent setup scheduling: an iterative approach for integration. *Journal of Scheduling*, v. 13, n. 3, p. 245–259, 2010. ISSN 1099-1425. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10951-009-0156-2>).
- MEYR, H. Simultaneous lotsizing and scheduling on parallel machines. *European Journal of Operational Research*, v. 139, n. 2, p. 277 – 292, 2002. ISSN 0377-2217. {EURO} XVI: O.R. for Innovation and Quality of Life. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221701003733>).
- MEYR, H.; MANN, M. A decomposition approach for the general lotsizing and scheduling problem for parallel production lines. *European Journal of Operational Research*, v. 229, n. 3, p. 718 – 731, 2013. ISSN 0377-2217. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221713002695>).
- MILLAR, H. H.; YANG, M. Lagrangian heuristics for the capacitated multi-item lot-sizing problem with backordering. *International Journal of Production Economics*, v. 34, n. 1, p. 1 – 15, 1994. ISSN 0925-5273. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0925527394900426>).
- MORABITO, R.; PUREZA, V. Modelagem e simulação. In: _____. *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. cap. 8, p. 165–194. ISBN 978-85-352-3523-4.
- PAIVA, R. P. O.; MORABITO, R. Um modelo de otimização para o planejamento agregado da produção em usinas de açúcar e álcool. *Gestão & Produção*, SciELO Brasil, São Carlos, v. 14, n. 1, p. 25–41, 2007.
- PAIVA, R. P. O.; MORABITO, R. An optimization model for the aggregate production planning of a brazilian sugar and ethanol milling company. *Annals of Operations Research*, Springer, v. 169, n. 1, p. 117–130, 2009.
- PATTLOCH, M.; SCHMIDT, G.; KOVALYOV, M. Y. Heuristic algorithms for lotsize scheduling with application in the tobacco industry. *Computers & Industrial Engineering*, v. 39, n. 3-4, p. 235–253, abr. 2001. ISSN 03608352.
- PENDLEPACE-LTDA. *UK Market Review of Moulded Paper Pulp*. [S.l.], 2005.

- POCHET, Y.; WOLSEY, L. A. *Production planning by mixed integer programming*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2006.
- QUADT, D.; KUHN, H. Capacitated lot-sizing with extensions: a review. *4OR: A Quarterly Journal of Operations Research*, Springer, v. 6, n. 1, p. 61–83, 2008.
- SANTOS, M. O.; ALMADA-LOBO, B. Integrated pulp and paper mill planning and scheduling. *Computers & Industrial Engineering*, Elsevier Ltd, v. 63, n. 1, p. 1–12, ago. 2012. ISSN 03608352.
- SHI, L. et al. Refinery Production Scheduling Involving Operational Transitions of Mode Switching under Predictive Control System. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 53, p. 8155–8170, 2014.
- TOLEDO, C. et al. A genetic algorithm / mathematical programming approach to solve a two-level soft drink production problem. *Computers & Operations Research*, v. 48, p. 40–52, 2014.
- TOLEDO, C. F. M. et al. Mathematical programming-based approaches for multi-facility glass container production planning. *Computers & Operations Research*, v. 74, p. 92 – 107, 2016. ISSN 0305-0548. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054816300430>).
- TOLEDO, C. F. M. et al. Glass container production scheduling through hybrid multi-population based evolutionary algorithm. *Applied Soft Computing*, Elsevier B.V., v. 13, n. 3, p. 1352–1364, mar. 2013. ISSN 15684946.
- TOLEDO, F. M. B.; ARMENTANO, V. A. A lagrangian-based heuristic for the capacitated lot-sizing problem in parallel machines. *European Journal of Operational Research*, v. 175, n. 2, p. 1070 – 1083, 2006. ISSN 0377-2217. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221705005321>).
- TOSCANO, A.; FERREIRA, D.; MORABITO, R. A decomposition heuristic to solve the two-stage lot sizing and scheduling problem with temporal cleaning. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, Springer-US, 2017.
- TOSO, E. A. V.; MORABITO, R.; CLARK, A. Lot sizing and sequencing optimisation at an animal-feed plant. *Computers & Industrial Engineering*, Elsevier Ltd, v. 57, n. 3, p. 813–821, out. 2009. ISSN 03608352.
- TRANSCHEL, S. et al. A hybrid general lot-sizing and scheduling formulation for a production process with a two-stage product structure. *International Journal of Production Research*, v. 19, n. 9, p. 1–25, 2011.
- TRIGEIRO, W. W.; THOMAS, L. J.; MCCLAIN, J. O. Capacitated lot sizing with setup times. *Management Science*, v. 35, n. 3, p. 353–366, 1989. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.35.3.353>).
- WOLOSEWICZ, C.; DAUZÈRE-PÉRÈS, S.; AGGOUNE, R. A lagrangian heuristic for an integrated lot-sizing and fixed scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, v. 244, n. 1, p. 3 – 12, 2015. ISSN 0377-2217. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221715000545>).
- WOLSEY, L. A. *Integer Programming*. [S.l.]: Wiley, 1998. ISBN 0-471-28366-5.
- YANASSE, H. H.; MORABITO, R. Linear models for 1-group two-dimensional guillotine cutting problems. *International Journal of Production Research*, v. 44, n. 17, p. 3471–3491, 2006.
- ZHU, X.; WILHELM, W. E. Scheduling and lot sizing with sequence-dependent setup: A literature review. *IIE transactions*, Taylor & Francis, v. 38, n. 11, p. 987–1007, 2006.