



Edson Felipe Amado Fernandes

**Uma Nova Proposta para o Problema de
Remanejamento de Placas em um Pátio para
Atendimento de uma Laminação**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Alexandre Street de Aguiar

Rio de Janeiro

Maio de 2013



Edson Felipe Amado Fernandes

**Uma Nova Proposta para o Problema de
Remanejamento de Placas em um Pátio para
Atendimento de uma Laminação**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Alexandre Street de Aguiar
Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Silvio Hamacher

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. Fabrício Oliveira

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico

Rio de Janeiro, 29 de maio de 2013

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Edson Felipe Amado Fernandes

Graduou-se em Engenharia de Controle e Automação pela PUC-Rio em 2009. Trabalhou na Harsco Metals de 2007 a 2013, tendo atuado como Engenheiro de Projetos no Departamento Técnico-Comercial de Engenharia.

Ficha Catalográfica

Fernandes, Edson Felipe Amado

Uma nova proposta para o problema de remanejamento de placas em um pátio para atendimento de uma laminação / Edson Felipe Amado Fernandes; orientador: Alexandre Street de Aguiar. – 2013.

145 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2013.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Siderurgia. 3. Pátio de placas. 4. Laminação. 5. Remanejamento de placas entre pilhas. 6. Programação linear inteira. 7. Linearização I. Aguiar, Alexandre Street de. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

À Deus, minha família e minha Priscila, companheiros da minha vida terrena.

Agradecimentos

À Deus, pela grande oportunidade, sua bondade e fraternidade.

Aos meus pais que me puseram nesse mundo e se sacrificaram por inúmeras dificuldades para que eu chegasse até aqui.

À minha namorada Priscila, pelo respeito e amor que me transmite, caminhando ao meu lado todos os dias.

À minha querida avó Glória, fomentou meus estudos junto com meus pais.

À meus queridos avós Edson e Darci, sempre presentes na minha caminhada.

À meus amigos Aderson e Lucas, pela ajuda e incentivo nesse trabalho.

À meu querido irmão Raphael, grande amigo, sempre presente na minha caminhada.

Ao meu orientador, Prof. Alexandre, farol e exemplo, pela confiança no meu trabalho e autonomia proporcionada.

Ao meu chefe, Wilson Martins, pelo apoio e confiança concedidos durante o período do mestrado.

Resumo

Fernandes, Edson Felipe Amado; de Aguiar, Alexandre Street (Orientador). **Uma nova proposta para o problema de remanejamento de placas em um pátio para atendimento de uma laminação.** Rio de Janeiro, 2013. 145p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho desenvolve um novo modelo para um problema logístico de remanejamento de placas entre pilhas em um Pátio de Placas de uma Laminação, típico da indústria siderúrgica. Esta abordagem inclui uma nova característica que indica o destino das placas remanejadas. Uma nova metodologia de decisão altera sensivelmente o escopo do problema e traz um novo conceito: o balanço entre a escolha ótima das placas e o possível destino das placas remanejadas, ou seja, deve-se pesar a escolha da placa a ser laminada juntamente com a possibilidade de um bom remanejamento das placas que estão acima da mesma. Esse modelo não linear é linearizado por técnicas de linearização e resolvido através de programação linear inteira. Com isso, o estudo apresenta uma redução no tempo médio de manuseio de placas (*TMM*) de 5 minutos por placa laminada encontrado na literatura existente, para menos de 4 minutos. Finalmente o modelo proposto incentiva a construção de uma ferramenta de gestão que possa resolver o problema SSS em situações práticas do dia-a-dia através de redução de custo de operação como forma de viabilizar o investimento nesta ferramenta.

Palavras-chave

Siderurgia; pátio de placas; laminação; remanejamento de placas entre pilhas; programação linear inteira; linearização.

Abstract

Fernandes, Edson Felipe Amado; de Aguiar, Alexandre Street (Advisor). **New model for the slab stack shuffling problem inside the slab yard of a HRM.** Rio de Janeiro, 2010. 145p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work develops a new model for a typical logistic problem in the steel industry known as slab stack shuffling problem inside a Slab Yard of a Rolling Mill. This new approach includes a new feature that indicates the destination stacks of shuffled slabs. A new decision methodology changes significantly the scope of the problem and introduces a new concept: the balance between optimal choice of the rolled slabs and possible destinations for shuffled slabs which means it must weigh the choice of the slab to be rolled engaged with a low cost shuffle operation for the slabs that are above the chosen slab. This nonlinear model is linearized through specific modeling techniques and solved by integer linear programming. Thus, this work shows a reduction in average handling time (TM) from 5 minutes per rolled slab found in the literature, to less than 4 minutes. Finally, the proposed model encourages the construction of a management tool that can solve the SSS problem in practical daily situations through operating costs reduction as a payback of investment in this tool.

Keywords

Steel industry; slab yard; hot rolling mill; slab stack shuffling; integer linear programming; linearization techniques.

Sumário

1	Organização do trabalho	15
2	Placas de aço	17
2.1	Processo produtivo de placas de aço	17
2.2	Logística e destinação	22
2.3	Estocagem de placas	25
3	Laminação	29
3.1	O processo básico – transformando placas em bobinas	29
3.2	Programação e sequenciamento de instruções de laminação	33
4	O problema de remanejamento de placas (SSS)	39
4.1	Conceito de pátio de placas	39
4.2	Introdução ao problema SSS	47
4.3	Requisitos e premissas do problema SSS	55
5	Motivação	72
6	Objetivo	80
7	Contribuição	81
8	Modelagem da nova proposta para o problema SSS	83
8.1	Linearização do modelo proposto	104
8.2	Índices de complexidade do problema SSS	106
8.3	Linearização dos modelos da literatura	108
9	Resultados	114
9.1	Adaptação dos modelos comparativos	115
9.2	Testes com instâncias aleatórias	119
9.3	<i>Stress</i> da nova proposta	126
9.4	Análise preliminar de viabilidade econômica	128
10	Conclusão	136
11	Referências bibliográficas	138
12	Apêndice	140
12.1	Apêndice A - História e Panorama da Siderurgia	140

Lista de figuras

Figura 1 - Fluxo simplificado de produção de uma usina siderúrgica. Fonte: IABR.	17
Figura 2 - Máquina de Lingotamento Contínuo. Fonte: http://www.ametek-land.com/infrared/industries/hot-rolling-mill	19
Figura 3 - Níveis hierarquizados para decisão de agrupamentos em uma máquina de lingotamento contínuo (<i>three level hierarchy for batching decisions</i>). Fonte: [14]	20
Figura 4 - Saída da Máquina de Lingotamento Contínuo. Fonte: http://www.isam-ag.com/casting	20
Figura 5 - Numeração de identificação de uma placa de aço. Fonte: http://www.steelemotion.com/company/whassup/view/?id=11	21
Figura 6 – Entrada do forno de reaquecimento. Fonte: http://www.lase.nl/	23
Figura 7 - Braço robótico realizando o processo de escarfagem em uma placa de aço. Fonte: http://www.harsco-m.com/81/Scarfig.aspx	24
Figura 8 - Fluxo macro da destinação das placas entre os processos de lingotamento contínuo e laminação. Fonte: Autoria própria	25
Figura 9 - Pátio de placa real dividido em pilhas em forma cartesiana com uma ponte rolante para movimentação das placas. Fonte: Desconhecida	26
Figura 10 - Típica ponte rolante com implemento pinça para movimentação de placas de aço. Fonte: http://www.lase.nl/tag/slab/	27
Figura 11 - Processo de conformação mecânica. Fonte: Autoria própria	29
Figura 12 - Etapas de uma laminação de tiras a quente. Fonte: http://www.ametek-land.com/infrared/industries/hot-rolling-mill	30
Figura 13 - Bobina sendo posicionada para ser desbobina e entrar no processo do trem acabador. Fonte: http://www.dunaferr.hu/08-media/images/Coil_box.jpg	31
Figura 14 - Bobina Quente pronta para ser expedida. Fonte: Desconhecida	32
Figura 15 - Limite de variação de largura das placas de uma instrução (caixão de laminação) Fonte: [23]	35
Figura 16 - Típica sequência de instruções de laminação ‘turn’ ou caixões. Fonte: [7]	36
Figura 17 - <i>Trade-off</i> dos objetivos de uma laminador de tiras a quente. Fonte: Autoria própria	37
Figura 18 - Fluxo de transformação de placas de aço em bobinas dentro de uma usina siderúrgica. Fonte: Autoria própria	40
Figura 19 - Fluxo simplificado de movimentação de placas dentro do pátio. Fonte: Autoria própria	41

Figura 20- Vagão de transporte de placas entre o lingotamento contínuo e o pátio de placas. Fonte: http://www.metcocal.com/transomet.htm (editada)	41
Figura 21 - Carro de transferência. Fonte: http://www.aimmachinery.com/products.asp?pid=110&cid=6	43
Figura 22 - Mesa de rolos próxima ao pátio de placas. Fonte: http://www.lase.nl/measurement-solutions/steel-logistic/slab-material-tracking/	43
Figura 23 - Modelo cartesiano de um pátio de placas. Fonte: [8]	45
Figura 24 - Modelo de organização das pilhas de um pátio de placas (Vista superior). As pilhas em preto é uma representação para pilhas que possuem uma placa candidata escolhida para o processo de laminação. Fonte: [3]	46
Figura 25 - Típica pilha de placas. Fonte: [8] (adaptado)	47
Figura 26 - Sequência de tarefas de remanejamento (Shuffling task sequence). Fonte: [8] (adaptada)	48
Figura 27 - Exemplo de representação das placas candidatas que podem ser escolhidas para produzir a bobina $i = 1$. Fonte: Autoria própria	49
Figura 28 - Exemplo de atendimento de um pátio de placas com duas pilhas (τ_1 e τ_2), cada pilha com oito placas ($p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8$) e três bobinas ($\Omega = 3$). Fonte: Autoria própria	50
Figura 29 - Grafo algorítmico das possibilidades para o exemplo da Figura 28. Fonte: Autoria própria	53
Figura 30 - Grafo algorítmico das possibilidades para o exemplo da Figura 32 com a escolha do destino das placas remanejadas. Fonte: Autoria própria	54
Figura 31 - Exemplo da Figura 28 com as vistas laterais das pilhas do pátio, apresentando os remanejamentos necessários no atendimento das três bobinas do horizonte de programação, utilizando premissa dos trabalhos [2], [3], [4] e [8]. Fonte: Autoria própria	60
Figura 32 - A placa j é remanejada duas vezes no atendimento de duas bobinas diferentes. Fonte: Autoria própria	61
Figura 33 – Pilha exemplo de placas. Placa j_1 por cima da placa j_2 . Fonte: Autoria própria.	63
Figura 34 – Atendimento de duas bobinas (k e i), sendo a placa j_1 utilizada para a bobina k e a placa j_2 utilizada para a bobina i . Fonte: Autoria própria.	64
Figura 35 - Pilha exemplo de placas. Placa j_2 por cima da placa j_1 . Fonte: Autoria própria.	64
Figura 36 - Atendimento de 2 (duas) bobinas (k e i), sendo a placa j_1 utilizada para a bobina k e a placa j_2 utilizada para a bobina i . Fonte: Autoria própria.	65
Figura 37 - Exemplo do Caso 1. Fonte: Autoria própria	66
Figura 38 - Exemplo do Caso 2. Fonte: Autoria Própria	67
Figura 39 - Exemplo do Caso 3. Fonte: Autoria Própria	68

Figura 40- Pilha com as placas j, p, l, v . Fonte: Autoria própria	85
Figura 41 – Restrição de remanejamento. Atendimento da bobina m com a placa v . A placa l necessita ser remanejada. Fonte: Autoria própria	92
Figura 42 - Restrição de remanejamento. Atendimento da bobina k com a placa j . A placa l necessita ser remanejada novamente. Fonte: Autoria própria	92
Figura 43 - Restrição de remanejamento. Atendimento da bobina m com a placa v . A placa l e a placa p necessitam ser remanejadas. Fonte: Autoria própria	93
Figura 44 - Restrição de remanejamento. Atendimento da bobina n com a placa p . A placa l necessita ser remanejada novamente. Fonte: Autoria própria	94
Figura 45 - Restrição de remanejamento. Atendimento da bobina c com a placa j e da bobina m com a placa v . A placa p e a placa l necessitam ser remanejadas. Fonte: Autoria própria	95
Figura 46 - Restrição de remanejamento. Atendimento da bobina i com a placa p . A placa l necessita ser remanejada novamente. Fonte: Autoria própria	95
Figura 47 - Restrição de remanejamento. Atendimento da bobina m com a placa v . A placa l necessita ser remanejada. Fonte: Autoria própria	96
Figura 48 - Restrição de remanejamento. Atendimento da bobina m com a placa j e da bobina i com a placa v . A placa p e a placa l necessitam ser remanejadas. Fonte: Autoria própria	97
Figura 49 - Restrição de remanejamento. Atendimento da bobina i com a placa v . A placa l e a placa p necessitam ser remanejadas. Fonte: Autoria própria	100
Figura 50 - Restrição de remanejamento. Atendimento da bobina n com a placa p . A placa l necessita ser remanejada novamente. Fonte: Autoria própria	100
Figura 51 - Restrição de remanejamento. Atendimento da bobina i com a placa j . A placa l necessita ser remanejada. Fonte: Autoria própria	102
Figura 52 – Restrição de Custo de Remanejamento. A placa l já foi remanejada para a pilha τ no atendimento da bobina k . Fonte: Autoria própria.	102
Figura 53 - Restrição de Custo de Remanejamento. A placa l já foi remanejada para a pilha τ no atendimento da bobina k . Fonte: Autoria própria.	103
Figura 54 – Vista lateral e superior de um pátio de placas exemplo, com a mesa de rolos localizado no canto direito do pátio. A placa $r2$ é uma placa morta e a placa $j2$ é uma placa candidata a uma bobina k , onde $k > i$. A placa l é candidata a bobina i . Fonte: Autoria própria.	117
Figura 55 - A placa $r2$ é remanejada para a pilha $\tau1$ e a placa $j2$ é remanejada para a pilha $\tau2$. A placa l é levada para a mesa de rolos para atender a bobina i . Fonte: Autoria própria.	118

Figura 56 – Evolução da Produção de Aço de 1950 a 2010. Fonte: [17] - IABR	140
Figura 57 - Dados do Mercado Siderúrgico Brasileiro em 2011. Fonte: [17] – IABR.	142
Figura 58 - Consumo per capita de aço. Fonte: [17] – IABR	143
Figura 59 - Evolução recente da indústria brasileira do aço. Fonte: [17] – IABR.	144

Lista de tabelas

Tabela 1 - Objetivos principais do processo de laminação. Fonte: Autoria própria.....	34
Tabela 2 - Cronograma de recebimento de placas.....	57
Tabela 3 - Velocidade média dos módulos da ponte rolante Fonte: Usiminas Cubatão.....	71
Tabela 4 - Tabela verdade para o produto de variáveis binárias. Fonte: Autoria própria	104
Tabela 5 - Variação dos índices de complexidade em três níveis. Fonte: Autoria própria.	120
Tabela 6 - Testes realizados variando o índice <i>QB</i>	121
Tabela 7 – Resultados dos testes realizados variando o índice <i>QB</i>	121
Tabela 8 - <i>TMM</i> em minutos para os testes realizados variando o índice <i>QB</i>	122
Tabela 9 - Testes realizados variando o índice <i>MCB</i>	122
Tabela 10 – Resultado dos testes realizados variando o índice <i>MCB</i>	123
Tabela 11 - <i>TMM</i> em minutos dos testes realizados variando o índice <i>MCB</i>	124
Tabela 12 - Testes realizados variando o índice <i>FP</i>	124
Tabela 13 – Resultados dos testes realizados variando o índice <i>FP</i>	124
Tabela 14 – <i>TMM</i> em minutos dos testes realizados variando o índice <i>FP</i>	125
Tabela 15 - Média geral para todos os 9 testes da métrica <i>TMM</i> em minutos.....	126
Tabela 16 - Cenário <i>Stress</i>	127
Tabela 17 - Testes realizados com o cenário <i>stress</i>	127
Tabela 18 - Resumo do <i>TMM</i> para os testes do cenário <i>stress</i>	128
Tabela 19 - Números de produção da usina fictícia.	130
Tabela 20 - Produtividade do LTQ da usina fictícia.	130
Tabela 21 - Número de instruções e horas de ponte rolante utilizando <i>TMM</i> = 3,79.....	131
Tabela 22 - Número de instruções e horas de ponte rolante utilizando <i>TMM</i> = 5,09	131
Tabela 23 - Comparação dos índices operacionais e financeiros da nova proposta com o algoritmo Guloso [8] – Adaptado.	132
Tabela 24 - CAPEX esperado para implantação da nova proposta.....	132
Tabela 25 - OPEX mensal esperado para implantação da nova proposta.	133

Tabela 26 - Premissas financeiras utilizadas para cálculo dos retornos financeiros do projeto. 134

Tabela 27 - Retornos financeiros do projeto de implantação da nova proposta para o modelo SSS..... 134

Organização do trabalho

Esta dissertação foi dividida em doze capítulos. O capítulo dois apresenta todo o processo produtivo de placas de aço. Além disso, toda a logística, destinação e estocagem das placas são discutidas com intuito de apresentar as etapas predecessoras de um pátio de placas: preparação de cargas, redução, refino e lingotamento contínuo.

Antes de apresentarmos o problema SSS e os conceitos do pátio de placas, o capítulo três apresenta a etapa sucessora do mesmo: laminação. O processo fundamental de transformação de placas de aço em bobinas é apresentado com o intuito de explicar a forma como se comporta a demanda por placas provenientes do pátio de placas.

Após apresentação das etapas predecessora e sucessora, o capítulo quatro conceitua as boas práticas de comissionamento de um pátio de placas, enquadra o problema SSS dentro do processo siderúrgico e explica sua relevância e formas de atuação.

Nos capítulos cinco, a motivação é apresentada em dois passos: primeiramente apresentando-se fatores e argumentos da economia recente do Brasil no contexto da indústria siderúrgica, e por último uma revisão literária na qual são apontadas as lacunas nos trabalhos existentes como motivação para a modelagem apresentada nesta dissertação.

Nos capítulos seis e sete, são apresentados os objetivos e contribuições desta dissertação, respectivamente.

No capítulo oito, é apresentada a modelagem objeto desta dissertação, preenchendo as lacunas da literatura apresentada no capítulo cinco, na busca de reduzir ainda mais o custo de movimentação de placas. A última seção deste capítulo apresenta a linearização através de técnicas de programação binária de alguns modelos do problema SSS propostos previamente na literatura (até o momento em que foi escrita essa dissertação). Estes modelos foram remodelados para a forma linear de forma eficaz, sem necessidade de linearização ou utilização de técnicas não lineares para resolução.

No capítulo nove a nova proposta é colocada em teste, sendo realizados testes aleatórios com intuito de quantificar reduções de custo e por último um estudo de caso com análise preliminar de viabilidade econômica de projeto é realizado para uma usina siderúrgica fictícia similar a uma usina de grande porte produtora de aços planos no Brasil.

No capítulo dez as conclusões são feitas, resumindo a contribuição e os objetivos que foram alcançados neste trabalho.

No apêndice A é apresentada um levantamento da história e panorama da indústria siderúrgica brasileira com intuito de corroborar a necessidade atual de a indústria siderúrgica investir no desenvolvimento de estudos de redução de custo interno de operação, como por exemplo, o estudo do problema SSS.

2

Placas de aço

2.1

Processo produtivo de placas de aço

A matéria prima para produção de uma placa é o aço. O aço é produzido a partir de minério de ferro, sucata, carvão e cal [17]. A cadeia de produção do aço pode ser dividida basicamente em cinco macro etapas: preparação de cargas, redução, refino, lingotamento e laminação [17]. Estas etapas são apresentadas de forma simplificada no fluxo de produção da Figura 1 abaixo:

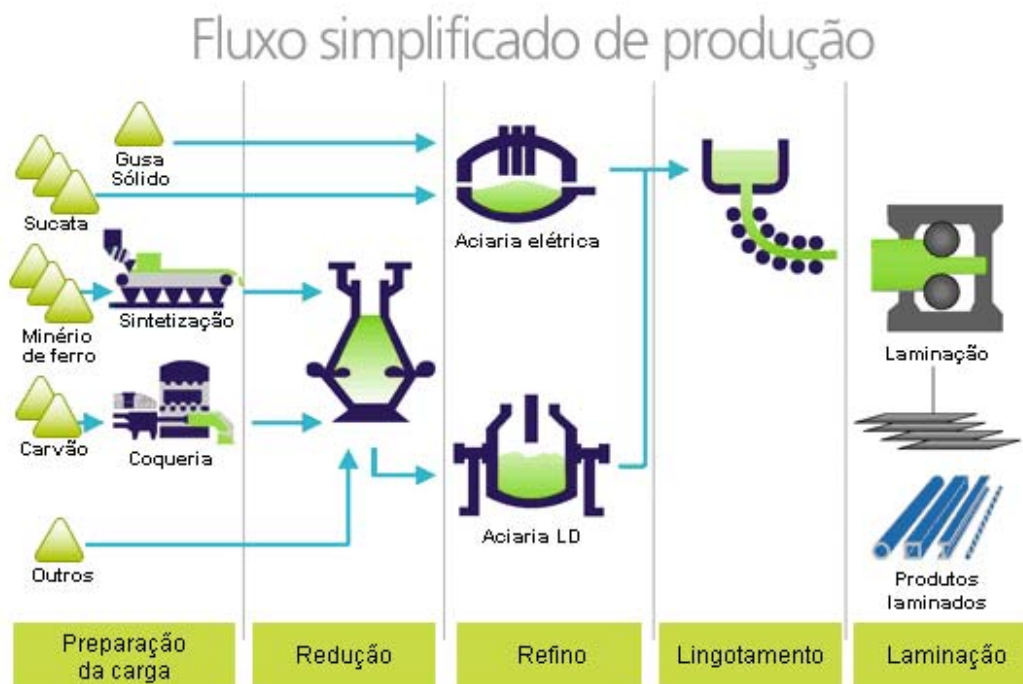


Figura 1 - Fluxo simplificado de produção de uma usina siderúrgica. Fonte: IABR.

O processo de produção de aço começa com a entrada de sínter (minério de ferro aglomerado proveniente da sinterização) e carvão no alto forno para o processo de redução. O produto desta etapa é o ferro gusa líquido, que por sua vez é transportado neste mesmo estado da matéria até a aciaria [17]. Na aciaria ocorre a etapa de refino onde se transforma o ferro gusa líquido e a sucata de ferro

(insumo sólido que entra nesta etapa do processo) em aço líquido. O aço líquido é produzido em corridas, sendo uma corrida uma panela de aço líquido com certa quantidade fixa de toneladas de aço. Essa quantidade é função da capacidade produtiva da usina (basicamente capacidade dos fornos da aciaria). Atualmente no Brasil, a usina que produz mais quantidade de aço em uma corrida é a CSA (Companhia Siderúrgica do Atlântico) que possui 3 fornos de 360 toneladas cada em sua aciaria [21]. Neste caso, a corrida (panela) possui 360 toneladas de aço líquido.

Após a etapa de refino, as duas últimas etapas (lingotamento e laminação) são etapas de conformação mecânica do aço. As panelas são transportadas, uma a uma, para uma máquina de lingotamento conhecida como máquina de lingotamento contínuo que tem como objetivo final solidificar o aço em produtos semiacabados, como por exemplo, as placas de aço. Este processo é também conhecido como lingotamento contínuo. Cada panela de aço é posicionada em uma torre giratória com capacidade de receber até duas panelas por vez. O aço líquido refinado presente em cada panela é transferido por uma válvula gaveta refratada localizada no fundo da mesma para um recipiente conhecido como distribuidor. Este recipiente tem como funções, distribuir o aço líquido entre os múltiplos veios, promover a flotação das inclusões, suprir o molde de um fluxo constante de aço líquido e servir de reservatório durante as trocas de panelas [22]. Desta forma, o distribuidor permite que se alimentem de forma suave e constante os moldes da máquina de lingotamento. Os moldes são refrigerados a água e trabalham num movimento oscilatório que não permite a aderência do metal líquido as suas paredes. O metal então começa a se refrigerar e formar uma única placa inteiriça a ser conformada pelos rolos de lingotamento contínuo. As placas de aço surgem a partir do corte da placa inteiriça em vários pedaços, criando-se naturalmente uma sequência de placas. Esta fase é a primeira discretização do processo siderúrgico, onde o aço no estado líquido se transforma em placas de aço solidificadas. Desta forma, uma corrida, ou seja, uma panela de aço, é transformada pelo processo de lingotamento em várias placas de aço (como exemplo, no caso da CSA, para placas com peso médio de 15 toneladas, teríamos 24 placas a cada panela lingotada); e finalmente estas placas são os produtos de saída desta etapa de produção. A Figura 2 abaixo apresenta um esquema de uma máquina de lingotamento contínuo.

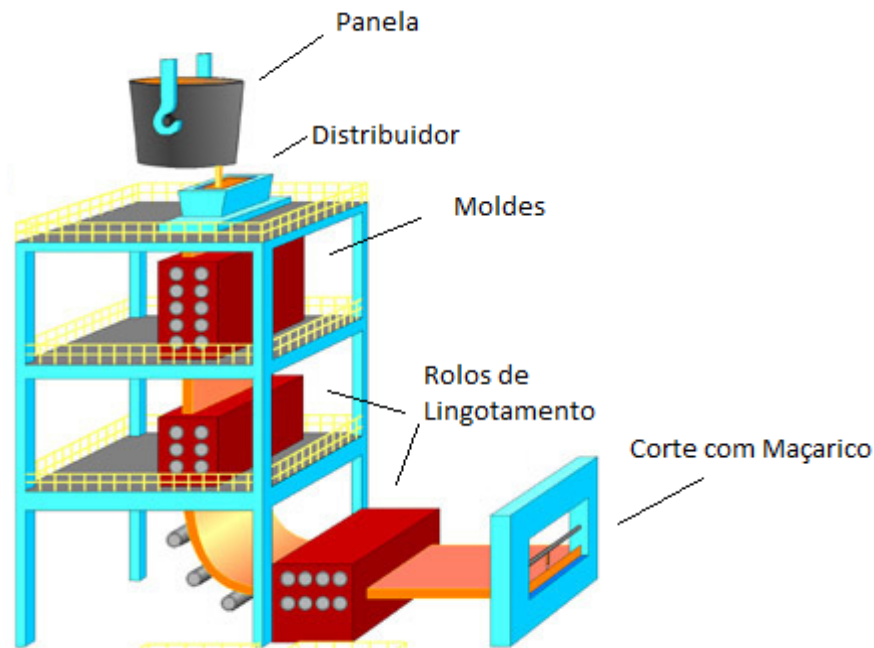


Figura 2 - Máquina de Lingotamento Contínuo. Fonte: <http://www.ametek-land.com/infrared/industries/hot-rolling-mill>

Essas placas de aço possuem dimensões diversas e diferentes características físico-químicas em função dos tipos de aço que se deseja produzir. Esta variedade é função exclusiva dos pedidos dos clientes finais por diferentes produtos laminados, ou por pedidos padrões de placas de aço de uso comum nos mercados interno e externo.

Tang apresentou em seu trabalho [14] como os pedidos dos clientes são agrupados para se constituir cada corrida da aciaria. Este processo foi chamado de ‘hierarquia de três níveis para decisão de agrupamento’ (*three level hierarchy for batching decisions*). Primeiramente, os pedidos de placas similares dos clientes (*set of orders*) são agrupados em um grupo de placas de mesma característica (*set of slabs*), posteriormente é criado um conjunto de corridas que abrangem esse grupo (*set of charges*), e por último essas corridas são sequenciadas na máquina de lingotamento contínuo para serem produzidas em sequência (*set of casts*). A Figura 3 abaixo resume estas etapas:

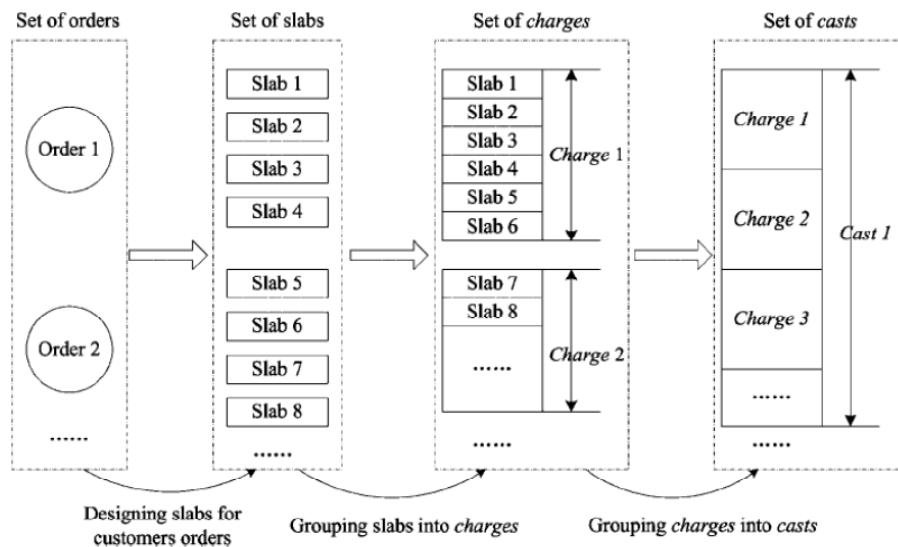


Figura 3 - Níveis hierarquizados para decisão de agrupamentos em uma máquina de lingotamento contínuo (*three level hierarchy for batching decisions*). Fonte: [14]

Na Figura 4, é apresentada em foco uma típica placa de aço sendo esta lingotada por uma máquina de lingotamento, ainda em processo de solidificação, logo após o corte, sendo encaminhada para fora da máquina de lingotamento contínuo. Ao fundo, no lado esquerdo desta mesma figura, é possível visualizarmos a mesa de saída de outra máquina de lingotamento contínuo com uma placa sendo cortada durante o processo de lingotamento.



Figura 4 - Saída da Máquina de Lingotamento Contínuo. Fonte: <http://www.isam-ag.com/casting>

Essas placas são cortadas em diversos comprimentos de acordo com os pedidos dos clientes (por placas ou produtos laminados). Após o corte, as placas uma a uma são encaminhadas para um entreposto de identificação e etiquetagem. Elas são identificadas com um número de série que identifica a corrida que a originou e a numeração sequencial da mesma dentro desta corrida. Esta identificação pode ser manual ou automática, variando de usina para usina. Além disso, as placas possuem outros atributos importantes como peso, comprimento, largura, espessura, tipo de aço, que são constantes, e temperatura que é uma variável ao longo do tempo. Esses demais atributos são armazenados no banco de dados da usina, após a fase de identificação.



Figura 5 - Numeração de identificação de uma placa de aço. Fonte: <http://www.steelemotion.com/company/whassup/view/?id=11>

A etapa de identificação e inspeção é crucial e mandatória para controle de inventário e de logística interna das placas. O processo de lingotamento é um processo contínuo de produção de placas e, portanto, sem identificá-las e inspecioná-las, seria impossível rastreá-las e controlá-las após este processo. À medida que cada placa é identificada e inspecionada, estas podem seguir diferentes caminhos até chegarem à próxima etapa, laminação. Portanto, entre os processos de lingotamento e laminação, as placas passam por processos distintos e, por conseguinte seguem caminhos e tempos diferentes antes de chegarem à etapa de laminação.

O processo de laminação é a última macro etapa da transformação do aço. Nesta etapa, as placas de aço são deformadas mecanicamente e transformadas em produtos siderúrgicos utilizados pela indústria de transformação, como chapas grossas e finas, bobinas, etc. Esta etapa é responsável por transformar as placas em produto acabado e será detalhada no capítulo 3 dessa dissertação.

2.2

Logística e destinação

Após o processo de lingotamento e identificação, as placas podem seguir cinco processos logísticos distintos: laminação direta, ‘*hot charge*’, ‘escarfagem’, expedição ou sucateamento. Na etapa de identificação e inspeção, cada placa é direcionada para um desses processos em função de fatores como: estado físico das placas, temperatura e condições para não sucateamento.

No primeiro processo, as placas são encaminhadas diretamente para a laminação, sendo colocadas diretamente na mesa de rolos para início do processo de produção de bobinas. As placas neste caso, após lingotadas, não devem tardar mais de 5 minutos para iniciarem o processo de laminação. O motivo é a temperatura, uma vez que este é o tempo máximo típico para que as placas não necessitem de reaquecimento. Somente placas que apresentem qualidades internas e de superfície adequadas podem correr por esse processo [12]. Este caminho é raramente utilizado pelas usinas uma vez que poucas placas se encaixam nesses requisitos de qualidade e muitas vezes a laminação é distante da área de lingotamento e fatalmente as placas perdem temperatura.

No segundo processo, o *hot charge*, as placas são encaminhadas diretamente para o pátio de placas e posteriormente para o forno de reaquecimento da laminação. O processo *hot charge* por sua vez é bem parecido com o processo de laminação direta, entretanto os requisitos padrões são mais folgados e um maior tempo antes de se iniciar a laminação é permitido. Para inspeção imediata desses requisitos, máquinas de inspeção óticas, que conseguem identificar rapidamente a presença de defeitos de fabricação, são utilizadas [12]. Ainda no processo *hot charge*, este pode ser dividido em dois tipos: direto e de curto prazo. A única diferença entre eles é o tempo que será necessário para reaquecer as placas antes da etapa de laminação.

No terceiro processo, processo de escafagem, as placas sofrem tratamento de superfície para remoção de defeitos e depois são encaminhadas para o pátio de placas. No quarto processo, as placas são expedidas para fora da usina por navio ou por modal rodoviário, sendo vendidas como produto semiacabados no mercado interno ou externo. No quinto processo, as placas que não atende os requisitos mínimos de qualidade são sucateadas e encaminhadas para o pátio de sucata para que possam ser processadas e dimensionadas como sucata de retorno e entrem na etapa de refino do aço novamente.

Em uma usina com foco em produção de produtos acabados, entre os processos dois e três apresentados, tipicamente 70% das placas passam pelo segundo processo e 30% pelo terceiro. Esses números variam de usina para usina e tipicamente dependem da capacidade de cada usina de realizar o segundo processo, processo de *hot charge*. O processo *hot charge* é considerado um método eficiente de redução no consumo de energia. Neste processo as placas são transportadas diretamente para o forno de reaquecimento com temperatura mais próxima da temperatura de laminação e, portanto, exigem menos tempo e energia para reaquecimento [12]. A Figura 6 abaixo apresenta o início de uma típica mesa de rolos para enforamento.



Figura 6 – Entrada do forno de reaquecimento. Fonte: <http://www.lase.nl/>

Já as placas que sofrem o processo de escafagem, passam por uma série de processos mecânicos que depende exclusivamente da qualidade superficial das placas lingotadas. O processo de escafagem é um processo conhecido na indústria como ‘*cold charge*’. Trata-se de um processo de retirada de defeitos da superfície da placa a partir de oxi-corte com vara de oxigênio. Maçariqueiros¹ utilizam essas varas para retirar manualmente os defeitos superficiais encontradas durante o processo de inspeção, através da tecnologia da chama. Ultimamente empresas especializadas neste processo tem procurado o desenvolvimento de processos automáticos de escafagem com robô na busca de aumento de produtividade, segurança e qualidade. A Figura 7 abaixo é apresentada uma máquina de escafagem trabalhando uma das faces de uma placa.



Figura 7 - Braço robótico realizando o processo de escafagem em uma placa de aço.
Fonte: <http://www.harsco-m.com/81/Scarfig.aspx>

Cada placa é tratada individualmente e pode sofrer escafagem em uma ou todas as suas seis faces. Desta forma cada placa pode demorar tempos diferentes até estar pronta para ser encaminhada para o processo de laminação. Na Figura 8 abaixo é apresentando um fluxo macro da destinação das placas após o processo de lingotamento contínuo.

¹ Funcionários especializados em realizar o processo de ‘escafagem’ utilizando varas de oxigênio para corte.

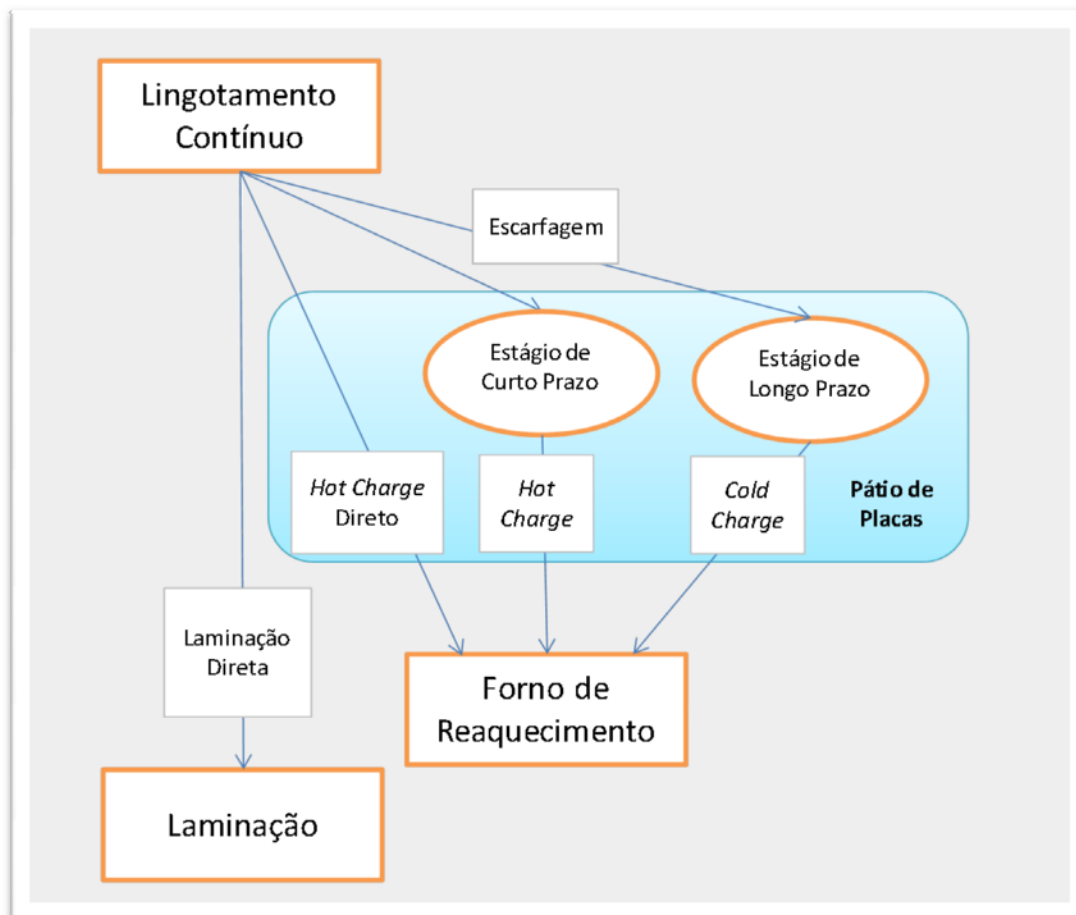


Figura 8 - Fluxo macro da destinação das placas entre os processos de lingotamento contínuo e laminação. Fonte: Autoria própria

Em exceção as placas que são destinadas ao processo de Laminação direta, todas as placas são estocadas em um pátio antes de serem reaquecidas e laminadas. A próxima seção será discutida sobre todas as etapas envolvidas para estocagem de placas no pátio.

2.3

Estocagem de placas

O local de estocagem destas placas é conhecido como pátio de placas. O pátio de placas é basicamente uma área de armazenamento intermediário de placas que não tem como função agregar valor a placa de aço. Este pátio se faz necessário para funcionar como um pulmão para o processo de laminação, uma vez que, este processo funciona em ritmo de bateladas (instruções de laminação), possuindo paradas programadas para ajustes de produção (*set-up*) entre estas

bateladas. Este pátio exerce papel fundamental na alimentação de um laminador uma vez que garante a continuidade do processo de laminação independente das placas provenientes das corridas produzidas na aciaria. A capacidade de estocagem e movimentação por hora deste pátio é um fator importante dentro de uma usina. Estas capacidades garantem que o pátio não será um gargalo no processo de laminação de placas.

Ao chegarem ao pátio de placas, independente da origem, as placas são estocadas em formato de pilhas. O formato de pilhas é largamente utilizado pelas usinas uma vez que é uma forma de se otimizar espaço e conter a perda de calor das placas para o ambiente [12]. As placas são geralmente armazenadas em pilhas de até 15 placas. As pilhas são identificadas e cada placa em cada pilha é passível de rastreamento. As pilhas geralmente estão dispostas uma ao lado da outra em forma cartesiana, em linhas e colunas. As pilhas também servem como estoque intermediário para remanejamento de placas durante o processo de atendimento de uma instrução de laminação. Este processo de remanejamento de placas entre pilhas foi apresentado e intitulado em [2] como *slab stack shuffling problem (SSS)* sendo este assunto o escopo principal de estudo deste trabalho. No capítulo 4 desta dissertação este problema será descrito com os detalhes pertinentes a otimização proposta.

A Figura 9 abaixo apresentam respectivamente um pátio de placas real com um equipamento conhecido como ponte rolante para movimentação dessas placas.



Figura 9 - Pátio de placa real dividido em pilhas em forma cartesiana com uma ponte rolante para movimentação das placas. Fonte: Desconhecida

A ponte rolante é um equipamento de movimentação de cargas suspensas localizadas sobre o pátio de sucata que pode movimentar cargas nas três dimensões. Este equipamento cobre todo o espaço físico do pátio de placas além da mesa de rolos para enformamento. Desta forma, este equipamento tem acesso a todas as pilhas do pátio e pode movimentar placas entre diferentes alturas, linhas e colunas (remanejar entre pilhas), além de obviamente movimentar placas para a própria mesa de rolos. A mesa de rolos exerce o papel de transferência das placas para fora do pátio de placas encaminhando as placas para o forno de reaquecimento na primeira etapa do processo de laminação. A Figura 10 abaixo apresenta um tipo de ponte rolante utilizada na movimentação de placas em um pátio de placas.



Figura 10 - Típica ponte rolante com implemento pinça para movimentação de placas de aço. Fonte: <http://www.lase.nl/tag/slab/>

Para suportar as placas, implementos são utilizados nos ganchos de movimentação das pontes rolantes. Geralmente são utilizados implementos como pinça ou eletroímã. Ambos têm o papel principal de manter a placa segura a ponte rolante durante o processo de movimentação.

Uma vez que cada placa passa por etapas diferentes antes de chegar ao pátio de placas - umas são diretamente encaminhadas no processo de *hot charge* e outras passam por processos intermediários - é natural acontecer nas pilhas do pátio o embaralhamento das placas provenientes de uma mesma corrida da aciaria. Cada placa que chega ao pátio é obviamente empilhada nas primeiras pilhas

disponíveis. Além disso, é comum existir dois pátios de placas separados pela mesa de rolos. O motivo é facilitar a logística de entrada e saída de placas no pátio. Enquanto um lado do pátio recebe placas o outro abastece a mesa de rolos e vice e versa.

Portanto, seja na prática ou na teoria, é praticamente impossível termos uma pilha com placas provenientes de uma mesma corrida. Conseqüentemente, estas placas se encontraram espalhadas no pátio. O embaralhamento das placas no pátio é natural e inevitável. Poderíamos nos perguntar o motivo pelo qual não se estuda uma forma de evitar o embaralhamento ao invés de tentarmos minimizar seus efeitos em uma etapa posterior. O motivo é simples, o embaralhamento é normal e inerente, pois cada placa passa por um processo distinto em função da logística de destinação do processo siderúrgico detalhado na seção anterior, ou seja, não é por uma falta de otimização logística na chegada das placas ao pátio.

Além disso, será mostrado no capítulo 3 dessa dissertação que a etapa de laminação possui objetivos divergentes na escolha do critério de sequenciamento e programação de produção em relação aos objetivos das etapas de refino e lingotamento. Portanto, mesmo que fosse possível evitar o embaralhamento de placas provenientes de uma mesma corrida, a saída das placas do pátio para a etapa de laminação não evitaria a necessidade de remanejamento das placas durante o processo de atendimento desta próxima etapa.

Desta forma, este trabalho ganha espaço no desenvolvimento de um modelo de otimização que procura minimizar os efeitos do embaralhamento do pátio através da redução do tempo total de movimentação de placas no pátio durante o atendimento de um horizonte de programação de bobinas (uma instrução de laminação).

O embaralhamento das placas no pátio demonstrado pela teoria é encontrado também na prática dentro das siderúrgicas, sendo, portanto, uma premissa para o problema de otimização que será proposto neste trabalho. Finalmente, a forma como o pátio de placas é montado, ou seja, a maneira como diferentes placas chegam ao pátio e são dispostas nas pilhas disponíveis do pátio, fecha a concepção básica da existência e da organização de um pátio de placas. O próximo passo, no capítulo 3, é detalhar como se constrói a demanda pela qual essas placas saem do pátio durante o atendimento da próxima etapa: a etapa de laminação.

3

Laminação

3.1

O processo básico – transformando placas em bobinas

A laminação é o processo fundamental de transformação de placas de aço em bobinas. As bobinas são geradas a partir da conformação mecânica dessas placas de aço por cilindros de trabalho em um processo de estreitamento e consequente alargamento das placas com posterior enrolamento em formato cilíndrico. O processo de conformação mecânica é simplesmente a redução de espessura da placa através de aplicação de força de trabalho por cilindros girantes espaçados por uma distância menor que a espessura de entrada da placa. A Figura 11 abaixo apresenta o esquema básico da conformação mecânica.

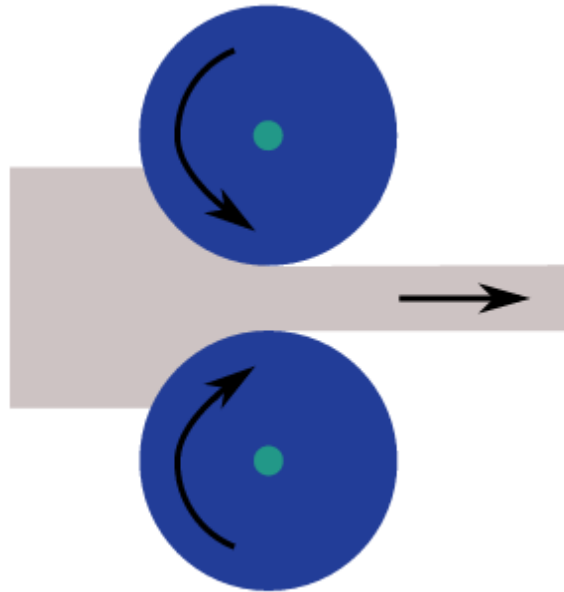


Figura 11 - Processo de conformação mecânica. Fonte: Autoria própria

A barra é naturalmente puxada pelos cilindros no sentido de saída devido das forças de atritos entre as superfícies de contato. O objetivo é produzir chapas de determinada espessura a partir de placas. A redução é progressiva, em vários

passos e sempre num mesmo plano, a cada passo reduz-se cada vez mais a espessura em relação ao início do processo.

O processo de laminação é classificado de acordo com a temperatura do material a ser laminado. Se a temperatura do material é acima da sua temperatura de cristalização do aço, então o processo de laminação é a quente. Caso contrário, se a temperatura é abaixo, o processo de laminação é a frio. A laminação a quente é sempre seguida pela laminação a frio. Caso a espessura da tira necessite de espessuras cada vez menores, o processo de laminação a frio é utilizado em uma próxima etapa.

A laminação a quente é realizado em um processo conhecido como ‘laminação de tiras a quente’. Este processo possui basicamente as seguintes etapas/equipamentos: forno de reaquecimento, laminação de desbaste, bobinadeira e trem acabador. A Figura 12 abaixo apresenta o layout típico de uma laminação de tiras a quente.

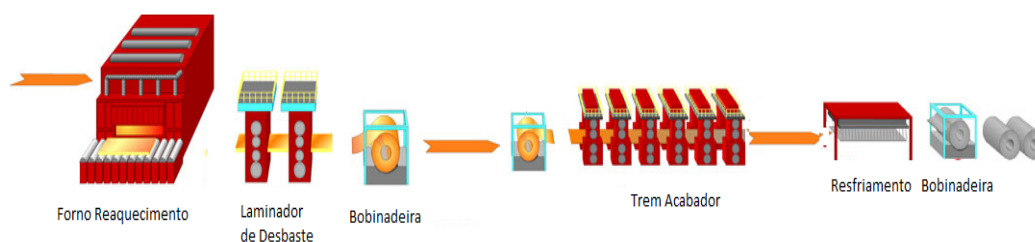


Figura 12 - Etapas de uma laminação de tiras a quente. Fonte: <http://www.ametek-land.com/infrared/industries/hot-rolling-mill>

As placas de aço, em função da destinação que cada uma passou após o processo de lingotamento contínuo, são reaquecidas até uma temperatura de aproximadamente 1250 graus célsius em fornos conhecidos como fornos de reaquecimento. Esta temperatura é denominada temperatura de saída, ou de processamento, pois é a temperatura ideal para que a placa seja processada nas próximas etapas da laminação. A temperatura de carregamento, juntamente com a temperatura de saída e a espessura da placa, determina o tempo de processamento de cada placa em um forno de reaquecimento, sendo denominado ‘tempo de residência’ [15]. Esse tempo de residência impacta diretamente no processo de enformamento, uma vez que é necessário aguardá-lo para que uma próxima placa possa ser enformada. Caso a placa já esteja na temperatura de laminação

(proveniente do processo de Laminação Direta), a etapa de forno de reaquecimento é desnecessária.

Na próxima etapa, ‘laminação de desbaste’, as placas passam por um único cilindro robusto de laminação. Neste processo as placas são reduzidas de um intervalo de espessura de 200 a 250 mm para um intervalo de 20 mm a 40 mm tornando-se uma chapa grossa longitudinal aquecida após tipicamente cinco passadas pelo cilindro, para frente e para trás. Se uma placa, por exemplo, tiver 11 metros de comprimento, após a redução de espessura apresentada, esta poderá chegar até 80 metros de comprimento. Posteriormente, as placas laminadas são enroladas em formato cilíndrico em uma bobinadeira concebendo-se uma chapa grossa aquecida em forma de bobina.

Após esta etapa, as mesmas são encaminhadas para o trem acabador. A Figura 13 abaixo apresenta uma chapa grossa aquecida sendo desbobinada e em seguida encaminhada para entrada do trem acabador.



Figura 13 - Bobina sendo posicionada para ser desbobinada e entrar no processo do trem acabador. Fonte: http://www.dunaferr.hu/08-media/images/Coil_box.jpg

O trem acabador é formado por uma cadeia de cilindros de laminação, tipicamente de 5 a 7 cilindros em série [15]. Em uma só passada, a chapa é laminada em espessuras ainda menores variando entre 16 mm a 1,8 mm estando a uma temperatura de aproximadamente 600 graus célsius no fim da linha do trem acabador. Após o trem acabador, as chapas são resfriadas à temperatura ambiente e bobinadas novamente sendo o produto final chamado de ‘BQ’ (bobina a quente). Obviamente, devida a essa nova redução em espessura, às bobinas aumentam de comprimento consideravelmente podendo passar da ordem de quilômetros [15].

Na Figura 14 é apresentada uma típica BQ. Muitos clientes vendem a BQ como produto acabado, sendo esta uma ‘*commodite*’ no mercado internacional. Metade da produção das usinas geralmente é dedicada à produção de BQ para venda direta. A outra metade é levada ainda na forma de BQ para as etapas de laminação a frio. Essa última basicamente reduz ainda mais a espessura da chapa em um processo de conformação mecânica similar ao apresentado anteriormente. Os produtos resultantes desta etapa são bobinas a frio (BF) ou chapas grossas (CG) a depender da especificação dos clientes. As chapas grossas são produzidas a partir do corte em pedaços da BF ou até mesmo da BQ.



Figura 14 - Bobina Quente pronta para ser expedida. Fonte: Desconhecida

A etapa de laminação busca sempre ponto ótimo divergente da aciaria, pois os critérios de programação e sequenciamento, por exemplo, de uma máquina de lingotamento contínuo e de um laminador de tiras a quente são muito diferentes a ponto de ser bem difícil conseguir um fluxo contínuo de produção entre ambos. Esse é, sem dúvida, o principal motivo da existência do pátio de placas entre as etapas de lingotamento e laminação. O pátio de placas tem como papel principal ser um *buffer* para a laminação. Isso também é um complicador para o processo de laminação direta apresentado no capítulo 2 desse trabalho, onde as placas recém lingotadas são encaminhadas direto para laminação sem mesmo serem reaquecidas.

O objetivo da laminação é formar agrupamentos (sequências) de placas de largura e espessura que otimizam a utilização dos cilindros de laminação,

evitando-se, assim, que as próprias bobinas causem um desgaste acentuado desses cilindros. Esses desgastes nos cilindros podem ocasionar em desvios de qualidade do perfil transversal de outras bobinas ou de qualidade superficial destas mesmas. Portanto, conforme veremos na próxima seção deste capítulo, saltos de espessura, largura e carbono equivalente limitado favorecem o atravessamento estável da bobina no trem acabador além de contribuir com a vida útil dos cilindros.

3.2

Programação e sequenciamento de instruções de laminação

Uma laminação de tiras a quente trabalha em regime de sequenciamento de placas. Entretanto, esse processo não é contínuo. O motivo principal é a necessidade de troca dos cilindros de laminação (*rolls change*), tanto do laminador de desbaste quanto do trem acabador, após uma quantidade conhecida de placas/BQs laminadas. Conforme apresentado por [15] os cilindros do laminador de desbaste e do trem acabador sofrem desgaste devido a: esforço de compressão, atrito e temperatura. As BQs deixam marcas nos cilindros, causadas principalmente pelas ‘bordas’ ou ‘quinas’, que são regiões mais duras e críticas de laminar devido ao resfriamento mais rápido que o centro. Esta troca interrompe o processo de laminação e é considerada como um tempo de *set-up* necessário no processo, ou seja, os cilindros devem ser trocados de tempos em tempos para que as marcas causadas pelo desgaste não passem para outras BQs, garantindo assim a qualidade superficial das mesmas e conseqüentemente, um maior valor do produto final [15]. Conforme mencionado em [15] a trocas desses cilindros é muito custosa podendo cada cilindro custar até \$20.000,00 para substituição.

Uma sequência de placas entre duas trocas consecutivas dos cilindros de laminação é conhecida como instrução de laminação [7]. Uma instrução de laminação poder ser composta por uma sequência de até 40 placas para uma usina de grande porte. Esse número depende exclusivamente dos objetivos de produção da laminação que serão apresentados abaixo.

Conforme mencionado por L. Tang em [7] ao se realizar um ‘*schedule*’ de uma laminação, 4 objetivos são levados em consideração, sendo alguns deles conflitantes: a qualidade superficial do produto acabado (BQ) que é função da variação de largura, dureza e espessura entre placas adjacentes e

consequentemente das trocas dos cilindros desgastados; produtividade dos equipamentos, que é basicamente buscar a máxima utilização dos cilindros de laminação; economia de energia a partir da utilização de placas em sequência que possuam homogeneidade dimensional e composição química (*steel grade*) semelhantes; atendimento a carteira dos clientes ao mesmo tempo que uma preocupação em não gerar estoques desnecessários. A tabela abaixo apresenta simplificada esses objetivos e suas descrições:

Tabela 1 - Objetivos principais do processo de laminação. Fonte: Autoria própria

Objetivos	Descrição dos Objetivos
Qualidade	Garantir qualidade superficial dos produtos acabados
Produtividade	Maximizar utilização dos cilindros de laminação
Energia	Maximizar a energia calorífica das placas
Atendimento	Atender aos pedidos dos clientes em tempo adequado

Basicamente a união desses objetivos geram dois fatores que tem uma grande influência na produtividade da laminação. O primeiro fator é a sequência de placas escolhidas para atender certa instrução de laminação. Primeiramente, essas placas devem possuir composição química, homogeneidade dimensional e temperatura de carregamento similar para que o tempo gasto no reaquecimento seja igual e consequentemente a próxima etapa (laminação de desbastes) não seja afetada. A sequência de reaquecimento é igual à sequência da instrução de laminação. Além disso, nesta sequência, placas adjacentes devem respeitar um limite de variação de largura, espessura e dureza entre as mesmas e também entre todas as placas escolhidas para atender cada instrução de laminação. A largura entre placas adjacentes deve variar suavemente, conforme mostrado na Figura 15.

O segundo fator é a troca de cilindros de trabalho entre o intervalo de duas instruções de laminação. Este fator é completamente dependente do sucesso do primeiro fator. Esta atividade é uma das mais custosas, tanto em tempo para efetuar estas trocas quanto o dispêndio de custo envolvido nessa operação. Naturalmente, busca-se atender o primeiro fator para reduzir ao máximo a frequência de trocas. Reduzir a frequência de trocas pode conflitar diretamente com o objetivo de manter a qualidade superficial da BQ elevada. Para atingir o ponto ideal, os níveis de qualidade são mantidos e a utilização dos cilindros maximizados (ou as trocas minimizadas).

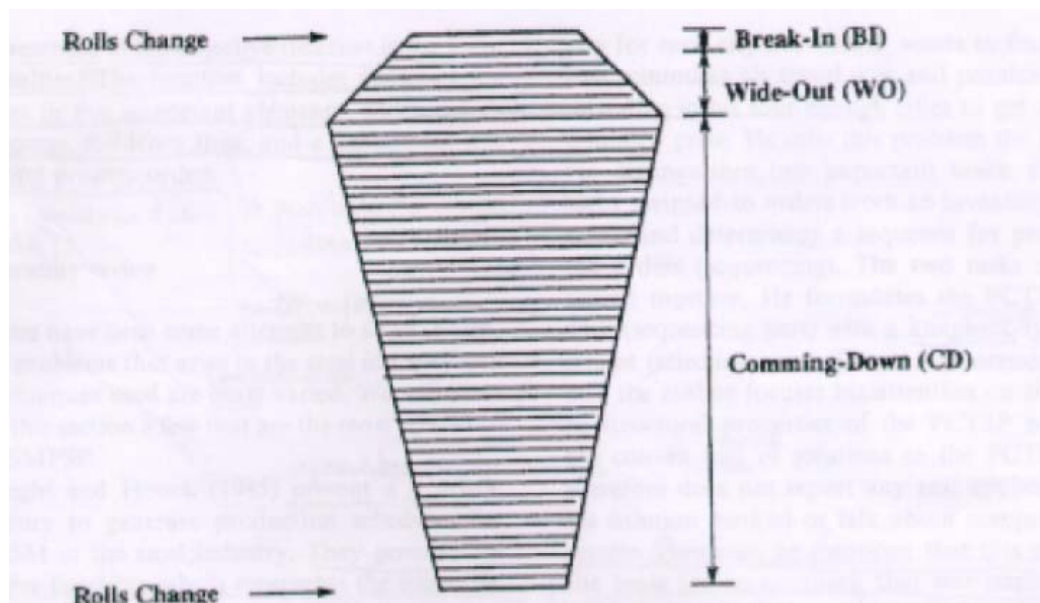


Figura 15 - Limite de variação de largura das placas de uma instrução (caixão de laminação) Fonte: [23]

Conforme mencionado em [23] no início de uma instrução de laminação qualquer, existe a necessidade de alinhamento, balanceamento e início de aquecimento dos cilindros recém-substituídos (*rolls change*) em uma instrução anterior. Para tanto, é necessário sequenciar apenas algumas BQs estreitas nesta zona inicial de um caixão, que é denominada por alguns autores como ‘acerto’ ou ‘*break-in*’, sendo esta a menor de toda a sequência. As placas ali sequenciadas devem possuir as menores exigências dimensionais e de qualidade possíveis, pois é uma zona de ajustes iniciais. Após esta zona, é necessário que as larguras cresçam, ou seja, que as placas sejam sequenciadas da mais estreita para a mais larga. Esta nova zona de larguras crescentes, denominada por alguns autores como ‘abertura’ ou ‘*wideout*’, ainda tem a finalidade de melhor ajustar os cilindros do trem acabador e também deve conter BQs sequenciadas, porém em uma quantidade pouco maior do que na zona de acerto. Tais BQs ainda não devem possuir grandes exigências de qualidade e tolerância dimensional. Ao final da abertura é alcançada a maior largura da sequência, começa então a zona denominada ‘corpo’ ou ‘*comming-down*’, onde os cilindros estão devidamente alinhados, balanceados e aquecidos, ou seja, em plenas condições de receberem as BQs com as maiores exigências dimensionais e de qualidade da sequência programada. Nesta zona as BQs devem ser sequenciadas da maior largura para a

menor (decrementemente), pois os cilindros começam a sofrer um desgaste maior nas áreas das quinas das placas, que, mais duras, causam uma concentração de tensões e são mais difíceis de laminar. Este desgaste tende a marcar os cilindros e estas marcas passariam para as BQs que seriam laminadas posteriormente na sequência da instrução de laminação. O decréscimo de larguras das BQs se deve justamente para que, as marcas deixadas pelas quinas nos cilindros pela BQ anterior (mais larga), não passem para a BQ seguinte (mais estreita), causando perda de perda da qualidade da BQ seguinte. Finalmente, termina-se uma instrução de laminação e os cilindros devem ser trocados para dar início a uma nova instrução.

Uma típica sequência de várias instruções de laminação ‘turn’ esta representada na Figura 16 abaixo.

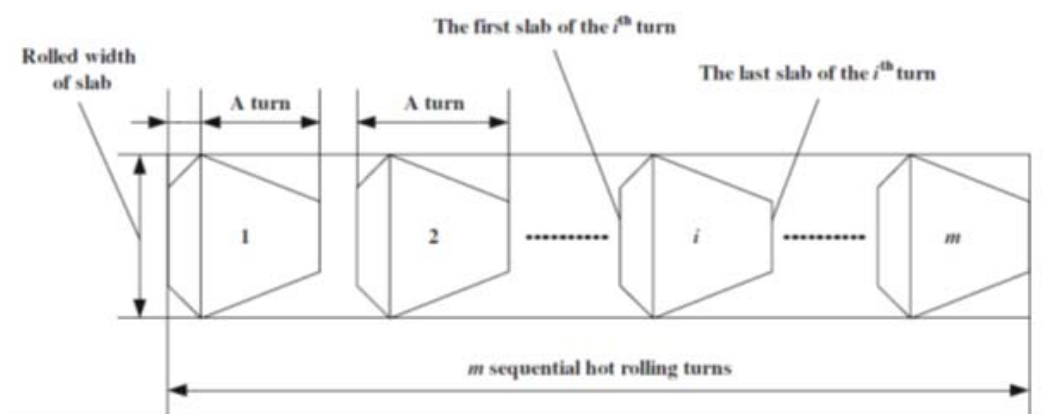


Figura 16 - Típica sequência de instruções de laminação ‘turn’ ou caixões. Fonte: [7]

Finalmente, produtividade neste contexto é quantificada a partir da produção bruta de bobinas por uma unidade de tempo, por exemplo, em um período de um mês. Neste contexto, as siderúrgicas buscam realizar mais instruções de laminação no menor espaço de tempo com o maior número de placas possíveis, com qualidade, atendimento aos prazos de produção e menor custo por bobina produzida. Consequentemente, a programação e o sequenciamento de um laminador de tiras a quente tem contribuição direta nesta produtividade. A Figura 17 mostra o ‘trade-off’ dos objetivos encontrados no processo construção da programação de um laminador:

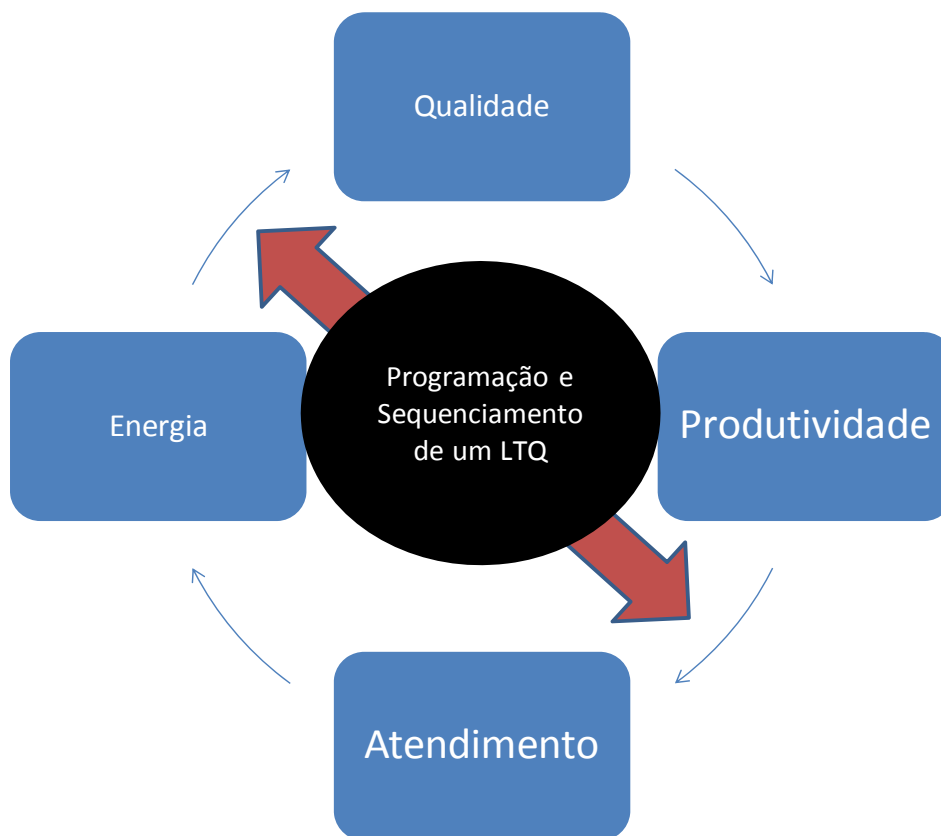


Figura 17 - *Trade-off* dos objetivos de uma laminadora de tiras a quente. Fonte: Autoria própria

Alguns trabalhos no campo de programação e sequenciamento de um laminador foram desenvolvidos buscando-se otimizar em termos de custo e qualidade de produto as melhores instruções de laminação, na melhor sequência, utilizando as premissas e restrições apresentadas por cada instrução. O objetivo é criar as instruções e posteriormente criar o *'schedule'* para estas serem realizadas na programação de uma laminadora de tiras a quente. Podemos citar alguns deles como a dissertação de mestrado da referência [15] de Antonio e o artigo da referência [7] de Tang.

O sequenciamento e programação são premissas para o problema que será apresentado nessa dissertação. De fato, os fatores apresentados são responsáveis diretamente por todas as movimentações de saída de placas do pátio. A programação e sequenciamento feitos pelas siderúrgicas são utilizados como entrada de dados para otimização do processo de manuseio de placas, objeto dessa dissertação. Para cada instrução de laminação presente no *schedule*, um conjunto de placas candidatas para cada bobina que será produzida na sequência da instrução é conhecida. As placas utilizadas para cada bobina da instrução deverão

ser escolhidas otimamente na procura de se reduzir a movimentação de placas dentro do pátio de placas durante o atendimento de uma laminação.

4

O problema de remanejamento de placas (SSS)

Esta dissertação tem com objetivo principal desenvolver uma nova modelagem para melhorar a eficiência no problema de remanejamento de placas entre pilhas. Este problema ocorre dentro de um pátio de placas, que conforme explicado no capítulo 2 desta dissertação, é o local de estocagem intermediária das placas de aço entre os processos de lingotamento e laminação. Este capítulo apresentará todas as hipóteses, premissas, comparativos entre modelos e conceitos de pátio para explorar o problema, assim como toda conexão necessária com os capítulos anteriores para enquadrar o problema SSS dentro do processo produtivo de laminação de placas em bobinas em usinas siderúrgicas.

4.1

Conceito de pátio de placas

Para entendermos o problema de remanejamento de placas, ou ‘SSS’, devemos primeiramente entender a fundo o conceito de um pátio de placas. Todas as usinas produtoras de aços planos fabricam placas na primeira etapa sólida do aço, fase esta conhecida como lingotamento contínuo. As placas produzidas são, uma a uma, identificadas e destinadas ao pátio de placas. Posteriormente essas placas são utilizadas como matéria prima para o processo de produção de bobinas. Desta forma o pátio de placas, é um conjunto de recursos e atividades responsável por receber, estocar e expedir placas, a qualquer momento, sem comprometer a chegada e saída de placas, ou seja, sendo uma etapa ‘desafogadora’ do processo siderúrgico. A Figura 18 posiciona o pátio de placas dentro do processo siderúrgico.

Naturalmente, o projeto de concepção (dimensionamento, construção e posicionamento) de um pátio de placas durante a etapa de construção de uma usina siderúrgica deve ser idealizado para garantir que esta etapa do processo seja uma etapa facilitadora do processo logístico e que, principalmente, agregue valor ao custo de logística de uma usina. Buscam-se conceitos e ideias simples e

objetivas durante esta etapa de concepção do projeto do pátio. Entretanto, muitas vezes, algumas usinas expandem suas produções, às vezes desativando uma ou outra instalação que estejam defasadas por alto custo, e partem para novas instalações mais modernas e ou de maior capacidade. Com essas mudanças, as usinas mais antigas muitas das vezes têm as suas atividades logísticas comprometidas.

Um exemplo disso é a Usiminas Cubatão². Esta usina construiu uma nova aciaria em um novo local desativando a antiga, fora de caminho das próximas atividades da cadeia de produção. As unidades laminadoras (laminador de tiras a quente e laminador de trias a frio) foram mantidas no mesmo local (em linha com a antiga aciaria). Embora a nova aciaria seja mais moderna, com capacidade produtiva elevada e com custos de produção mais baratos, a logística de placas nessa nova organização espacial ficou bastante comprometida.

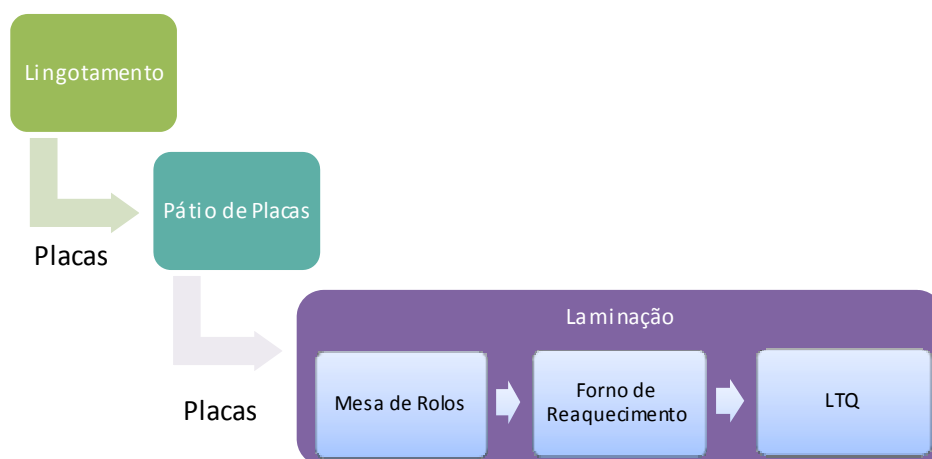


Figura 18 - Fluxo de transformação de placas de aço em bobinas dentro de uma usina siderúrgica. Fonte: Autoria própria

Não existe uma ‘receita de bolo’ para se construir um pátio de placas. O projeto deve ser o mais compacto possível e centrado entre as etapas predecessora e sucessora do pátio. Deve dispor de pilhas suficientes para suportar uma possível parada de produção da etapa sucessora, ou uma possível aceleração da etapa predecessora. Suas pilhas devem também ser distribuídas por alas e cada ala em linhas e colunas para facilitar o rastreamento das placas.

A Figura 19 abaixo apresenta de forma simples o fluxo típico de movimentação de placas dentro do pátio:

² Antiga COSIPA (Companhia Siderúrgica Paulista) localizada na cidade de Cubatão, São Paulo.

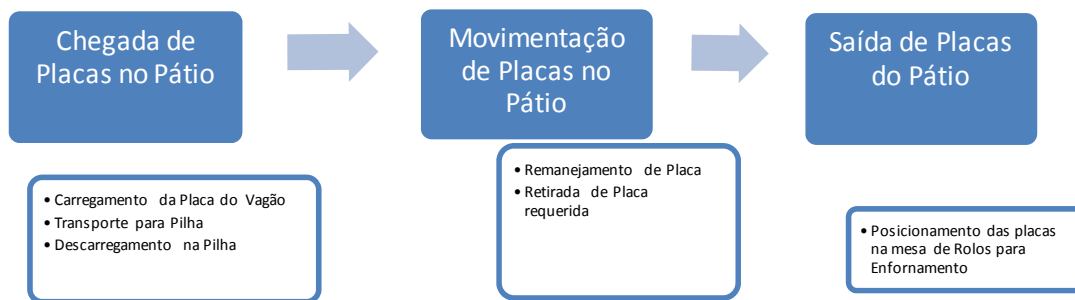


Figura 19 - Fluxo simplificado de movimentação de placas dentro do pátio.
Fonte: Autoria própria

Na maioria esmagadora das usinas produtoras de placas, estas chegam ao pátio por vagões sendo estes tracionados por locomotivas. Da mesma forma que no pátio, as placas estão dispostas nos vagões em pilhas, onde usualmente cada vagão chega a comportar cinco a seis placas. As locomotivas podem tracionar até cinco vagões por vez. Algumas usinas optam por utilizar de forma complementar ao sistema ferroviário, o sistema de transporte rodoviário, através de carretas pranchas. Estas carretas tipicamente conseguem transportar no máximo quatro placas por vezes e aparentemente são menos produtivas que as locomotivas. Entretanto, as locomotivas necessitam de manobras ferroviárias, e dependendo do ritmo de produção, algumas placas são alternativamente encaminhadas para o pátio pelo modal rodoviário. A Figura 20 abaixo apresenta um exemplo desses vagões transportando placas.



Figura 20 - Vagão de transporte de placas entre o lingotamento contínuo e o pátio de placas. Fonte: <http://www.metccocal.com/transomet.htm> (editada)

Logicamente, recursos para manuseio de placas devem ser utilizados para a retirada das placas dos vagões até o pátio, transferência de placas entre alas, remanejamento de placas entre pilhas (SSS) e transporte das placas do pátio para mesa de rolos que leva ao forno do reaquecimento (este depende da distância da laminação ao forno de reaquecimento). O pátio possui geralmente os seguintes recursos para movimentação das placas:

- Pontes rolantes

Conforme apresentado no capítulo 2 as pontes rolantes são equipamentos móveis que se movimentam pelo pátio manuseando as placas. Elas basicamente retiram uma placa de um ponto e levam até outro, locomovendo-se nas três dimensões. Cada ponte rolante fica localizada em uma ala, podendo esta se locomover entre todas as colunas e linhas desta ala. Inclusive, tais pontes podem chegar até a área de desembarque de placas (onde estão localizados os vagões e/ou caminhões que chegam ao pátio) e também na área de expedição de placas, que pode ser a mesa de rolos, ou caso a laminação seja distante, um área de embarque (onde estão localizados os vagões e/ou caminhões que deixam o pátio). É muito comum, em cada ala, existir duas pontes rolantes. O motivo é simples: se caso uma quebre por falha operacional (mecânica ou elétrica) ou necessite ainda de fazer uma manutenção preventiva, a outra retoma as atividades sem prejuízo para operação. Estas pontes-rolantes são geralmente operadas manualmente. Em algumas usinas que já possuem o processo de rastreamento de placas bem implementado, também possuem pontes rolantes automáticas que em função da placa desejada, buscam no sistema a localização exata das placas e retiram esta de qualquer pilha do pátio. A Figura 10 no capítulo 2 apresenta uma típica ponte rolante sendo utilizada no processo de movimentação de placas.

- Carros de transferência

O carro de transferência é muitas vezes utilizado para transportar uma placa de uma ala para outra. Geralmente são equipamentos automáticos que são acionados pelos operadores do pátio (até mesmo operadores da ponte rolante). A Figura 21 abaixo mostra um típico carro de transferência:



Figura 21 - Carro de transferência. Fonte: <http://www.aimmachinery.com/products.asp?pid=110&cid=6>

- Mesa de rolos

Quando o pátio de placas é próximo à laminação, as placas escolhidas para serem laminadas são transportadas das pilhas, uma a uma, pela ponte rolante até a mesa de rolos. Essa mesa de rolos funciona em função da laminação a qual vai puxando as placas em função do ritmo de produção das etapas posteriores, principalmente o forno de reaquecimento de placas – primeira etapa do processo de laminação. A Figura 22 abaixo mostra uma típica mesa de rolos em funcionamento.



Figura 22 - Mesa de rolos próxima ao pátio de placas. Fonte: <http://www.lase.nl/measurement-solutions/steel-logistic/slab-material-tracking/>

Ao lado esquerda da Figura 22, as placas encontram-se empilhadas no pátio. No centro da figura em foco esta a mesa de rolos, com as placas sendo puxadas no sentido do leitor. Logicamente, as placas são colocadas uma atrás da

outra, em uma fila com uma distância controlada. As pontes rolantes fazem todo esse trabalho de transferência das placas das pilhas para esta mesa de rolos. As pontes rolantes são máquinas robustas trabalhando em alto ritmo de produção para atender a demanda da laminação sem interrupção e conseqüentemente não é possível exigir do operador da ponte rolante uma grande precisão no posicionamento das placas, seja no posicionamento das mesmas na mesa, como no respeito da distância entre placas. Portanto, essas mesas geralmente possuem tecnologia embarcada para acertarem o posicionamento das placas e controlarem a distância entre placas na mesa.

Alguns dos artigos que estudaram o problema do SSS apresentaram um possível ‘*layout*’ de pátio de placas em sua modelagem. Todos utilizaram o conceito de linhas, colunas e alas. No primeiro trabalho sobre ‘SSS’ [2], Tang apresentou pela primeira vez um típico *layout*. Embora não tenha colocado nenhuma figura representativa deste pátio em seu artigo, ele descreveu a modelagem do pátio em quatro alas, onde cada ala possuía duas linhas de placas com noventa e nove pilhas (colunas) em cada linha. Entretanto não foi citada absolutamente nenhuma informação sobre a entrada e saída de placas do pátio. A mesa de rolos não foi posicionada no espaço. De fato, não havia à necessidade de se preocupar com o projeto do pátio uma vez que a função objetivo do problema só procurava reduzir o número de ‘*shuffles*’ no processo de atendimento de uma laminação, com a premissa de retornar com as placas remanejadas para a posição original. Portanto, nem a chegada e a saída de placas, nem mesmo o posicionamento das placas e pilhas no pátio, implicavam no custo da função objetivo do modelo. O problema poderia ser visto unicamente pela perspectiva de cada pilha individualmente, sem considerar o *layout*, ou seja, sem considerar a arrumação destas no pátio e as movimentações no pátio.

Em [3], [4] e [8] ocorreram o mesmo que em [2]. Estes trabalhos buscaram simplesmente conceber formas de otimização matemática mais eficiente (algoritmos genéticos e programação linear inteira) sem se preocupar com mudanças no escopo do problema e conseqüentemente nas condições e premissas do modelo. Em [3] e [4], inclusive foram utilizados o mesmo *layout* de pátio apresentado primeiramente em [3]. Em [8], Fernandes não citou o *layout* do pátio utilizado devido aos mesmos motivos já apresentados acima. Entretanto,

Fernandes inseriu a seguinte Figura 23 no contexto para exemplificar um pátio de placas.

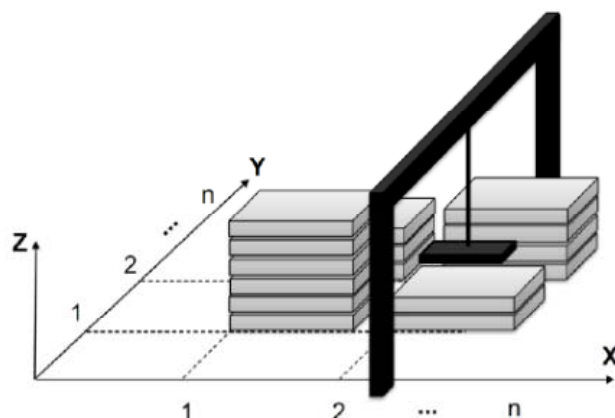


Figura 23 - Modelo cartesiano de um pátio de placas. Fonte: [8]

Portanto o pátio foi modelado como um eixo cartesiano com n linhas no eixo x e n colunas no eixo y , estando as pilhas dispostas em cada par de posições (x,y) e as placas presentes em cada pilha referenciadas pela altura no eixo z . Qualquer placa p pode ser encontrada no pátio pelas suas coordenadas x , y e z .

Em [3] e [9], Tang mudou o *layout* do pátio, dividindo-o em três alas, cada ala com duzentos e setenta e seis pilhas sendo essas pilhas divididas em três linhas com noventa e duas pilhas cada. Neste *layout* foi considerado que o pátio de placas está localizado em área próxima à laminação, uma vez que, a mesa de rolos de saída (*roller conveyor*) para o forno de reaquecimento cruza o pátio de placas no centro do mesmo (aproximadamente na coluna quarenta e seis), conforme mostrado na Figura 24 abaixo.

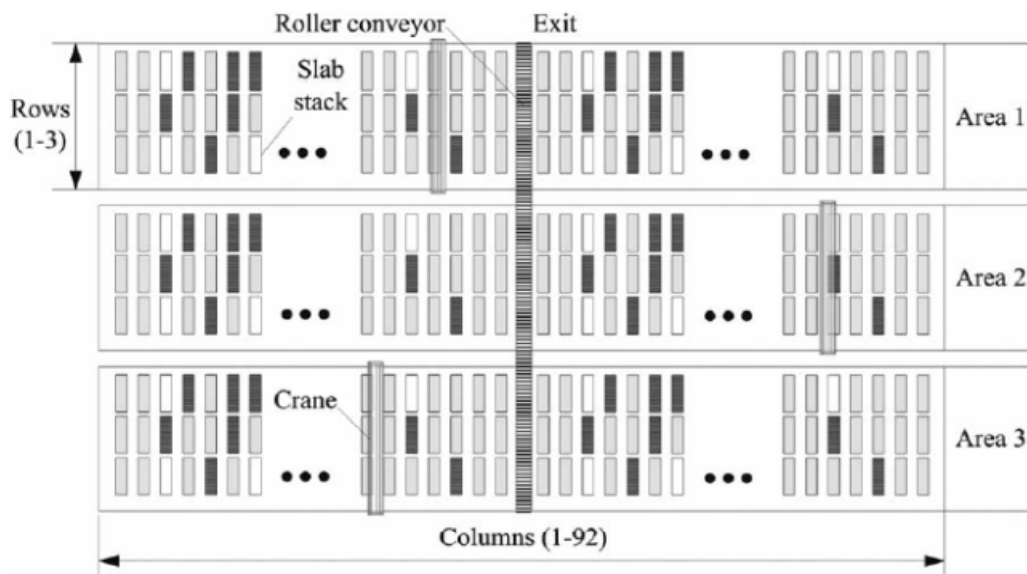


Figura 24 - Modelo de organização das pilhas de um pátio de placas (Vista superior). As pilhas em preto é uma representação para pilhas que possuem uma placa candidata escolhida para o processo de laminação. Fonte: [3]

Pela primeira vez, no trabalho de Tang [3] a configuração do pátio importava na solução final do problema de otimização propostos. Desta vez, a função objetivo representava o custo total de manuseio das placas dentro do pátio de placas, ou seja, não só considerava a quantidade de remanejamentos realizados, mas também os custos em tempo gastos para se remanejar e atender a demanda de produção da laminação. Portanto, nestes trabalhos, o custo total dependia do tempo de manuseio das placas sendo estes dependentes do tempo de ‘içamento’ das placas e transporte das mesmas de um ponto a outro qualquer do pátio. De maneira geral, esses custos ocorriam nas seguintes atividades executadas no pátio pelas pontes rolantes:

- i. Tempo gasto para remanejar uma placa de uma pilha para outra, sendo esta outra posicionada exatamente ao lado da primeira;
- ii. Tempo gasto para retirar a placa de uma pilha qualquer e encaminhá-la para a mesa de rolos (coluna quarenta e seis na Figura 24);

Para este trabalho utilizamos o mesmo layout utilizado por Tang em [3], uma vez que este é uma boa representação da realidade encontrada na maioria das usinas e também para que possamos fazer comparações entre os modelos da

literatura e o modelo que aqui será apresentado. Além disso, esse pátio atende requisitos e premissas básicas para execução do problema SSS. Este assunto será discutido na seção 4.3 dessa dissertação.

4.2

Introdução ao problema SSS

O problema SSS de remanejamento de placas entre pilhas aparece naturalmente no processo de movimentação de placas entre pilhas dentro de um pátio com diversas pilhas, por exemplo, o pátio apresentado na Figura 28 da seção anterior. Uma pilha é formada por um conjunto de placas sobrepostas em um espaço físico qualquer do pátio. A Figura 25 apresenta uma típica pilha de placas.

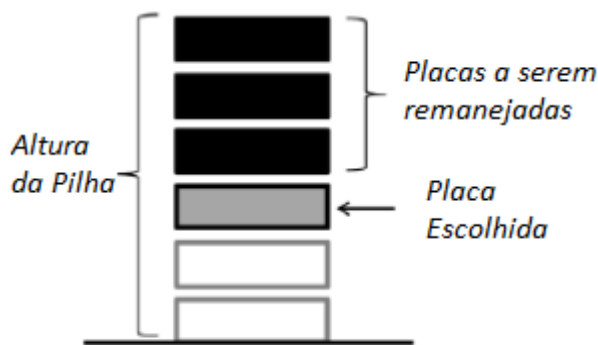


Figura 25 - Típica pilha de placas. Fonte: [8] (adaptado)

Caso a placa em cinza seja escolhida em um determinado momento para ser laminada, as placas em preto (placas a serem remanejadas) deverão ser remanejadas para alguma outra pilha do pátio, liberando o espaço para que a placa cinza possa ser retirada e encaminhada para saída do pátio, o que na prática significa levá-la para a próxima etapa do processo (etapa de laminação). Este processo é conhecido na literatura como ‘SSS’ (*slab stack shuffling*), sendo esta nomenclatura introduzida por Tang em [2].

Conforme descrito por Fernandes em [8], este processo pode ser representado por uma sequência de tarefas de remanejamento (*shuffling task sequence*). Essa sequência de tarefas está representada na Figura 26 abaixo onde “i” significa instante de tempo:

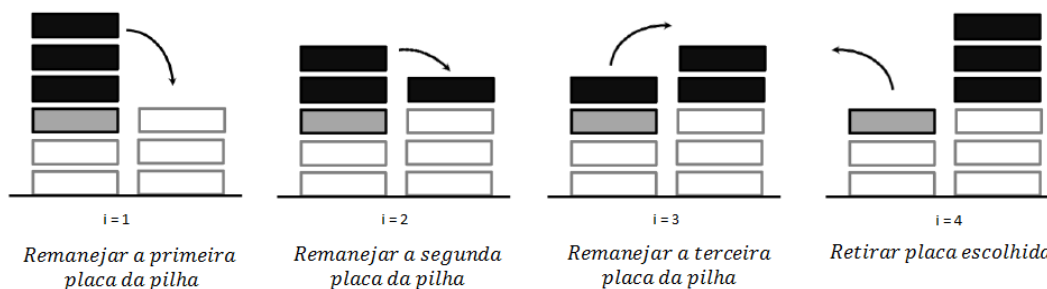


Figura 26 - Sequência de tarefas de remanejamento (Shuffling task sequence). Fonte: [8] (adaptada)

As placas a serem remanejadas (em preto), uma a uma, são retiradas de cima da placa cinza (escolhida) para abrir espaço para que a mesma seja retirada do pátio. Se compararmos a figura apresentada por Fernandes em [8] com a Figura 26, não iremos encontrar na figura acima o retorno das placas remanejadas (em preto) para a pilha original.

O pátio de placas é uma etapa intermediária entre as etapas de lingotamento contínuo e laminação. Conforme já apresentados nos capítulos 2 e 3 dessa dissertação, os objetivos operacionais de ambas as áreas são divergentes. Basicamente, a primeira busca produzir sequência de placas com mesma composição química e dimensão. Já a segunda objetiva criar instruções de laminações ótimas, ou seja, placas consecutivas com variação de largura limitadas, dentro de uma mesma instrução, sem perda da qualidade do produto, atendendo os prazos dos clientes e de maneira a produzir o máximo de bobinas possíveis dentro dessas instruções. Basicamente, a ocorrência do problema SSS se dá por essa diferença de objetivos. Além disso, as placas provenientes de uma mesma corrida do lingotamento estão quase sempre espalhadas pelo pátio devido principalmente aos possíveis diferentes processamentos que cada placa pode sofrer antes de chegarem ao pátio.

As instruções de laminação são sequências de placas que respeitam restrições entre placas adjacentes. Obviamente, além disso, as instruções devem sofrer '*schedule*' de acordo com a demanda dos clientes presentes na carteira de produção da laminação. Na rotina prática, cada instrução de laminação é construída individualmente na medida em que a instrução anterior tenha sido finalizada.

Iremos chamar cada instrução de laminação também de horizonte de programação, sendo estes um conjunto de bobinas representando pela letra grega Ω . Logo $|\Omega|$ será o número de bobinas a serem laminadas dentro deste horizonte de programação. Para cada bobina i a ser laminada neste horizonte, existe um conjunto de placas candidatas, C_i , que são placas que podem ser escolhidas para serem laminadas e produzir esta bobina i , ou seja, que possuem atributos como: composição química, largura, espessura, dureza e temperatura dentro dos limites aceitos para produzir esta bobina.

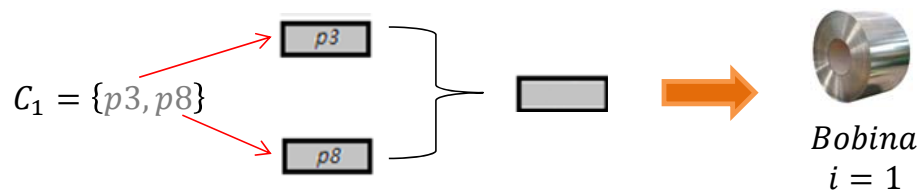


Figura 27 - Exemplo de representação das placas candidatas que podem ser escolhidas para produzir a bobina $i = 1$. Fonte: Autoria própria

No exemplo da Figura 27 acima a placa ‘ $p3$ ’ ou a placa ‘ $p8$ ’ podem ser escolhidas para serem laminadas e produzir a bobina $i = 1$.

Obviamente, uma placa após ser laminada, se transforma em uma bobina. Devemos escolher uma única placa dentre as placas candidatas de cada bobina, para todo o horizonte de programação ($i = 1.. \Omega$), em ordem crescente, de maneira a reduzir o custo total associado a movimentação de cada uma dessas placas escolhidas. A Figura 28 abaixo mostra um pequeno exemplo, em forma resumida, deste processo de escolha de uma placa para cada bobina do horizonte de programação, utilizando como base um pátio de placas com duas pilhas (τ_1 e τ_2), cada pilha com oito placas ($p1, p2, p3, p4, p5, p6, p7, p8$) e três bobinas ($\Omega = 3$) no horizonte:

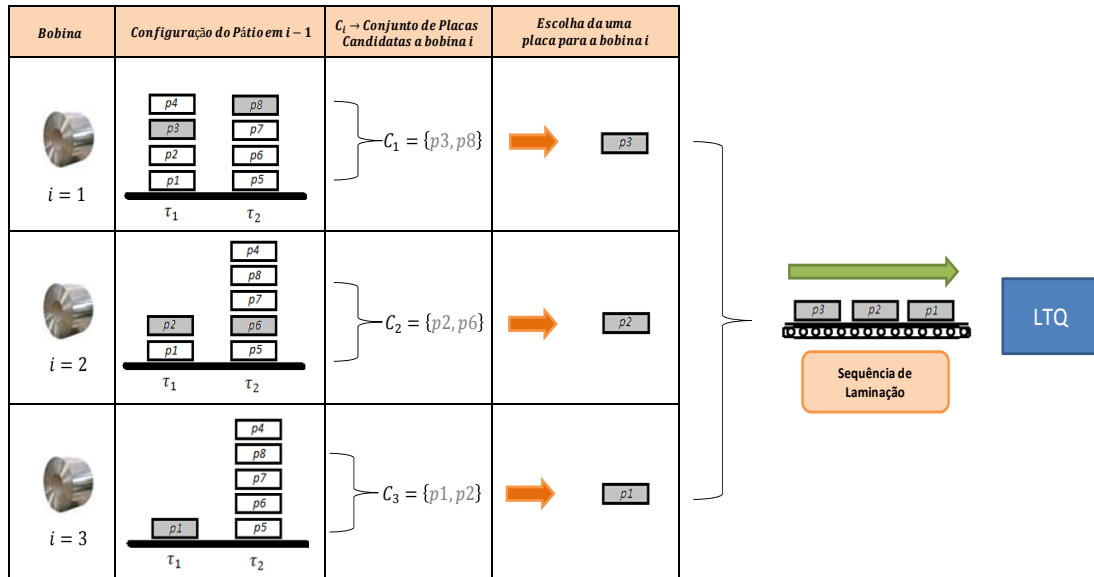


Figura 28 - Exemplo de atendimento de um pátio de placas com duas pilhas (τ_1 e τ_2), cada pilha com oito placas ($p1, p2, p3, p4, p5, p6, p7, p8$) e três bobinas ($\Omega = 3$). Fonte: Autoria própria

Conforme o exemplo da Figura 28, é possível que haja interseção entre os conjuntos de placas candidatas acima, ou seja:

$$|C_i \cap C_{i'}| \geq 0$$

$$\forall i, i' \text{ sendo } i \neq i'$$

Entretanto, obviamente, cada placa só poderá atender uma única bobina. Em ordem crescente, inicia-se o processo de atendimento verificando para cada bobina i , quais placas são candidatas (conjunto C_i) e suas respectivas coordenadas (x, y, z) no pátio. Para a primeira bobina, $i = 1$, temos duas opções de escolha. Deve-se escolher uma única placa entre as placas candidatas 'p3' e 'p8' (em cinza na primeira linha da tabela) para produzir a primeira bobina:

- **Opção 1:** Escolhe-se a placa 'p3'. Deve-se remanejar a placa 'p4' que está por cima desta;
- **Opção 2:** Escolhe-se a placa 'p8'. Não será necessário remanejar nenhuma placa, uma vez que, a placa 'p8' já se encontra no topo da pilha;

No exemplo acima, só existe uma única pilha, pilha τ_2 , para a qual se pode remanejar a placa p_4 , localizada inicialmente na pilha τ_1 . Logicamente, neste caso a decisão de remanejamento da placa p_4 para a pilha τ_2 é direta. Conforme ilustrado na Figura 28, escolheu-se a placa p_3 como a placa escolhida para laminar a bobina $i = 1$. Na linha dois obviamente o pátio é atualizado sem a presença da placa p_3 e com a placa p_4 localizada no topo da pilha τ_2 .

Para a bobina $i = 2$, o processo de decisão dependerá naturalmente da decisão tomada no instante anterior ($i = 1$). Este processo engloba tanto a decisão de qual placa a ser laminada para produzir a bobina $i = 2$ como a decisão da pilha destino das placas remanejadas, caso exista placas a remanejar. Para a segunda bobina temos também duas opções de escolha. Dado a configuração do pátio após o atendimento da bobina $i = 1$, deve-se escolher uma única placa entre as placas candidatas p_2 e p_6 (em cinza na segunda linha da tabela) para produzir a segunda bobina.

- **Opção 1:** Escolhe-se a placa p_2 . Não será necessário remanejar nenhuma placa, uma vez que, a placa p_2 encontra-se no topo da pilha;
- **Opção 2:** Escolhe-se a placa p_6 . Deve-se remanejar as placas p_4 , p_7 e p_8 que estão por cima desta;

No caso acima, só existe uma única pilha, pilha τ_1 , para a qual se pode remanejar as placas p_4 , p_7 e p_8 . Logicamente, assim como no primeiro caso, a decisão de remanejamento das placas p_4 , p_7 e p_8 para a pilha τ_1 é direta. Conforme ilustrado na Figura 28, escolheu-se a placa p_2 como a placa escolhida para laminar a bobina $i = 2$. Na linha três o pátio é atualizado sem a presença da placa p_2 e com as placa p_4 , p_7 e p_8 localizadas no topo da pilha τ_2 .

Para bobina $i = 3$, o processo de decisão dependerá da decisão tomada nos instantes anteriores ($i = 1$ e $i = 2$). Este processo engloba tanto a decisão de qual placa a ser laminada para produzir a bobina $i = 3$ como a decisão da pilha destino das placas remanejadas, caso exista placas a remanejar. Para a terceira bobina existe somente 1 opção de escolha de placa candidata. Dado a configuração do pátio após o atendimento das bobinas $i = 2$ e $i = 3$, deve-se escolher a placa

candidata p_1 uma vez que a placa p_2 (candidata as bobinas $i = 2$ e $i = 3$) já foi escolhida no instante anterior ($i = 2$) e não se encontra mais no pátio.

Não é difícil de verificarmos uma relação de dependência no processo de tomada de decisão. As decisões tomadas no processo de atendimento da bobina i são sempre afetadas pelas escolhas relacionadas com as decisões de qual placa a ser laminada para produzir as k bobinas anteriores, onde $k < i$, assim como a decisão da pilha destino das placas remanejadas também durante o atendimento dessas bobinas anteriores.

Para o atendimento de cada bobina do horizonte de programação, o procedimento realizado acima incorreu em um custo associado de remanejamento durante a movimentação das placas escolhidas para à mesa de rolos. Conforme já mencionado, este processo engloba tanto a decisão de qual placa a ser laminada para produzir a bobina i como a decisão da pilha destino das placas remanejadas, caso exista placas a remanejar. Se fizermos uma solução em força bruta, no exemplo anterior teríamos que analisar no máximo $|C_1| \times |C_2| \times |C_3|$ possibilidades, ou seja:

$$|C_1| \times |C_2| \times |C_3| = 2 \times 2 \times 2 = 2^3 = 8 \text{ possibilidades}$$

Isso é verdade no caso em que a escolha do destino das placas remanejadas seja sempre a mesma, por exemplo, que a escolha seja sempre feita por uma heurística gulosa de colocar as placas remanejadas na pilha mais próxima ao lado. Neste exemplo acima, a decisão da pilha destino em cada atendimento, a medida que houve necessidade, foi única, ou seja, somente uma possibilidade. Dessa forma, se definirmos n como o número máximo de placas candidatas por bobina, para todas as bobinas do horizonte de programação, podemos dizer que o esforço algorítmico que implementa o procedimento de força bruta para este problema teria complexidade algorítmica de $O(n^\Omega)$. A Figura 29 apresenta todas as possibilidades para o exemplo abordado na Figura 28, na forma de grafo dirigido:

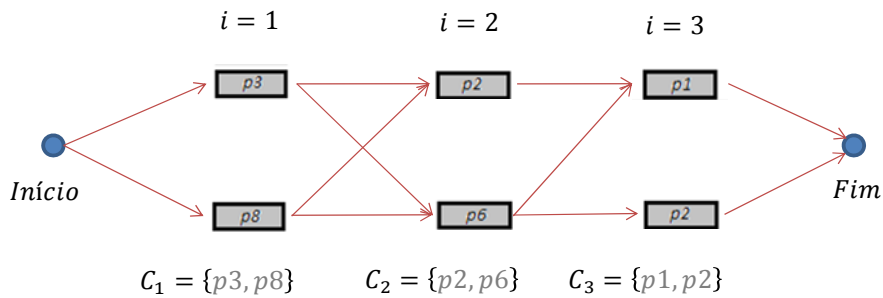


Figura 29 - Grafo algorítmico das possibilidades para o exemplo da Figura 28. Fonte: Autoria própria

Trivialmente verificamos que o exemplo da figura acima possui seis possibilidades (menor que 8), uma vez que, ao se utilizar a placa p_2 para atender a bobina $i = 2$, não há a possibilidade de usá-la novamente na próxima bobina ($i = 3$). Se incluíssemos na decisão acima a escolha da pilha destino das placas remanejadas, teríamos que considerar também o número máximo de placas remanejadas a cada atendimento, r , e o número máximo de pilhas de destino disponíveis a se remanejar, θ . Com essas considerações, se fizéssemos uma solução em força bruta no exemplo anterior, teríamos que analisar no máximo:

$$(n \times r \times \theta)^\Omega = (2 \times 3 \times 1)^3 = 216 \text{ possibilidades}$$

O procedimento de força bruta teria esforço algorítmico de $O(n^\Omega r^\Omega \theta^\Omega)$. Claramente o problema cresce em caráter exponencial e seria uma tarefa muito custosa analisar todas as possibilidades para problemas com horizonte de programação muito grandes (tipicamente para horizontes maiores que nove bobinas – $\Omega > 9$). A Figura 30 abaixo apresenta todas as possibilidades para o exemplo abordado, na forma de grafo:

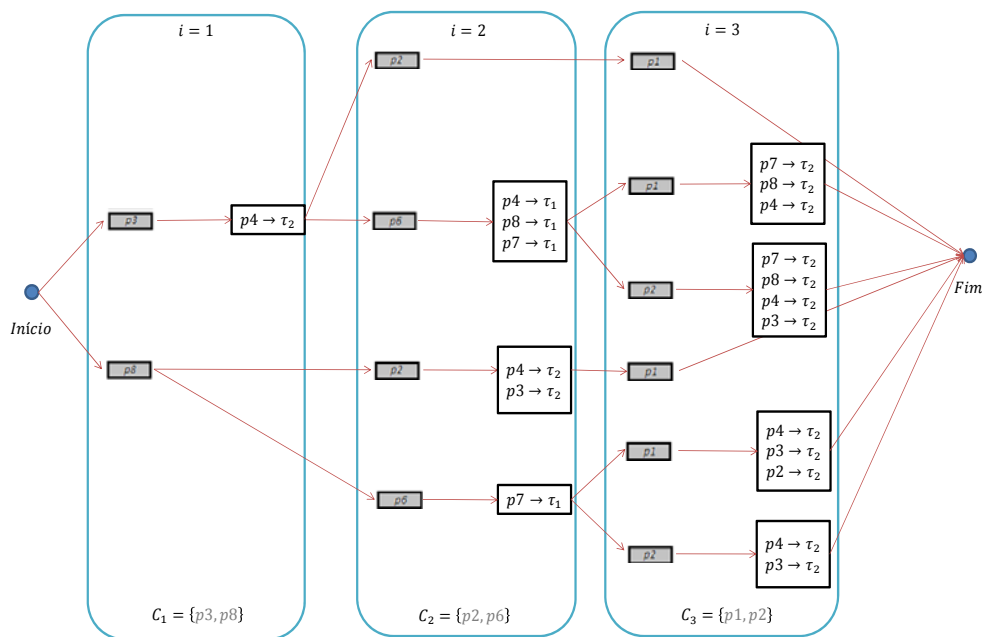


Figura 30 - Grafo algorítmico das possibilidades para o exemplo da Figura 32 com a escolha do destino das placas remanejadas. Fonte: Autoria própria

Ao analisar-se grafo acima, encontramos no total seis soluções possíveis para o problema de decisão discutido. Isto já era esperado, uma vez que neste exemplo, a decisão do destino das placas remanejadas é sempre a pilha adjacente. Verifica-se também que o melhor caminho (solução ótima) entre o início e o fim do processo de atendimento do exemplo acima é o caminho superior, ou seja, escolhendo-se a placa $p3$ para atender a bobina $i = 1$, remanejando a placa $p4$ para a pilha τ_2 , escolhendo a placa $p2$ para atender bobina $i = 2$ e finalmente escolhendo a placa $p1$ para atender a bobina $i = 3$. Intuitivamente, percebemos que as escolhas (placa a ser laminada e pilha destino de cada placa remanejada) tomadas à medida que vamos atendendo cada bobina, influenciam na escolha futura das placas a serem laminadas e conseqüentemente na melhoria da solução final.

É possível perceber também que à redução do número de remanejamentos necessários para se manusear cada placa escolhida, aumenta a produtividade logística do pátio, na medida em que um número menor de movimentações de placas é necessário (menos placas a se remanejar). Como o pátio de placas é o alimentador do processo de execução de uma instrução, o aumento da produtividade desta etapa evita gargalos na etapa de laminação. Portanto, para resolver o problema 'SSS' é necessário encontrar a melhor solução, ou seja, a

solução que combine a escolha das placas que atenderão cada bobina do horizonte de programação, junto com a decisão da pilha destino das placas que necessitem de remanejamento durante a execução da instrução.

4.3

Requisitos e premissas do problema SSS

Em toda literatura disponível do problema SSS, poucas mudanças de escopos foram propostas em relação ao primeiro trabalho [2] publicado por Tang em 2001. Entretanto, algumas mudanças foram marco no aperfeiçoamento do modelo ao longo dos últimos 12 anos.

Junto com a definição dos requisitos e premissas, será possível comparar os modelos já propostos com a nova proposta que será apresentada nessa dissertação. Em uma primeira etapa iremos falar sobre os requisitos para utilização do SSS. Esses requisitos são bastante simples e objetivos. Posteriormente serão mencionadas todas as premissas para a modelagem e geração de instancias de teste para o modelo proposto.

Requisitos

O primeiro e principal requisito para execução do SSS é o rastreamento das placas no pátio. Não são todas as usinas que possuem ferramentas de gerenciamento de pátio de placas com controle e rastreamento. É obvio que, sem uma ferramenta de gerenciamento e controle, seria impossível e até inútil utilizar recursos de otimização. Desta forma, o rastreamento é uma tarefa que necessita ser realizada, para que em qualquer instante de tempo, haja identificação da posição de qualquer placa candidata no pátio, das placas que estão acima de qualquer placa candidata no pátio e do custo de manuseio associado a qualquer placa candidata do pátio.

Todos os autores que publicaram trabalhos sobre este assunto, assumiram que em qualquer instante de tempo é possível retirar do sistema de produção a posição física (nas três dimensões (x,y,z)) de todas as placas que estão no pátio. Entretanto, isso não significa que a otimização deva ser feita online, ou seja, à

medida que as bobinas são atendidas, mas sim que o resultado da simulação seja cumprido após aplicação das decisões propostas na solução ótima encontrada.

O segundo requisito se refere a existência de mais de uma placa candidata por bobina, pelo menos em uma bobina. Este requisito pode parecer irrelevante e leviano, mas sem o mesmo o problema mudaria completamente de escopo. Isso se deve ao fato de não haver mais a necessidade da escolha das placas a serem laminadas, mas somente a escolha do destino ótimo das placas remanejadas. Isso tornaria o problema bem mais simples que o clássico problema ‘SSS’ conhecido na literatura.

O terceiro requisito tem também um papel de premissa. Placas recém-chegadas ao pátio não devem ser encaminhadas para a ala em que esteja sendo realizado o atendimento de uma instrução de laminação. Naturalmente após o fim de várias instruções, a ala que estava atendendo a instrução passa a receber placas e vice e versa. Isto é claro, para se garantir o balanço das alas, evitando a superlotação de uma ala e/ou falta de placas candidatas que atinjam os requisitos das instruções na outra.

Essa condição pode parecer incomum, mas devido ao modo de operação do pátio de placas não tem nada de inadequado. As pilhas do pátio que estão atendendo a certa instrução de laminação não podem ter suas pilhas contaminadas com placas recém-chegadas do lingotamento. Isto por que, primeiramente, estariam utilizando tempo do recurso que está realizando as movimentações de atendimento da instrução de laminação. Por segundo, o custo associado à movimentação das placas escolhidas para atender a instrução de laminação poderia ser maior, uma vez que, as placas recém-chegadas podem estar sendo alocadas em cima de pilhas que possuem placas que serão utilizadas para laminar bobinas do horizonte de programação que esteja sendo executado.

Na prática, este é um dos principais motivos do pátio ser dividido em alas. O pátio proposto na Figura 24 apresenta várias alas. Eventualmente, quando não é possível fazer essa separação, as placas são descarregadas no intervalo entre instruções de laminação ou são utilizadas diretamente, retirando a mesma do vagão, substituindo alguma placa que tenha sido escolhida. Essa última opção não é a mais adequada, mas geralmente é utilizada devido às circunstâncias de operação. Portanto, este requisito também é uma premissa, pois sem este não poderia se garantir a modelagem e escopo propostos pelo problema SSS. O

cronograma apresentado na Tabela 2 é um exemplo típico de como é realizada a rotina prática de revezamento entre alas no pátio. Tipicamente, a cada sete sequências de instruções completadas, ocorre a troca do pátio que passará a atender as próximas sete sequências.

Tabela 2 - Cronograma de recebimento de placas

Número das Instruções		Situação das Alas		
Início	Fim	Ala 1	Ala 2	Ala 3
1	7	Recebendo	Recebendo	Atendendo
8	15	Recebendo	Atendendo	Recebendo
16	23	Atendendo	Recebendo	Recebendo

Premissas

Da mesma forma que nos requisitos, algumas premissas alteram o escopo do problema enquanto outras somente incluem restrições na modelagem. Algumas delas já foram apresentadas em literaturas anteriores e foram mantidas nesta dissertação. Outras serão introduzidas neste trabalho. As premissas necessárias para execução do problema SSS estão listadas e detalhadas abaixo:

1. Somente uma placa candidata pode ser utilizada ao laminar-se uma bobina qualquer;

Esta premissa esta relacionada com a escolha de somente uma placa j candidata entre todas as placas candidatas a uma bobina i , ou seja, escolher uma placa pertencente ao conjunto C_i . Conforme já explicado no exemplo da Figura 28, a escolha das placas afeta o custo de final de movimentação do pátio. Dessa forma, podemos definir a primeira variável de decisão do problema SSS:

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se a placa } j, \text{ candidata a bobina } i, \text{ é escolhida para atender a bobina } i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Esta variável é binária, ou seja, $X_{ij} \in \{0,1\}$. Em toda literatura disponível para o SSS, os autores utilizaram notação semelhante para representar esta decisão

apresentada. A partir dessa definição, é possível definir a primeira premissa (restrição) do problema:

$$\sum_{j \in C_i} X_{ij} = 1$$

$$\forall i \in \Omega$$

Esta restrição também foi utilizada em toda a literatura disponível até o momento.

2. Possibilidade ou não de uma placa ser candidata a mais de uma bobina no horizonte de programação;

Esta possibilidade não havia sido considerada nos trabalhos [2], [3] e [4], entretanto não foi esclarecido o real motivo. Os autores definiram da seguinte forma:

$$C_i \cap C_{i'} = \emptyset, \forall i, i' \text{ sendo } i \neq i'$$

A negativa dessa possibilidade não representa situações típicas encontradas em instâncias do problema, uma vez que, na grande maioria das vezes, ocorrem muitas interseções entre esses conjuntos, ou seja:

$$|C_i \cap C_{i'}| \geq 0, \forall i, i' \text{ sendo } i \neq i'$$

Além disso, é muito comum que conjunto de placas candidatas para bobinas consecutivas (i e $i + 1$) apresentem interseção diferente de vazio. Em [7], Tang apresentou esse conceito chamando-o de similaridade local de placas candidatas. Nos trabalhos [5] e [8], foram consideradas essa possibilidade. Neste trabalho também será considerado.

3. Uma placa poderá atender somente a uma bobina;

Embora pareça óbvia esta constatação, esse conceito só se faz necessário quando incluímos a premissa número dois, apresentada acima. Uma bobina i é feita por uma placa j presente no pátio. Portanto não poderemos utilizá-la para laminar uma bobina i' , onde $i' \neq i$, uma vez, que esta placa j já terá sido utilizada e conseqüentemente já terá saído do pátio. A partir dessa definição, é possível definir a terceira premissa (restrição) do problema:

$$\sum_{i \in \Omega} X_{ij} \leq 1, \quad \forall j \in C, \quad \text{onde } C = \bigcup_{i \in \Omega} C_i$$

Naturalmente, ao considerar a premissa dois deve-se necessariamente considerar a premissa três. Portanto, essa restrição foi encontrada nos trabalhos [5] e [8], e será considerada neste trabalho também.

4. Retorno ou não das placas remanejadas no momento imediatamente após o atendimento de uma bobina;

Esta premissa é a mais relevante para esse trabalho. Nos trabalhos [2], [3], [4] e [8], sempre após o atendimento de uma bobina i , as placas remanejadas devem retornar imediatamente para a pilha original, obviamente em ordem inversa que deixaram esta pilha, mantendo-se a configuração inicial da pilha, a menos da placa que deixou o pátio para atender a respectiva bobina.

Esta premissa afeta diretamente a forma de cálculo do custo da função objetivo do problema SSS, que foi definida como a quantidade total de remanejamento de placas ao se atender um horizonte de programação (instrução de laminação), retornando sempre com as placas remanejadas para a posição original, posição anterior ao remanejamento.

Para exemplificarmos o efeito desta premissa, utilizaremos o exemplo da Figura 28. Neste exemplo as placas $p3$, $p2$ e $p1$ foram retiradas para laminar as bobinas um, dois e três, respectivamente. Para esta mesma escolha, se caso tivéssemos adotado a mesma premissa dos trabalhos [2], [3], [4] e [8], a placa $p4$ deveria ser remanejada mais de uma vez, totalizando três vezes. A Figura 31 abaixo mostra esses remanejamentos:

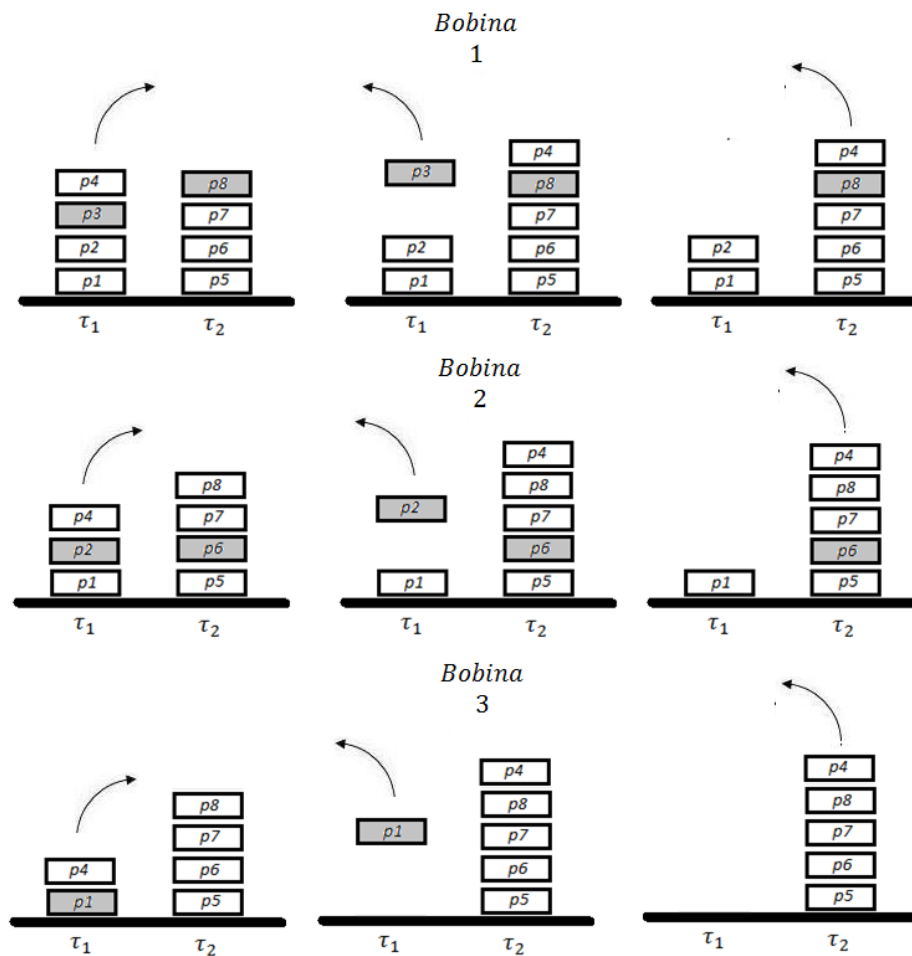


Figura 31 - Exemplo da Figura 28 com as vistas laterais das pilhas do pátio, apresentando os remanejamentos necessários no atendimento das três bobinas do horizonte de programação, utilizando premissa dos trabalhos [2], [3], [4] e [8]. Fonte: Autoria própria

Para conclusão dessas três bobinas, foram necessários seis remanejamentos (ida e volta), todos com a placa $p4$. É trivial percebermos nesse pequeno exemplo que se tivéssemos deixado a placa $p4$ na nova posição (pilha τ_2) no remanejamento do primeiro atendimento (bobina um), teríamos um custo total de três remanejamentos, ou seja, metade. Portanto, modificar esta premissa contribui sensivelmente para alterar o escopo do problema, e consequentemente os custos da função objetivo.

Nos trabalhos [5] e [9], houve a inclusão desta característica, sendo este um marco na tentativa de reduzir para no máximo à metade, a função objetivo dos trabalhos [2] [3] e [4], assumindo que, uma placa j só poderia voltar para a sua pilha original φ_j , no caso de ocorrer no futuro um remanejamento para esta pilha (por este motivo afirmamos no máximo a metade). Na Figura 32 abaixo, a placa j é remanejada para a pilha τ durante o processo de atendimento de uma bobina

$i = 1$ e depois é remanejada de volta para pilha φ_j durante o processo de atendimento da bobina $i = 2$.

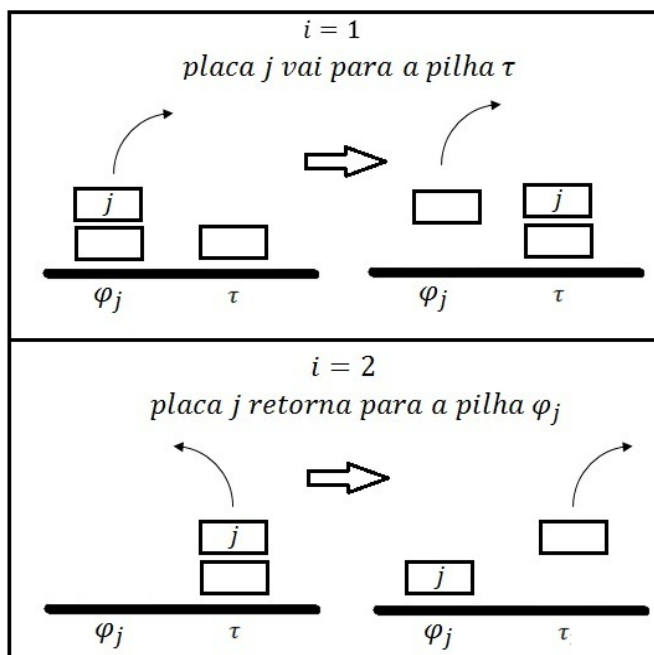


Figura 32 - A placa j é remanejada duas vezes no atendimento de duas bobinas diferentes. Fonte: Autoria própria

A ideia principal dessa nova característica nesses trabalhos foi aproveitar o remanejamento de placas candidatas para o topo de outras pilhas de maneira que, caso essas placas sejam utilizadas para laminar futuras bobinas, o custo de remanejamento para pegá-las seria zero. Conseqüentemente, a função objetivo destes trabalhos considera que se uma placa j , candidata a uma bobina i , já tenha sido remanejada durante o processo de atendimento de uma bobina k , onde $k < i$, o custo de movimentar a placa j será somente o de translação desta placa para a mesa de rolos.

Embora esta nova característica seja muito interessante do ponto de vista de redução de custo, conforme apresentando no exemplo da Figura 32 acima, a forma como ela foi considerada nos trabalhos [5] e [9] é questionável, fazendo com que a função objetivo do problema não represente o custo real do problema SSS. Representaremos aqui a forma como Tang modelou nesses dois trabalhos de sua autoria, explicaremos os pontos que divergem da realidade do problema e finalmente o porquê desta premissa ser a mais relevante desta dissertação.

Para considerar essa nova característica, as placas remanejadas devem ser remanejadas para alguma pilha do pátio segundo algum critério, alguma estratégia ou heurística para escolha desta pilha. Nos trabalhos [5] e [9] foi considerado que a placa remanejada durante o processo de atendimento de qualquer bobina, deve ser encaminhada para a pilha mais próxima possível, no intuito de se reduzir ao máximo a distância de remanejamento.

Abaixo apresentamos de forma simplificada o modelo proposto por Tang, adotando as mesmas notações já apresentadas previamente nesta dissertação para evitar confusões. Entretanto, uma forma simplificada de modelar foi escolhida para mostrar somente os reais questionamentos desta premissa, não considerando parâmetros irrelevantes presentes nos trabalhos [5] e [9] que não alteram a otimização. Sendo assim, o custo de atendimento de uma placa j que tenha sido escolhida para uma bobina i , que chamaremos aqui de W_{ij} , foi apresentado sendo:

$$W_{ij} = 2t_{\varphi_j 0} + D'_{ij}$$

Na expressão acima, $2t_{\varphi_j 0}$, quantifica o custo em unidade de tempo para se levar a placa j de sua pilha original φ_j para a mesa de rolos, aqui chamada de pilha '0', e depois retornar para a pilha φ_j . A outra variável, D'_{ij} , é uma variável que mensura a quantidade necessária de placas a se remanejar quando escolhemos a placa j para atender a bobina i . Esta é definida da seguinte forma:

$$D'_{ij} = \max\{D_j - \max\{X_{kn}(D_n + 1) \mid k = 1 \dots i - 1 \text{ e } \varphi_j = \varphi_n\}, 0\}$$

A equação acima depende de D_j , que representa a quantidade de placas acima da placa j , quando esta está ainda na pilha original (φ_j), ou seja, antes do início da execução da instrução de laminação. Depende de D_n , que por analogia a D_j , possui significado similar - quantidade de placas acima da placa n , quando esta está ainda na pilha original (φ_n). Depende também de X_{kn} , que é uma placa n que esteja localizada na mesma pilha que a placa j na configuração inicial do pátio ($\varphi_j = \varphi_n$), utilizada no atendimento de uma bobina k , onde k é uma bobina laminada anteriormente a bobina i , ou seja, $k = 1 \dots i - 1$.

Para entendermos a fundo a lógica da equação acima, seja a placa j_1 uma placa que tenha atendido a bobina k , e seja a placa j_2 uma placa que tenha atendido a bobina i , localizadas em uma mesma pilha no pátio ($\varphi_{j_1} = \varphi_{j_2}$), onde a placa j_1 é a placa mais próxima da placa j_2 dentre todas as placas desta pilha que possam ter sido utilizadas para atender alguma bobina antes do atendimento da bobina i , ou seja, uma bobina $k = 1..i - 1$. Na modelagem acima, duas situações podem ocorrer:

1. Se a placa j_1 estiver por cima da placa j_2 ;

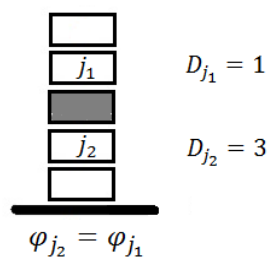


Figura 33 – Pilha exemplo de placas. Placa j_1 por cima da placa j_2 . Fonte: Autoria própria.

Neste caso a placa j_1 já saiu do pátio e já remanejou as placas que estão por cima dela mesma, ao atender a bobina k . Consequentemente todas as placas remanejadas pela placa j_1 e a própria placa j_1 já não se encontram em cima da placa j_2 . Neste caso a equação a cima se resume ao seguinte custo D'_{ij_2}

$$D'_{ij_2} = \max\{D_{j_2} - (D_{j_1} + 1), 0\} = D_{j_2} - D_{j_1} - 1$$

O custo D'_{ij_2} é contabilizado como a quantidade de remanejamentos necessários para utilizar a placa j_2 para atender a bobina i , que neste caso, é a quantidade de placas que estão entre a placa j_1 e a placa j_2 menos a própria placa j_1 que já deixou o pátio ao atender a bobina k ($D_{j_2} - D_{j_1} - 1$). Como a placa j_1 esta por cima, o resultado do *max* da equação acima será maior ou igual a zero (podendo ser zero caso não haja placas entre as elas). No exemplo da Figura 33 acima, o custo seria de remanejar somente a placa em cinza e transportar a placa j_2 para mesa de rolos. A Figura 34 abaixo ilustra o processo de atendimento das bobinas i e k em forma de exemplo para facilitar o entendimento:

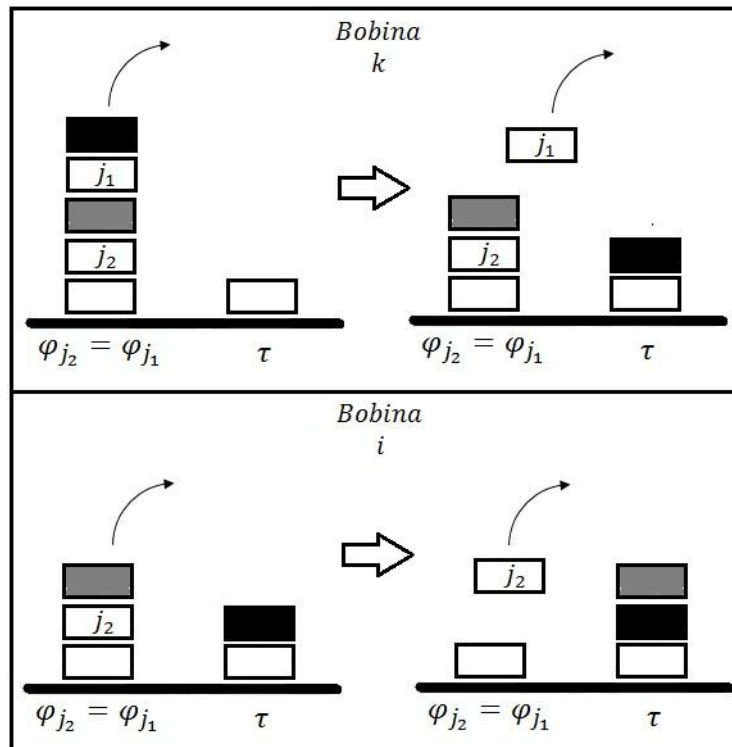


Figura 34 – Atendimento de duas bobinas (k e i), sendo a placa j_1 utilizada para a bobina k e a placa j_2 utilizada para a bobina i . Fonte: Autoria própria.

2. Se a placa j_2 estiver por cima da placa j_1

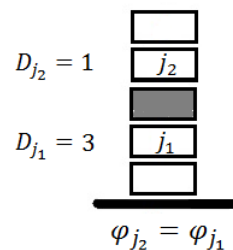


Figura 35 - Pilha exemplo de placas. Placa j_2 por cima da placa j_1 . Fonte: Autoria própria.

Neste caso a placa j_1 já saiu do pátio e já remanejou as placas que estão por cima dela mesma, ao atender a bobina k . Consequentemente, como a placa j_2 está por cima da placa j_1 , ela não se encontra mais na sua pilha original φ_{j_2} , pois já foi também remanejada pela placa j_1 . Neste caso a equação a cima se resume ao seguinte custo D'_{ij_2}

$$D'_{ij_2} = \max\{D_{j_2} - (D_{j_1} + 1), 0\} = 0$$

O custo D'_{ij_2} é contabilizado como a quantidade de remanejamentos necessários para utilizar a placa j_2 para atender a bobina i , que neste caso será zero, uma vez que, a placa j_2 esta por cima da placa j_1 , tendo já sido remanejada, pois $D_{j_1} > D_{j_2}$. Dessa forma, o custo de movimentar a placa j_2 será somente o de translação desta placa para a mesa de rolos:

$$W_{ij_2} = 2t_{\varphi_{j_2}0}$$

Este exemplo é mostrado na Figura 36 abaixo que representa o processo de atendimento das bobinas i e k :

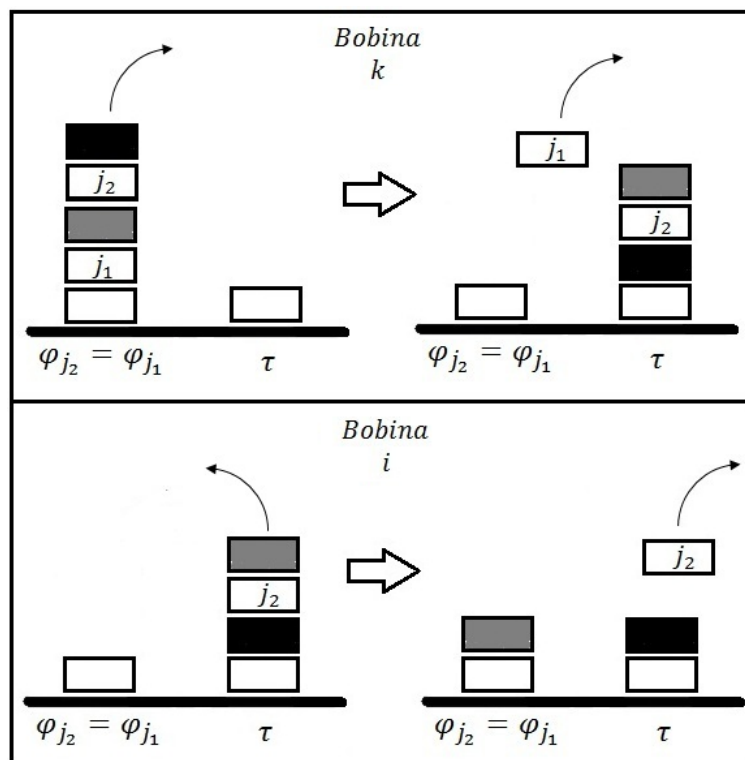


Figura 36 - Atendimento de 2 (duas) bobinas (k e i), sendo a placa j_1 utilizada para a bobina k e a placa j_2 utilizada para a bobina i . Fonte: Autoria própria.

O custo de movimentar a placa j_2 envolveu o remanejamento novamente da placa em cinza da figura acima, mesmo esta última já tendo sido remanejada pela placa j_1 . Entretanto, esse remanejamento isso só ocorreu durante o atendimento da bobina i . De fato, a modelagem proposta por Tang em [5] e [9]

falha em representar o custo real incorrido de movimentação ao testarmos esse segundo caso.

Além disso, a modelagem proposta não prevê o fato de uma placa candidata que tenha sido remanejada e que posteriormente seja utilizada, não esteja mais na pilha original, ou seja, na pilha da configuração inicial do pátio³. A consequência direta disso é a não representação do custo real de movimentação de uma placa na função objetivo desses trabalhos.

A conclusão para estes fatores é que o mesmo tipo de erro pode ocorrer para outras situações, acontecendo à mesma situação do quadrante inferior da Figura 36. O custo de movimentação da placa j_2 do exemplo acima é de fato maior que $2d_{\varphi_{j_2}0}$, sendo este igual a:

$$W_{ij_2} = 2t_{\varphi_{j_2}0} + t_{\tau\varphi_{j_2}}$$

A partir do exemplo apresentado na Figura 36, podemos generalizar esse tipo de situação em três típicos casos básicos, que trataremos com exemplos para facilitar a compreensão:

Caso 1: Seja uma placa j_1 , uma placa r_1 e uma placa r_2 , estando a placa r_2 por cima da placa r_1 e ambas por cima da placa j_1 em uma mesma pilha, conforme a Figura 37 abaixo:

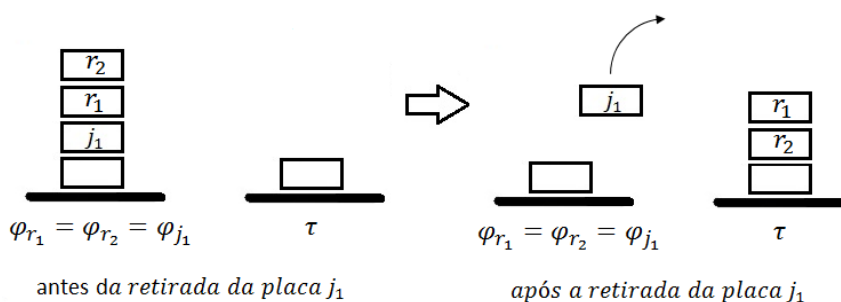


Figura 37 - Exemplo do Caso 1. Fonte: Autoria própria

³ A configuração inicial do pátio é um parâmetro de entrada para o problema 'SSS'. Este é definido como a disposição das placas no pátio no momento antes da execução de uma instrução de laminação. Este conceito está explicado no capítulo 8.

A placa r_1 foi remanejada para uma pilha τ durante o processo de atendimento de uma bobina i com a placa j_1 . A placa r_2 foi também remanejada para esta mesma pilha τ durante o processo de atendimento desta mesma bobina i . Logicamente a placa r_1 estará por cima da placa r_2 . A placa r_2 estará presa caso ela seja utilizada por alguma bobina antes da placa r_1 ser utilizada, ou até mesmo se a placa r_1 não vier a ser utilizada para nenhuma bobina do restante do horizonte de programação.

Caso 2: Seja uma placa j_1 e uma placa r_1 estando a placa r_1 por cima da placa j_1 em uma pilha. Seja também uma placa j_2 , em outra pilha τ qualquer do pátio, conforme a Figura 38 abaixo:

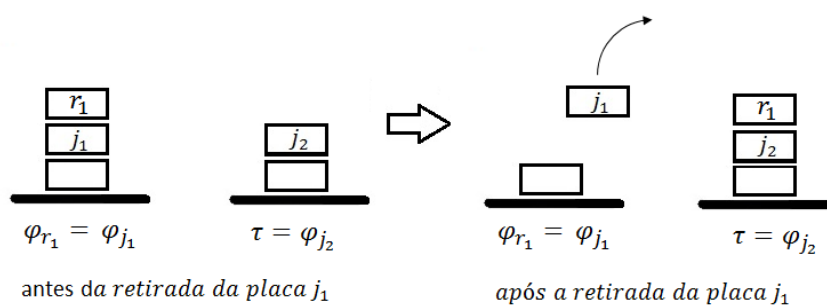


Figura 38 - Exemplo do Caso 2. Fonte: Autoria Própria

A placa r_1 foi remanejada durante o processo de atendimento de uma bobina i com a placa j_1 para uma pilha τ , onde esta localizada uma placa j_2 que é candidata para uma bobina posterior $i + 1$. Logicamente a placa r_1 estará por cima da placa j_2 . A placa j_2 estará presa caso ela seja utilizada por alguma bobina antes da placa r_1 ser utilizada, ou até mesmo se a placa r_1 não vier a ser utilizada para nenhuma bobina do restante do horizonte de programação.

Caso 3: Seja uma placa j_1 e uma placa r_1 estando a placa r_1 por cima da placa j_1 em uma pilha. Seja também uma placa j_2 e uma placa r_2 estando a placa r_2 por cima da placa j_2 em outra pilha do

pátio; seja também uma pilha intermediária τ conforme a Figura 39 abaixo:

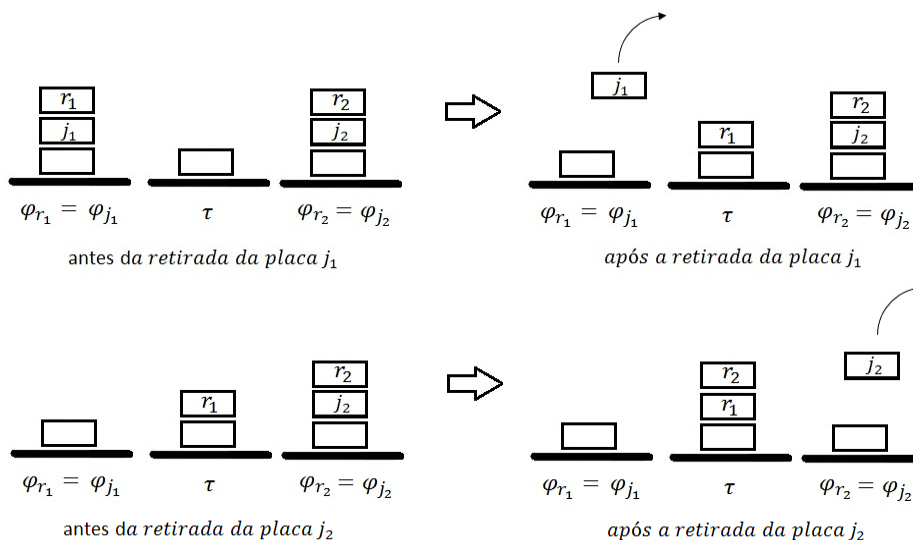


Figura 39 - Exemplo do Caso 3. Fonte: Autoria Própria

A placa r_1 foi remanejada para a pilha τ durante o processo de atendimento de uma bobina i com a placa j_1 . A placa r_2 também foi remanejada para a mesma pilha τ durante o processo de atendimento de uma bobina posterior $i + 1$ com a placa j_2 . Logicamente a placa r_2 estará por cima da placa r_1 . A placa r_1 estará presa caso ela seja utilizada por alguma bobina antes da placa r_2 ser utilizada, ou até mesmo se a placa r_2 não vier a ser utilizada para nenhuma bobina do restante do horizonte de programação.

Com os três casos acima, concluímos os três casos básicos na qual um remanejamento adicional se faz necessário.

Podemos concluir que, a estratégia sugerida por Tang, na qual as placas remanejadas são encaminhadas para a pilha mais próxima possível, pode incorrer em uma otimização local no problema de atendimento de todas as bobinas do horizonte de programação, além de não considerar a existência deste duplo manuseio. O que queremos mostrar é que após sucessivos remanejamentos um dos três casos acima pode ocorrer. Portanto, a modelagem proposta por Tang nos trabalhos [5] e [9] para mudança desta premissa e conseqüentemente a inclusão

dessa nova característica de não retornar com as placas, não possui premissas em sua modelagem que prevejam a necessidade desse remanejamento adicional necessário. Consequentemente, a quantificação do custo real de movimentação de placas em um pátio fica prejudicada.

Uma forma de buscar endereçar corretamente este custo de movimentação seria a partir da inclusão de variáveis de decisão para escolha do destino ótimo das placas remanejadas, conforme sugerido por Fernandes para trabalhos futuros em [8]. Esta variável de decisão não foi incluída nos trabalhos disponíveis na literatura até o presente momento.

Neste trabalho, a inclusão desse tipo de variável será considerada, buscando-se endereçar corretamente o custo real de movimentação de placas na função objetivo. A modelagem que será utilizada evidencia a existências desses casos básicos, mas não considera a possibilidade de ocorrência dos mesmos na solução ótima, ou seja, apresenta restrições que podam essas soluções do espaço de solução do problema. Isto com certeza é uma limitação deste modelo, pois podemos inviabilizar a resolução de uma instância do modelo. Esse é o motivo pelo qual essa premissa é uma das mais relevantes desta dissertação.

5. Uma placa poder ser remanejada mais de uma vez;

Esta premissa depende exclusivamente da premissa quatro apresentada acima. Se sempre após o atendimento de uma bobina i com uma placa j , as placas remanejadas retornarem imediatamente para a pilha original mantendo-se a configuração inicial desta pilha a menos da placa que deixou o pátio, uma dessas placas que foram remanejadas poderão ou não ser remanejada mais de uma vez. Isto vai acontecer caso haja mais alguma placa na mesma pilha da placa j a ser utilizada para a próxima bobina $i + 1$. Portanto, as placas que foram remanejadas durante o atendimento da bobina i poderão ser remanejadas novamente durante o atendimento de bobinas $k > i$. Essa situação pode ocorrer em alguns exemplos quando se aplica as modelagens dos trabalhos [2], [3], [4] e [8], sendo uma consequência direta da escolha por retornar com as placas remanejadas na premissa quatro. O exemplo da Figura 31 é um exemplo desta premissa.

Se escolhermos por não retornar com a placa imediatamente, uma placa pode ser remanejada mais de uma vez caso ocorra um dos três casos apresentados

na premissa quatro. Na modelagem proposta por Tang, esses três casos poderiam ocorrer, mas não foram previstos em sua modelagem e, portanto, as placas só podem ser remanejadas uma única vez.

Como neste trabalho optamos por não retornar com a placa imediatamente e, por isso, incluiu-se variáveis de decisão para escolha do destino ótimo das placas remanejadas, as placas teoricamente poderiam ser remanejadas mais de uma vez. Entretanto, embora os três casos apresentados tenham sido previstos, estes serão contornados na modelagem, conforme será demonstrado no capítulo 8. Isto significa que o espaço de busca do problema será cortado, suprimindo-se qualquer tipo de solução na qual um dos três casos apresentados ocorram. Desta forma, estamos ‘podando’ o espaço de busca do problema, sendo esta, portanto, uma limitação do modelo que será apresentando nessa dissertação. O intuito desta ‘poda’ é facilitar a modelagem matemática.

6. Execução de todas as atividades de movimentação das placas com ponte-rolante que abrange todo o pátio;

Todas as movimentações serão realizadas por um equipamento conhecido como ponte rolante já apresentado na seção 4.1 deste capítulo.

7. O custo associado de movimentação das placas escolhidas depende da quantidade de remanejamentos e do custo de transferência da placa escolhida para mesa de rolos;

Esta premissa se refere à forma de custear as movimentações realizadas em cada operação de atendimento. Esta premissa visa definir diretamente a função objetivo do problema e logicamente depende da premissa 6. Basicamente, devemos definir o custo baseado em parâmetros básicos como velocidade de deslocamento e içamento do equipamento ponte rolantes, a distância entre pilhas e o layout do pátio de placas que já foi definido anteriormente. Para este trabalho, iremos considerar todos esses parâmetros.

Em [2], [3], [4] e [8], os autores quantificaram o custo da função objetivo do problema de otimização como a quantidade de remanejamentos necessários para se atender toda a instrução de laminação. Dessa forma, não foi necessária a

apresentação dos parâmetros acima, nem mesmo definir qual equipamento realiza as movimentações das placas, embora esta última definição tenha sido feita em todos estes trabalhos. Em [5], foi a primeira vez que a função objetivo levou em consideração o tempo. Em [9] a mesma função objetivo foi utilizada. Entretanto, todos os parâmetros definidos foram somente nesta dimensão, não levando em consideração distância entre pilhas e velocidades.

As pontes rolantes possuem três graus de liberdade, podendo se locomover nas três dimensões, realizando movimentos longitudinais, transversais e verticais. Possuem geralmente três componentes básicos: viga, carro e talha. A tabela abaixo visa definir as velocidades médias consideradas para cada um dessas componentes, baseando-se na ponte rolante do pátio de placas da Usiminas Cubatão:

Tabela 3 - Velocidade média dos módulos da ponte rolante Fonte: Usiminas Cubatão.

Parte	Tipo de Movimento	Parâmetro Definido	Velocidades (m/min)
Viga	Longitudinal	V_l	160
Carro	Transversal	V_t	130
Talha	Vertical	V_v	80

A distância entre pilhas é necessária para que se possa calcular o tempo gasto para se movimentar uma placa de uma pilha para outra e também para a mesa de rolos. Este parâmetro, que iremos chamar de $t_{\tau_1\tau_2}$ é uma matriz que calcula o tempo de deslocamento entre todas as pilhas do pátio, inclusive a distância de qualquer pilha até a mesa de rolos, podendo obviamente esta mesa ser considerada também como uma pilha no pátio. Dessa forma, $t_{\tau_1\tau_2}$ calcula o tempo de deslocamento entre as pilhas τ_1 e τ_2 do pátio em função das velocidades da Tabela 3 acima. Esta é a primeira vez que esse parâmetro é definido, uma vez que, a função objetivo dos trabalhos [5] e [9] somente levou em consideração o tempo. Nesta modelagem, a pilha na qual uma placa j qualquer esta localizada no início de execução da programação será representada por φ_j .

5

Motivação

Para motivar o estudo do problema SSS na indústria siderúrgica brasileira, apresentaremos fatores econômicos atuais do Brasil e uma revisão bibliográfica da literatura especializada neste assunto com análise individual de cada trabalho estudado.

Em 2010 o total de importação de aço no Brasil (direto e indireto) ultrapassou a capacidade produtiva da maior usina em operação do país, chegando ao surpreendente número de 10 milhões de toneladas por ano [13]. Estes números se explicam pela deficiência das usinas brasileiras em serem competitivas em custo – basicamente em prestação de serviços e logística. Em Maio de 2011 em Congresso na ABM⁴, o presidente do IABR mencionou que um dos principais desafios da siderurgia brasileira no panorama atual é a competitividade sistêmica que inclui câmbio, tributos e logística [13]. Entretanto, esses desafios estão ligados à política de desenvolvimento do país como políticas monetárias e fiscais, e nada tem haver com a redução de custo operacional interno da siderurgia.

A competitividade em custo de operação interno é sem dúvida o principal foco dos grandes produtores de aço do Brasil no cenário atual. Esta competitividade é exclusivamente dependente dos custos internos de produção, sendo uma das melhores formas que uma siderúrgica ou um grupo siderúrgico pode por si só atuar, independente dos fatores econômicos externos da economia ou ações de políticas independentes e/ou sem fundamentos promovidos pelo governo. Além disso, no Brasil, muitos desses fatores econômicos são também controlados pelo governo, o que prejudica ainda mais as manobras de mercado das empresas privadas. Portanto, sendo a competitividade sistêmica um fator exógeno aos grupos empresariais siderúrgico, pois é totalmente dependente de influências políticas e da atividade econômica mundial, o foco é a busca de potenciais itens de redução do custo operacionais internos de produção.

⁴Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração - <http://www.abmbrasil.com.br/>

A logística interna de materiais primas, produtos semiacabados e acabados é um desses principais itens de custo operacional interno da siderurgia brasileira. Esta atividade está frequentemente atrelada à prestação de serviço de terceiros – empresas especializadas no segmento siderúrgico que realizam serviços exclusivos de movimentação de materiais. Portanto, é na redução de custo de logística interna que este trabalho ganha espaço e importância, uma vez que contribui com um dos principais desafios das usinas siderúrgicas – ganho de competitividade através de redução de custo interno operacional.

Na área de produção de produtos laminados do tipo planos, a placa de aço é a principal matéria prima para estes produtos. Existem diversas ineficiências no processo logístico de placas que carecem de estudos científicos. A produção de produtos laminados planos em 2011 foi da ordem de 14 milhões de toneladas, o que significa um total de mais de 900 mil placas de aço laminadas neste ano. Desta forma a busca em redução de custo em logística interna de placas de aço tem atraído cada vez mais a atenção das usinas e de empresas prestadores de serviços do setor, no Brasil e no mundo.

É difícil encontrar usinas que possuem ferramentas de gerenciamento da movimentação de placas dentro de suas instalações para controle e rastreamento. É óbvio que, sem uma ferramenta de gerenciamento e controle, seria impossível e até mesmo inútil utilizar recursos de otimização neste ambiente. Ainda assim, verifica-se que, as usinas que possuem tais ferramentas de gerenciamento, raríssimas são as que possuem também ferramentas de otimização das atividades de um pátio de placas (local onde as placas ficam temporariamente armazenadas no processo). Quando ainda possuem esta última, são utilizadas heurísticas que não possuem compromisso com critérios baseados em otimalidade. Portanto, é possível claramente perceber lacunas na indústria no tema relativo à otimização em logística interna de placas em pátio de placas.

A literatura disponível sobre este assunto é bastante reduzida. Na literatura pesquisada, somente um trabalho brasileiro foi encontrado. Este trabalho fala da aplicação de uma estratégia de operação de pátio de placas na ArcelorMittal Tubarão⁵ [10]. Entretanto este trabalho não apresentou nenhum modelo de otimização. Somente foi apresentada a experiência da usina em utilizar modelos

⁵ Usina do grupo ArcelorMittal produtora de aço carbono, planos, localizada em Vitória no Espírito Santo.

de simulação de computador para descrever a operação completa de um pátio de placas e com isso procurar lacunas de aumento de produtividade em eventos operacionais pontuais da logística interna de placas. Além disso, o trabalho não se referiu ao principal gargalo de um pátio de placas que é o remanejamento de placas entre pilhas no processo de atendimento de uma laminação.

O problema de remanejamento de placas entre pilhas ocorre tipicamente dentro de um pátio de placas no processo de atendimento de uma laminação. Deve-se escolher uma placa entre um conjunto de placas para atender cada bobina (produto laminado) em um horizonte de programação de bobinas de uma laminação. As placas estão dispostas em pilhas e naturalmente muitas placas requeridas encontram-se embaixo de outras placas. Portanto, se tivermos, por exemplo, um pátio com 100 placas dispostas em 10 pilhas, e precisarmos laminar 50 bobinas, deveremos manusear 50 placas para cada uma das 50 bobinas de maneira a reduzir ao máximo o custo de remanejamento das placas entre pilhas, ou seja, evitar o desperdício de tempo e custo com atividades de remanejamento dentro do pátio. Na prática o desperdício de tempo pode também afetar diretamente em atraso de produção com conseqüente perda de produtividade. Já o aumento de remanejamentos, afeta diretamente no custo operacional de movimentação de placas dentro do pátio. Na literatura atual existem poucos trabalhos que endereçam especificamente este problema.

Este problema foi estudado pela primeira vez em 2001 no artigo de Tang [2]. Este primeiro trabalho foi de extrema relevância para o início dos estudos nesta área, uma vez que, descreveu, modelou e inseriu o problema dentro do contexto de operações de uma usina siderúrgica como sendo uma etapa relevante dentro do processo de logística interna de placas. Além disso, o problema de remanejamento de placas entre pilhas foi batizado de ‘SSS’ (*Slab Stack Shuffling*), sendo este nome o marco de referência na literatura. Mostrou-se que o problema de remanejamento de placas entre pilhas era não linear. A função objetivo do problema SSS foi definida como a quantidade total de remanejamento de placas ao se atender certa quantidade de bobinas (produtos laminados) de uma laminação em um horizonte conhecido, retornando sempre com as placas remanejadas para a posição original anterior ao remanejamento. Este trabalho apresentou como proposta de solução uma nova heurística de duas fases que gera uma solução viável para o problema e depois busca melhorá-la usando busca local. Esta

heurística é comparada com outra heurística gulosa também apresentada neste trabalho utilizada pela gerência de laminação da usina de *Shanghai BaoShan Iron and Steel Complex*, localizada na China. Na comparação das heurísticas, a nova proposta de L. Tang apresentou um ganho de até 15% no custo total de remanejamento de placas. Uma ressalva deste trabalho foi a não inclusão de tempo computacional dos algoritmos utilizados. Por este motivo fica difícil avaliar a relação ‘tempo x eficácia’ da heurística de duas fases proposta.

Em 2002, um novo artigo sobre o problema SSS foi apresentado [3], sendo este com escopo (modelagem e função objetivo) similar a [2]. Foi neste artigo a primeira vez que o problema foi formulado utilizando notações para utilização de programação inteira. Embora o problema tenha sido formulado desta forma, surgiram termos não lineares na modelagem. Conseqüentemente este problema foi definido pelo autor como muito difícil e o mesmo optou por utilizar ‘algoritmos genéticos’ (AG)⁶ para resolver o problema. Para este problema, foi construído um código genético modificado para representar as soluções do problema e desenvolver operadores genéticos pertinentes. Nas modificações no AG tradicional foram incluídas: uma modificação no operador de *crossover* para efetuar o cruzamento com o melhor resultado já encontrado; e uma busca local para soluções reticentes após várias gerações do algoritmo. A mesma função objetivo apresentada em [2] é utilizada neste modelo e a mesma comparação com a heurística gulosa utilizada na usina de *Shanghai BaoShan Iron and Steel Complex* é também realizada. Os resultados encontrados foram em média 11,9% melhores que a heurística gulosa. Em contrapartida, utilizando AG os tempos computacionais foram bem maiores que a heurística gulosa chegando a poucas centenas de segundos. Mas por se tratar de uma otimização *off-line*, o tempo computacional não foi relevante na comparação. Finalmente, neste trabalho foi deixado como indicação para pesquisas futuras a utilização de algoritmos genéticos paralelos⁷.

Em 2004 a proposta sugerida em [3] de utilização de algoritmos genéticos paralelos foi realizada em [4], utilizando também como base o mesmo escopo do

⁶ Técnica de computação evolucionária para problemas de otimização, principalmente não lineares [20].

⁷ Algoritmos genéticos paralelos são inspirados em um processo evolutivo paralelo de uma população de indivíduos, ou seja duas ou mais populações sendo evoluídas e se comunicando durante o processo de seleção.

problema. Nesta abordagem dois novos operadores: operadores de crossover modificado e de seleção 'kin', foram propostos para melhorar ainda mais a solução proposta em [3]. É demonstrada uma melhora em eficiência adicional de em média de 6% nos testes realizados. Da mesma forma que em [1] este trabalho não incluiu o tempo computacional dos algoritmos utilizados. Por este motivo fica difícil avaliar o custo benefício de se utilizar esta abordagem.

Em julho de 2012 Fernandes propôs em [8] uma nova modelagem matemática para o problema SSS também utilizando programação linear inteira. Foi considerado escopo quase similar ao apresentado em [2], [3] e [4] sendo a única diferença relevante no escopo: à possibilidade de se resolver também problemas com placas em comum entre os conjuntos de placas candidatas. A modelagem matemática não utilizou funções de difícil linearização encontradas nos trabalhos anteriores. Este trabalho foi o primeiro a garantir uma solução ótima para este escopo do problema em todos os testes realizados. O problema foi facilmente linearizado com inclusão de novas variáveis e restrições para linearização do produto de variáveis binárias e, conseqüentemente, foi possível utilizar programação linear inteira para encontrar a solução ótima. A mesma função objetivo apresentada em [2], [3] e [4] foi utilizada e a mesma comparação com a heurística gulosa utilizada pela usina *Shanghai BaoShan Iron and Steel Complex* foi realizada. Entretanto, devido à possibilidade de haver placas em comum entre os conjuntos de placas candidatas, essa heurística gulosa necessitou ser modificada. Esta modificação fez com que a cada iteração do algoritmo, uma atualização dos conjuntos de placas candidatas ocorresse suprimindo-se as placas que já saíram do pátio dos conjuntos de placas candidatas à futuras bobinas. Com esta modificação, o algoritmo guloso ficou impossibilitado de escolher uma placa para anteder 2 bobinas diferentes. Os resultados encontrados foram em média 10% melhores que os da heurística gulosa. Embora a solução ótima tenha sido garantidamente encontrada e os ganhos não tenham sido tão melhores que a literatura existente para instâncias similares, este algoritmo encontrou a solução ótima em tempo muito menor que o tempo apresentado em [3], sendo este, aproximadamente mil vezes menor. Finalmente, este trabalho foi também um marco de relevância para o estudo do problema SSS.

Em todas os trabalhos citados até o momento, uma premissa interessante do escopo do problema foi utilizada: sempre após o atendimento de uma bobina,

as placas remanejadas devem retornar imediatamente para a pilha original, obviamente em ordem inversa que deixaram esta pilha, mantendo-se a configuração inicial da pilha a menos da placa que deixou o pátio para atender a respectiva bobina. Em nenhum dos trabalhos acima, é explicado o motivo de tal característica. O motivo de interesse desta premissa é o simples fato de o custo de manuseio total associado ao atendimento de uma bobina nas literaturas já apresentadas ser na teoria sempre o dobro da quantidade de placas remanejadas. Na prática, há outro motivo justificável para que essa premissa seja relevante e, conseqüentemente, usada na prática operacional. Muitas siderúrgicas não possuem um sistema de rastreamento *online*. Outras, quando possuem, seu sistema de rastreamento muitas vezes é ineficiente em atualizar a posição das placas remanejadas a cada atendimento de uma bobina. Desta forma, é razoável que os operadores sejam instruídos a sempre retornarem com as placas remanejadas como forma de se manter a posição original do pátio. Na realidade descrita acima, ainda que o custo total possa ser dobrado, benefícios para essa característica podem ser encontrados: garantia que as placas candidatas que sejam comuns entre conjuntos de placas candidatas consecutivos, mantenham-se na mesma pilha; um menor desbalanceamento entre pilhas, ou seja, que algumas pilhas estejam mais cheias que outras; possibilidade de perda de informação da nova posição onde as placas remanejadas foram alocadas, sendo difícil localizá-las no caso que sejam candidatas para atender outra bobina em um momento futuro. Além disso, essa premissa torna a modelagem matemática muito mais simples, como será mostrado no capítulo 4. Nos próximos trabalhos mencionados ([5] e [9]) e também neste trabalho, esta premissa de retorno imediato das placas remanejadas foi substituída pela realocação destas placas em uma nova pilha, conforme descritos no parágrafo a seguir e no capítulo 4 essa dissertação.

Em 2009 e 2010 foram publicados dois estudos feitos por Tang, [5] e [9], nos quais foram modificados razoavelmente o escopo do problema SSS. Em ambas as abordagens foram incluídas restrições temporais levando-se em consideração o planejamento (*schedule*) das pontes rolantes que efetuam os manuseios de placa dentro do pátio de placas. Basicamente estas restrições temporais impõem limitações de tempo máximo para atendimento de cada bobina do horizonte de programação. Foi incluída também a possibilidade de se usar mais de uma ponte rolante e conseqüentemente o balanço da alocação dessas atividades

entre essas pontes rolantes foi levado em consideração para garantir essas restrições temporais. Garantir essas restrições temporais significa realizar a expedição de todas as placas escolhidas sem atrasar o tempo máximo de atendimento de cada placa, ou seja, cada bobina produzida. Entretanto, a mudança mais significativa destes estudos foi a inclusão de uma nova característica na modelagem: não retornar com as placas remanejadas para as pilhas originais imediatamente após o atendimento de uma bobina. As placas remanejadas devem ficar em uma pilha próxima da pilha original, sendo esta pilha a de menor altura (quantidade de placas) ao redor da pilha original no pátio. Naturalmente, nestes trabalhos, a função objetivo endereça o custo total de movimentação da ponte rolantes ao invés de somente levar em consideração o custo de remanejamento das placas (quantidade de placas remanejadas). Uma consequência direta desta mudança é a redução de no máximo pela metade a função objetivo, uma vez que, as placas só podem voltar para as pilhas originais no caso de ocorrer um futuro remanejamento para estas pilhas. A ideia principal dessa nova característica é aproveitar o remanejamento de placas candidatas para o topo de outras pilhas de maneira que, caso essas placas sejam candidatas para futuras bobinas e também sejam escolhidas para atender alguma dessas bobinas, o custo de remanejamento para manuseá-las seria teoricamente zero.

Uma das particularidades do trabalho [5] foi a utilização de técnicas de programação dinâmica. Em uma primeira etapa o autor considerou cada bobina do horizonte de programação de bobinas como um estágio da programação dinâmica. Ao realizar essa consideração ele descobriu que a complexidade do problema seria de $O(F^M)$, onde M é o total de bobinas no horizonte e F é o número máximo de placas candidatas a uma bobina. Desta forma seria impossível utilizar programação dinâmica para grandes instâncias do problema. A proposta do autor foi segmentar as sequências consecutivas de bobinas com conjuntos de placas candidatas similares no horizonte de programação. Ao realizar essa segmentação a complexidade do problema passou a ser $O(nF^L)$, onde n é o número de segmentos e L é o tamanho máximo dos segmentos (assumido como não maior que oito neste trabalho). Embora o esforço tenha reduzido consideravelmente, esta heurística de segmentar tem um preço de perder a otimalidade global do problema. Para compensar essa perda de otimalidade o autor utilizou duas estratégias: reposicionamento de placas candidatas pertencentes a sequências consecutivas de

bobinas e a troca de placas candidatas com placas não utilizadas pertencentes ao conjunto de placas candidatas de bobinas vizinhas. Os resultados obtidos neste estudo são 10,76% melhores que uma heurística gulosa, não descrita pelo autor. Os tempos computacionais dos testes realizados foram na ordem de 10 segundos, número bastante inferior quando comparado com [3].

No trabalho [9] há duas particularidades relevantes. A primeira é a linearização do modelo matemático com técnicas de programação linear inteira, neste novo escopo de problema. A segunda é a divisão da solução em duas fases: uma fase de planejamento e outra fase de programação (*schedule*). Na fase de planejamento a solução ótima das placas que serão utilizadas para cada bobina é encontrada e na fase de programação a viabilidade da solução é testada ao dividirem-se as tarefas entre as pontes rolantes. Entretanto, neste estudo não foi considerada a característica de placas candidatas comuns entre os conjuntos de placas candidatas sendo essa uma grande deficiência da linearização proposta, uma vez que com a inclusão dessa característica fica fácil demonstrar que a linearização proposta não representa o custo original da função objetivo. O tempo computacional médio deste trabalho não foi citado e tão pouco foi segregado entre as etapas de planejamento e programação.

Finalmente, todos estes trabalhos citados que endereçaram o problema SSS levaram em consideração algumas premissas divergentes das que serão apresentadas nesta dissertação. Além disso, os novos conceitos apresentados em [5] e [9] de não retornar com as placas remanejadas são fortes e podem mascarar a solução ótima do problema, uma vez que, não são consideradas variáveis de decisão para escolha do destino ótimo das placas remanejadas. As funções objetivo destes mesmos trabalhos podem ser modificadas para ser mais realista ao quantificar o tempo gasto utilizado pela ponte rolante. Nesta dissertação, no capítulo 4 as diferenças foram oportunamente marcadas e explicadas para melhor comparação com os modelos já propostos na literatura.

Finalmente, a motivação deste trabalho está relacionada à proposição de uma nova abordagem para o problema SSS com inserção de novos conceitos no escopo do problema, na busca de minimizar ainda mais os custos de logística interna de placas de uma siderúrgica, em uma visão ampla de desenvolver soluções de engenharia para um dos grandes desafios da siderurgia brasileira atual: ganho de competitividade a partir de redução de custo interno operacional.

6

Objetivo

O objetivo deste estudo é construir um modelo de minimização de custos para encontrar melhores soluções para a logística interna de placas no processo de atendimento de uma laminação, através dos conceitos do problema SSS, para que este modelo possa ser aplicado na prática dentro de uma usina siderúrgica do país. O modelo será construído através de programação binária e terá sua função objetivo reformulada para dar mais representatividade ao problema real de um pátio de placas. Os estudos [5] e [9] serão questionados quanto à forma como foi apresentada a nova característica de não retornar com as placas remanejadas para suas respectivas pilhas originais. Após a equalização dos escopos, o estudo buscará uma redução no tempo médio de manuseio de placas (*TMM*)⁸ nesta proposta. O estudo será realizado em um típico pátio de placas encontrado em usinas integradas produtora de aços planos de alta produção de bobinas a quente (BQ).

Finalmente, o modelo busca demonstrar uma redução de custo compatível ao custo de implementação do modelo, com ganho de gestão notável e quantificável. Para esta demonstração, será apresentada redução de custo operacional como forma de viabilizar o investimento em uma ferramenta de gerenciamento que possa implementar o problema SSS proposto. Será construída uma análise de viabilidade econômica preliminar que buscará a criação de valor e retorno consistente do capital aplicado.

⁸ TMM significa tempo médio de manuseio de placas. É calculado pela razão entre o tempo total para manusear todas as placas de um horizonte de programação e o total de placas/bobinas deste mesmo horizonte. Este item será definido novamente no capítulo 9 de resultados.

7

Contribuição

As contribuições deste trabalho são: (i) apresentar um novo modelo que irá reduzir ainda mais o custo operacional de logística de placas dentro de um pátio de placas, quando comparado com toda a literatura prévia existente; (ii) propor um novo modelo de programação binária que corrige as novas ideias de não retornar com as placas remanejadas para as pilhas originais, apresentadas em [5] e em [9], com inclusão do conceito de placa remanejada e placa morta; (iii) ajuste da função objetivo do problema para custear não somente a quantidade de remanejamentos (*shuffles*) mas também a distância até a pilha na qual a placa esta sendo remanejada; (iv) aplicar o modelo em um típico pátio de placas de usinas siderúrgicas integradas produtora de aços planos e de alta produção de bobinas a quente (BQ).

Para isto será apresentado um novo tipo de variável de decisão que endereçará o destino das placas remanejadas a cada atendimento de uma bobina do horizonte de programação. Esta nova metodologia de decisão mudará sensivelmente o escopo do problema e trará um novo conceito: o balanço entre a escolha ótima das placas e o possível destino das placas remanejadas. Deverá se pesar a escolha da placa a ser laminada juntamente com a possibilidade de um bom remanejamento das placas que estão acima da mesma. Será mostrado no capítulo 8 que deverá se diferenciar esta decisão em função das placas remanejadas serem candidatas escolhidas, candidatas não escolhidas ou mortas.

Será apresentado um layout típico de um pátio de placas com as regras e premissas de movimentação consideradas e engajadas com o problema de remanejamento de placas entre pilhas (SSS).

Além disso, os modelos não lineares propostos nos trabalhos [2], [3], [4], [5], [8] e [9] serão resolvidos de forma linear a partir de um novo conjunto de restrições lineares, melhorando o tempo de otimização destes algoritmos.

Por fim, ao propor uma nova modelagem para o SSS, deseja-se fomentar cada vez mais a construção de uma ferramenta que possa resolver o problema SSS

em situações práticas do dia-a-dia e que possa ser implantada com alto custo benefício para as siderúrgicas.

Modelagem da nova proposta para o problema SSS

A modelagem proposta para resolução do problema SSS surge a partir das lacunas existentes na atual literatura, que foram discutidas na seção anterior de premissas para o problema. A modelagem é inovadora e eficaz, utilizando conceitos de programação linear binária, apresentado no trabalho [8] de Fernandes tanto para modelar quanto para resolver o problema SSS, além de uma modelagem fidedigna ao custo real de movimentação de um pátio de placas.

O modelo busca encontrar uma possível solução de placas para atenderem um horizonte de programação de bobinas (instrução de laminação), decidindo a cada atendimento o destino das placas remanejadas a partir da ponderação dos possíveis remanejamentos que cada solução irá ocasionar. Desta forma, o modelo conseguirá representar o custo de se manusear uma placa não só pela escolha das placas candidatas, mas também pelo custo inerente de remanejamento no processo de atendimento. O objetivo é simples: minimizar os custos de movimentação de placas dentro de um pátio de placas, durante o processo de atendimento de uma instrução de laminação (horizonte de programação), a partir da redução do tempo médio de movimentação das placas expedidas, respeitando as restrições e premissas de atendimento.

Antes de modelar o problema, apresentar seus parâmetros, variáveis e restrições, algumas definições foram criadas para facilitar o entendimento da modelagem.

As duas primeiras definições se referem ao conceito de placas candidatas e placas não candidatas. Dado um horizonte de programação, ou seja, uma quantidade fixa de bobinas a se produzir e conseqüentemente as placas candidatas que podem produzir cada uma dessas bobinas, podemos classificar as placas presentes no pátio em duas categorias: placas candidatas e placas mortas. Placas mortas são placas que estão no pátio e que não podem ser escolhidas para laminar nenhuma bobina do horizonte de programação, pelo simples fato de não serem candidatas a nenhuma bobina deste horizonte. Logicamente, o conjunto de placas mortas pode ser constituído através da subtração do conjunto total de placas

candidatas do conjunto total de placas que estão no pátio. Desta forma podemos definir:

- Conjunto de placas candidatas: placas que são candidatas a pelo menos uma bobina do horizonte de programação;

Este conjunto pode ser facilmente encontrado a partir da união de todos os conjuntos de placas candidatas C_i :

$$C = \bigcup_{i \in \Omega} C_i$$

Para exemplificar, seja um horizonte de programação com 3 (três) bobinas e o conjunto de placas no pátio $P = \{j_1, j_2, j_3, j_4, j_5, j_6\}$. Seja os seguintes conjuntos de placas candidatas por bobina:

$$C_1 = \{j_1, j_2\}$$

$$C_2 = \{j_2, j_3\}$$

$$C_3 = \{j_3, j_4\}$$

Logo o conjunto de placas candidatas C , neste caso, é:

$$C = \{j_1, j_2, j_3, j_4\}$$

- Conjunto de placas mortas: placas que não são candidatas a nenhuma bobina do horizonte de programação;

Utilizando o mesmo exemplo anterior, o conjunto de placas mortas é:

$$M = P \setminus C = \{j_5, j_6\}$$

Podemos definir também o conceito de placas remanejadas. Uma placa remanejada é uma placa que está necessariamente acima de uma placa candidata, na configuração original do pátio, ou seja, antes da execução do horizonte de

programação. Naturalmente uma placa remanejada pode ser tanto uma placa candidata como uma placa morta. Cada placa possui um conjunto de placas remanejadas, podendo cada conjunto possuir sua cardinalidade maior ou igual a zero. Dessa forma podemos definir:

- Conjunto de placas remanejadas: placas que são remanejadas a partir da movimentação de uma placa candidata qualquer;

Algumas propriedades podem ser destacadas para os conjuntos de placas remanejadas. Seja R_j o conjunto de placas remanejadas da placa j , R_p o conjunto de placas remanejadas da placa p , R_l o conjunto de placas remanejadas da placa l e R_v o conjunto de placas remanejadas da placa v . A Figura 40 abaixo apresenta a disposição das placas j, p, l, v em uma pilha qualquer.

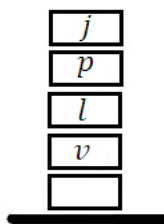


Figura 40- Pilha com as placas j, p, l, v . Fonte: Autoria própria

A placa j está no topo da pilha, e logo:

$$R_j = \emptyset$$

Para as demais placas da pilha, os conjuntos de placas remanejadas são:

$$R_p = \{j\}$$

$$R_l = \{p, j\}$$

$$R_v = \{l, p, j\}$$

Portanto, para uma mesma pilha sempre haverá interseção dos conjuntos de placas remanejadas, exceto com a placa que está no topo da pilha, neste caso a placa j . Logo, podemos definir:

$$R_l \cap R_n \neq \emptyset$$

$$\forall l, n, \quad \text{onde,} \quad \varphi_l = \varphi_n, D_l \neq 0, D_n \neq 0$$

Sendo assim, para duas placas pertencentes a pilhas distintas, a interseção desses conjuntos será sempre vazia:

$$R_l \cap R_n = \emptyset$$

$$\forall l, n, \quad \text{onde,} \quad \varphi_l \neq \varphi_n$$

Podemos definir o conjunto total de placas remanejadas como:

$$R = \bigcup_{l \in P} R_l$$

Outra definição pertinente é a da configuração inicial do pátio. Definimos esta configuração como sendo a situação anterior à execução da instrução de laminação, ou seja, antes de começarmos a manusear as placas para atender as bobinas pertencentes ao horizonte de programação.

- Configuração inicial do pátio: disposição das placas no pátio no momento antes da execução da instrução de laminação (horizonte de programação);

A configuração inicial do pátio é um parâmetro de entrada para o problema SSS. Qualquer instância gerada para teste do modelo que implementa o problema SSS deverá fornecer esta configuração como parâmetro. Os parâmetros que serão utilizados para definir uma configuração inicial neste trabalho são:

R_l → Conjunto de placas que são remanejadas pela placa l na configuração original do pátio

φ_l → Pilha onde está a placa l na configuração original do pátio

$t_{\tau_1 \tau_2}$ → Matriz de custo para levar a placa l da pilha τ_1 para a pilha τ_2

$h_l \rightarrow$ Altura da placa l na pilha φ_l na configuração original do pátio

$Re_{il} \rightarrow$ Matriz binária que identifica se uma placa l é remanejada ao atendermos uma bobina i , na configuração original do pátio

$Er_{jl} \rightarrow$ Matriz binária que identifica se a placa l é remanejada pela placa j , na configuração original do pátio

Essas definições serão de alta relevância para a criação de conjuntos e restrições nesta nova modelagem do problema SSS.

Sendo assim, para modelar o problema, iremos primeiramente definir índices, conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão. Posteriormente apresentaremos as restrições do modelo e por último a função objetivo que se deseja otimizar.

Índices:

$i, k, n, m \rightarrow$ Índices de bobinas

$l, j, p, v \rightarrow$ Índices de placas

$\tau \rightarrow$ Índice de pilhas do pátio

Conjuntos:

$\Omega \rightarrow$ Conjunto de bobinas no horizonte de programação

$P \rightarrow$ Conjunto de placas que estão no pátio

$\theta \rightarrow$ Conjunto de pilhas do pátio

$C_i \rightarrow$ Conjunto de placas candidatas à bobina i

$R_l \rightarrow$ Conjunto de placas que são remanejadas pela placa l na configuração original do pátio

$C \rightarrow$ Conjunto de placas candidatas que estão no pátio $\rightarrow C = \bigcup_{i \in \Omega} C_i$

$R \rightarrow$ Conjunto de placas remanejadas $\rightarrow R = \bigcup_{l \in P} R_l$

$M \rightarrow$ Conjunto de placas mortas que estão no pátio $\rightarrow M = P \setminus C$

Parâmetros

$\varphi_l \rightarrow$ Pilha onde está a placa l na configuração original do pátio

$t_{\tau_1 \tau_2} \rightarrow$ Matriz de custo para levar a placa l da pilha τ_1 para a pilha τ_2

$h_l \rightarrow$ Altura da placa l na pilha φ_l na configuração original do pátio

$Re_{il} \rightarrow$ Matriz binária que identifica se uma placa l é remanejada ao atendermos uma bobina i , na configuração original do pátio

$Er_{jl} \rightarrow$ Matriz binária que identifica se a placa l é remanejada pela placa j , na configuração original do pátio

Variáveis de Decisão:

$$X_{il} = \begin{cases} 1, & \text{se a placa } l \text{ é escolhida para atender a bobina } i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

X_l

$$= \begin{cases} 1, & \text{se a placa } l \text{ foi escolhida para atender alguma bobina no horizonte de programação} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$d_{l\tau i}$

$$= \begin{cases} 1, & \text{se a placa } l \text{ foi remanejada para a pilha } \tau \text{ no processo de atendimento da bobina } i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

A última variável de decisão, $d_{l\tau i}$ é pela primeira vez apresentada com objetivo de endereçar corretamente o custo real de remanejamento de placas, conforme discutido na seção de anterior. As placas que necessitem ser

remanejadas, à medida que vamos atendendo cada bobina i do horizonte de programação ($i = 1..|\Omega|$), em função da escolha da placa candidata j , que irá efetivamente atendê-la (X_{ij}), deverão ser encaminhadas para alguma pilha τ , obviamente diferente da pilha φ_j . Portanto a variável $d_{l\tau i}$ é binária representando a opção por se remanejar ou não uma placa l para uma pilha τ no instante i .

Função Objetivo:

$$\min \left(\sum_{i \in \Omega} \sum_{j \in C_i} X_{ij} W_{ij} + \sum_{l \in R} \sum_{\tau \in \{\theta \mid \tau \neq \varphi(l)\}} \sum_{i \in \Omega} d_{l\tau i} t_{\varphi(l)\tau} \right) \quad (1)$$

$$\text{onde: } W_{ij} = t_{\varphi(j)0} + \sum_{\tau \in \{\theta \mid \tau \neq \varphi(j)\}} \sum_{k=1}^{i-1} d_{j\tau k} (t_{\tau 0} - t_{\varphi(j)0}) \quad (1.1)$$

A equação (1) da função objetivo possui dois termos. O primeiro se refere ao custo de se manusear uma placa j candidata a uma bobina i para a mesa de rolos, dependendo do fato de esta já ter sido remanejada ou não durante o atendimento de uma bobina anterior a i . Caso a placa j já tenha sido remanejada, a variável de decisão de destino das placas remanejadas pela placa j será igual a um, $d_{j\tau k} = 1$, durante o atendimento de alguma bobina k , onde $k = 1..i-1$, para alguma pilha τ do pátio, sendo obviamente $\tau \neq \varphi_j$. Para esta situação a variável W_{ij} passa a quantificar o custo de transportar a placa j da nova pilha (pilha τ), local onde esta foi remanejada durante o atendimento da bobina k , para a mesa de rolos (pilha '0'). Logo, esta variável W_{ij} se resume a:

$$W_{ij} = \sum_{\tau \in \{\theta \mid \varphi(j) \neq \tau\}} \sum_{k=1}^{i-1} d_{j\tau k} t_{\tau 0}$$

Neste caso, ocorre um produto de variáveis binárias, típico da não linearidade do problema SSS. Este produto de variáveis será linearizado com técnica de linearização de produto de variáveis binárias apresentada no trabalho [8] por Fernandes.

Caso a placa j já não tenha sido remanejada durante o atendimento de alguma bobina k , a variável de decisão de destino das placas remanejadas para placa j será igual a zero, $d_{j\tau k} = 0$. Para esta situação a variável W_{ij} quantificará o custo de levar a placa j da pilha original φ_j para a mesa de rolos (pilha '0'). Logo nesta situação esta variável W_{ij} se resume a:

$$W_{ij} = t_{\varphi(j)0}$$

Este primeiro termo (1) da função objetivo só endereça o custo de transporte da placa j de onde quer que ela esteja para a mesa de rolos. Entretanto caso esta placa tenha sido remanejada da pilha original φ_j para uma pilha τ qualquer, o custo deste remanejamento não é quantificado neste termo. Portanto, o segundo termo (2) da equação (1) esta ligado diretamente com o custo de remanejamentos necessários para se remanejar uma placa j da pilha original φ_j para uma pilha τ qualquer (logicamente diferente da φ_j e diferente da mesa de rolos) durante o atendimento de uma bobina i qualquer, independente se esta placa será utilizada ou não para futuras bobinas.

Restrições de domínio das variáveis de decisão:

$$X_{il} \in \{0,1\} \quad (2)$$

$$X_l \in \{0,1\} \quad (3)$$

$$d_{l\tau i} \in \{0,1\} \quad (4)$$

Restrições de atendimento:

Restrição que exige que somente uma placa l seja escolhida dentre todas as placas candidatas C_i , para anteder uma bobina i :

$$\sum_{l \in C_i} X_{il} = 1 \quad (5)$$

$$\forall i \in \Omega$$

Restrição que evita que uma placa candidata (l) atenda a duas bobinas diferentes:

$$\sum_{i \in \Omega} X_{il} \leq 1 \quad (6)$$

$$\forall l \in C$$

Restrição que verifica se a placa candidata (l) foi escolhida no horizonte de programação Ω :

$$X_l = \sum_{i \in \Omega} X_{il} \quad (7)$$

$$\forall l \in C$$

Restrições de remanejamento:

O conjunto de restrições que será apresentado neste item irá limitar a aplicação da modelagem proposta nesta dissertação. Isso porque, as restrições criadas visam cortar do espaço de solução, as soluções na qual um dos três casos básicos apresentados na seção 4.3 apareça na solução ótima. Portanto, as restrições de remanejamento foram criadas para contornar estes três casos básicos apresentados, sendo este fato, uma limitação deste modelo.

Um total de oito restrições foi criado uma vez que se faz necessário tratar de forma diferente placas candidatas de placas mortas. Será possível entender em detalhe esta informação à medida que as restrições forem apresentadas, separando às em restrições por tipo de placa remanejada: candidata escolhidas, candidata não escolhidas ou morta.

- Placas candidatas escolhidas
 1. Seja uma placa l candidata ($l \in C$) que foi escolhida para atender a bobina i ($X_{il} = 1$), e uma placa v na qual $l \in R_v$ e $v \in C_m$ onde m é uma

bobina anterior à bobina i , ou seja, $m < i$. A Figura 41 apresenta essa situação.

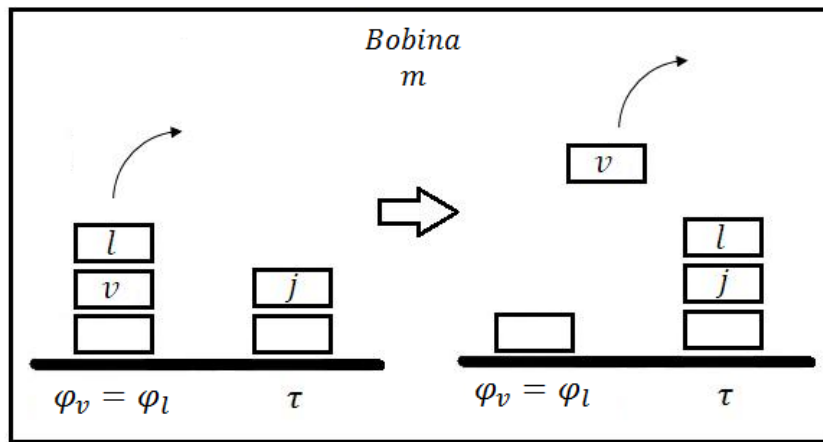


Figura 41 – Restrição de remanejamento. Atendimento da bobina m com a placa v . A placa l necessita ser remanejada. Fonte: Autoria própria

A placa candidata l não poderá ser remanejada pela placa v para uma pilha τ ($d_{l\tau m}$), que possua uma placa j que possa ser utilizada por uma bobina k posterior a bobina m e anterior a bobina i .

Essa situação cai exatamente no caso básico 2. Portanto a placa l teria que ser remanejada mais uma vez para liberar a placa j , conforme Figura 42 abaixo:

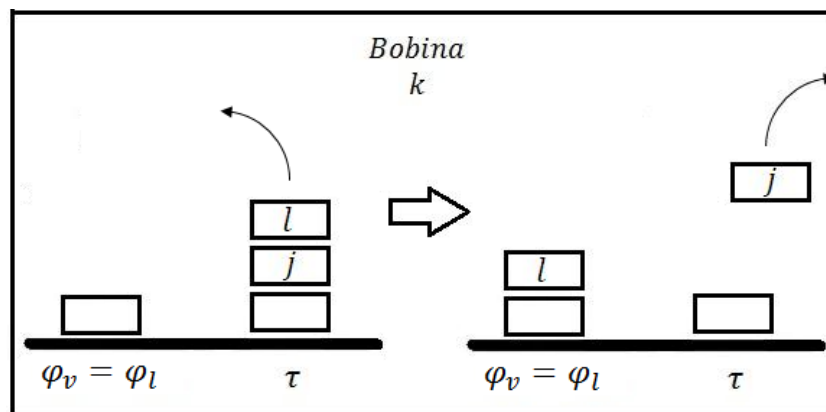


Figura 42 - Restrição de remanejamento. Atendimento da bobina k com a placa j . A placa l necessita ser remanejada novamente. Fonte: Autoria própria

O conjunto de restrições na equação (8) abaixo representa o caso 2 para placas candidatas escolhidas evitando que a situação apresentada acima possa ocorrer na solução ótima do problema:

$$\begin{aligned}
 X_{il} d_{l\tau m} + X_{kj} &\leq 1 & (8) \\
 \forall \tau \in \theta \\
 \forall i \in \Omega \\
 \forall m, \quad \text{tal que,} \quad 1 \leq m < i, \quad m \in \Omega \\
 \forall l, \quad \text{tal que,} \quad l \in \{C_i \mid \varphi_l \neq \tau \text{ e } Re_{ml} = 1\} \\
 \forall k, \quad \text{tal que,} \quad m < k < i, \quad k \in \Omega
 \end{aligned}$$

2. Seja uma placa p que esteja acima da placa l ($h_p > h_l$) e tenha sido remanejada para esta mesma pilha τ no mesmo processo de atendimento da bobina m ($X_{mp} = 1$ e $d_{p\tau m} = 1$). Dessa forma, a placa l estará por cima da placa p .

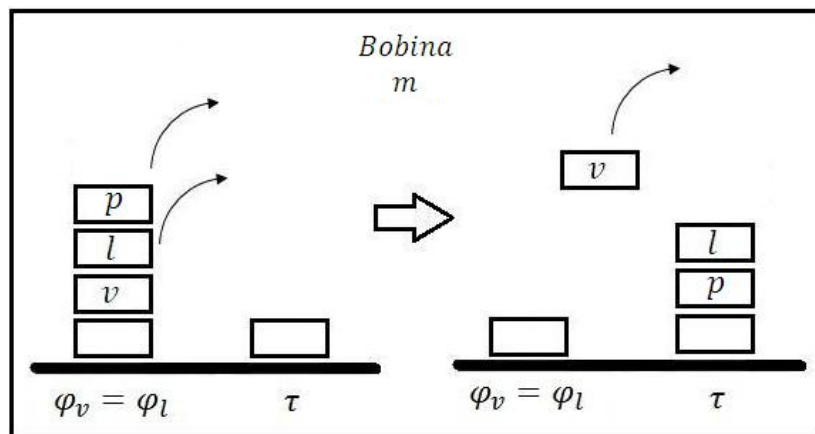


Figura 43 - Restrição de remanejamento. Atendimento da bobina m com a placa v . A placa l e a placa p necessitam ser remanejadas. Fonte: Autoria própria

Se esta placa p está saindo do pátio no processo de atendimento de uma bobina n ($X_{np} = 1$) posterior a bobina m e anterior a bobina i , teríamos exatamente o caso básico 1. Portanto, a placa l teria que ser remanejada mais uma vez para liberar a placa p , conforme Figura 44 abaixo:

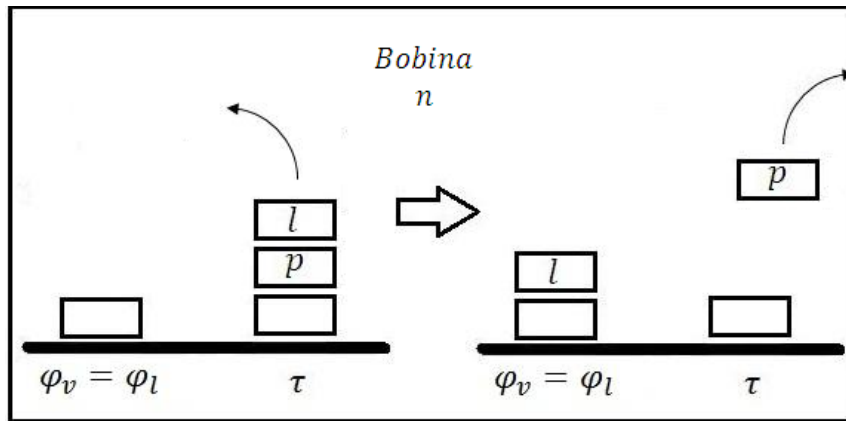


Figura 44 - Restrição de remanejamento. Atendimento da bobina n com a placa p . A placa l necessita ser remanejada novamente. Fonte: Autoria própria

O conjunto de restrições da equação (9) abaixo representa o caso 1 para placas candidatas escolhidas, evitando que a situação apresentada acima possa ocorrer na solução ótima do problema:

$$\begin{aligned}
 X_{il} d_{l\tau m} + d_{p\tau m} X_{np} &\leq 1 & (9) \\
 \forall \tau \in \theta \\
 \forall i \in \Omega \\
 \forall m, \quad \text{tal que,} \quad 1 \leq m < i, \quad m \in \Omega \\
 \forall l, \quad \text{tal que,} \quad l \in \{C_i \mid \varphi_l \neq \tau \text{ e } Re_{ml} = 1\} \\
 \forall n, \quad \text{tal que,} \quad m < n < i, \quad n \in \Omega \\
 \forall p, \quad \text{tal que,} \quad p \in \{C_n \mid \varphi_p \neq \tau, h_p > h_l, Re_{mp} = 1\}
 \end{aligned}$$

3. Seja uma placa p localizada em outra pilha (por exemplo, a pilha φ_p), e que tenha sido remanejada para a pilha τ no processo de atendimento de uma bobina c ($d_{p\tau c} = 1$), por uma placa j na qual $p \in R_j$ e $j \in C_c$, sendo c uma bobina anterior à bobina m ($c < m$).

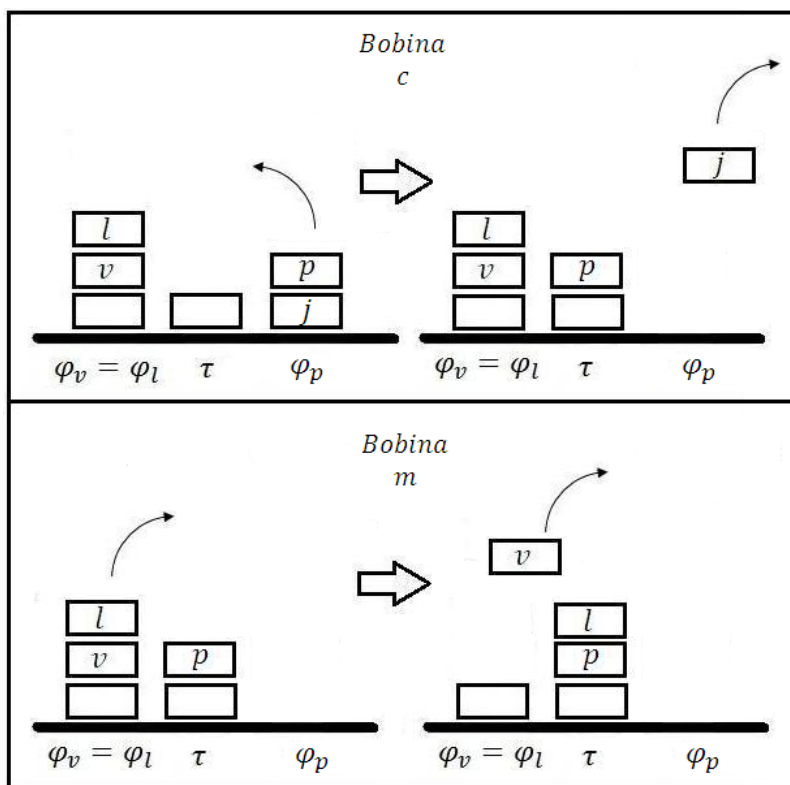


Figura 45 - Restrição de remanejamento. Atendimento da bobina c com a placa j e da bobina m com a placa v . A placa p e a placa l necessitam ser remanejadas. Fonte: Autoria própria

Se esta placa p está saindo do pátio no processo de atendimento de uma bobina n ($X_{np} = 1$) posterior a bobina m e anterior a bobina i , teríamos exatamente o caso básico 3. Portanto, a placa l teria que ser remanejada mais uma vez para liberar a placa p , conforme Figura 46 abaixo:

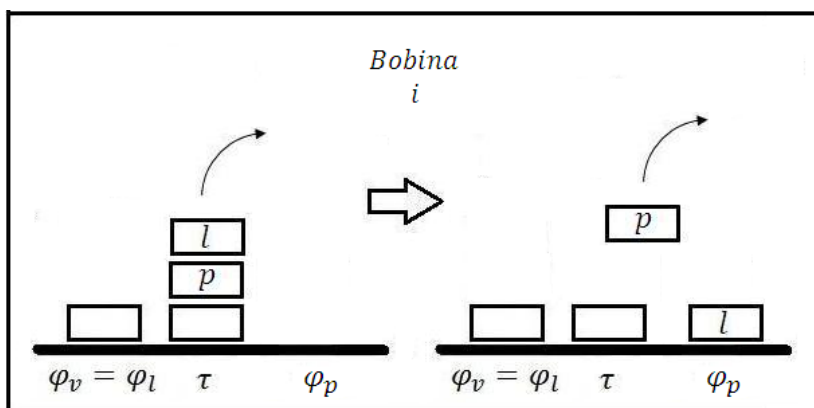


Figura 46 - Restrição de remanejamento. Atendimento da bobina i com a placa p . A placa l necessita ser remanejada novamente. Fonte: Autoria própria

O conjunto de restrições da equação (10) abaixo representa o caso 3 para placas candidatas escolhidas, evitando que a situação apresentada acima possa ocorrer na solução ótima do problema:

$$X_{il} d_{l\tau m} + d_{p\tau c} X_{np} \leq 1 \quad (10)$$

$$\forall \tau \in \theta$$

$$\forall m, \quad \text{tal que,} \quad 1 \leq m < i, \quad m \in \Omega$$

$$\forall i \in \Omega$$

$$\forall l, \quad \text{tal que,} \quad l \in \{C_i \mid \varphi_l \neq \tau \text{ e } Re_{ml} = 1\}$$

$$\forall c, \quad \text{tal que,} \quad 1 \leq c < m, \quad c \in \Omega$$

$$\forall n, \quad \text{tal que,} \quad m < n < i, \quad n \in \Omega$$

$$\forall p, \quad \text{tal que,} \quad p \in \{C_n \mid \varphi_p \neq \tau \text{ e } Re_{cp} = 1\}$$

- Placas candidatas não escolhidas

1. Seja uma placa l candidata ($l \in C$) que não tenha sido escolhida no horizonte de programação ($X_l = 0$) e tenha sido remanejada no processo de atendimento da bobina i ($d_{l\tau i} = 1$), por uma placa v na qual $l \in R_v$ e $v \in C_i$.

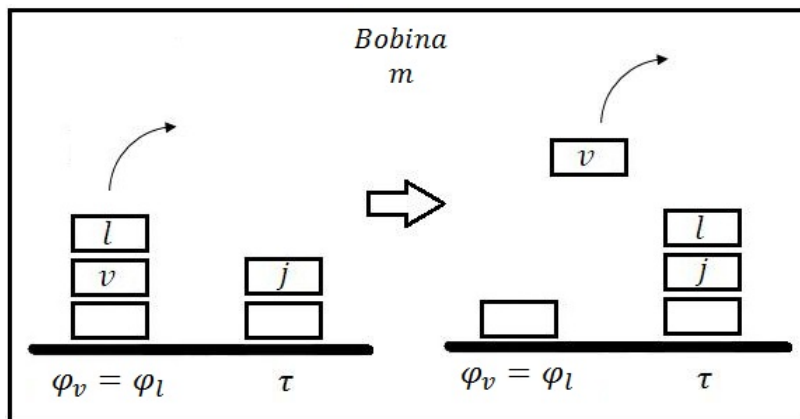


Figura 47 - Restrição de remanejamento. Atendimento da bobina m com a placa v . A placa l necessita ser remanejada. Fonte: Autoria própria

Se esta placa l for remanejada para a pilha τ que possua uma placa j que possa ser utilizada para uma bobina k posterior a bobina i , cairíamos exatamente no caso básico 2 com a placa l se comportando como uma

placa morta e portanto teria que ser remanejada mais uma vez para liberar a placa j , conforme Figura 42 já apresentada anteriormente.

O conjunto de restrições na equação (11) abaixo representa o caso 2 para placas candidatas não escolhidas evitando que a situação apresentada acima possa ocorrer na solução ótima do problema:

$$d_{l\tau i} - X_l + X_{kj} \leq 1 \quad (11)$$

$$\forall i \in \Omega$$

$$\forall \tau \in \theta$$

$$\forall l, \quad \text{tal que,} \quad l \in \{C \mid \varphi_l \neq \tau \text{ e } Re_{il} = 1\}$$

$$\forall k, \quad \text{tal que,} \quad k > i, \quad k \in \Omega$$

2. A mesma placa candidata l também não poderá ser remanejada para uma pilha τ que possua uma placa p que tenha sido remanejada para esta mesma pilha τ no processo de atendimento de uma bobina m anterior a bobina i .

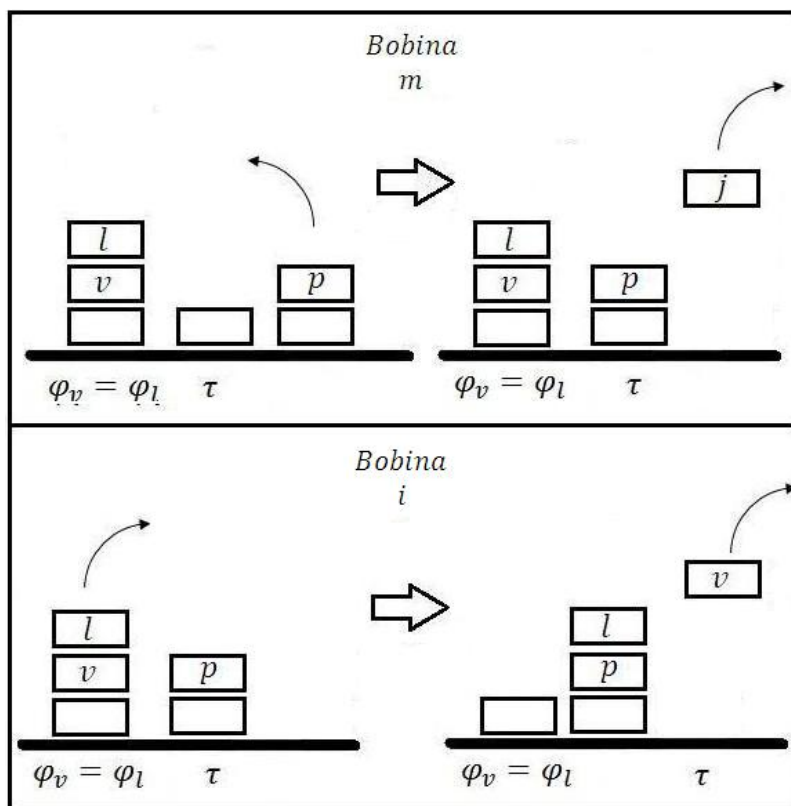


Figura 48 - Restrição de remanejamento. Atendimento da bobina m com a placa j e da bobina i com a placa v . A placa p e a placa l necessitam ser remanejadas. Fonte: Autoria própria

Se esta placa p está saindo do pátio no processo de atendimento de uma bobina n ($X_{np} = 1$) posterior a bobina i , teríamos exatamente o caso básico 3 com a placa l se comportando como uma placa morta e portanto esta terá que ser remanejada mais uma vez para liberar a placa p , conforme Figura 46 já apresentada anteriormente.

O conjunto de restrições da equação (12) abaixo contorna o caso 3 para placas candidatas não escolhidas evitando que a situação apresentada acima possa ocorrer na solução ótima do problema:

$$d_{l\tau i} - X_l + d_{p\tau m} X_{np} \leq 1 \quad (12)$$

$$\forall i \in \Omega$$

$$\forall \tau \in \theta$$

$$\forall l, \quad \text{tal que,} \quad l \in \{C \mid \varphi_l \neq \tau \text{ e } Re_{il} = 1\}$$

$$\forall m, \quad \text{tal que,} \quad 1 \leq m < i, \quad m \in \Omega$$

$$\forall n, \quad \text{tal que,} \quad n > i, \quad n \in \Omega$$

$$\forall p, \quad \text{tal que,} \quad p \in \{C_n \mid \varphi_p \neq \tau \text{ e } Re_{mp} = 1\}$$

- Placas mortas
1. Seja uma placa l morta ($l \in M$) que tenha sido remanejada no processo de atendimento da bobina i ($d_{l\tau i} = 1$), e uma placa v na qual $l \in R_v$ e $v \in C_i$.

Se esta placa l for remanejada para a pilha τ que possua uma placa j que possa ser utilizada para uma bobina k posterior a bobina i , cairíamos exatamente no caso básico 2 com a placa l sendo uma placa morta e portanto teria que ser remanejada mais uma vez para liberar a placa j , conforme exemplo similar da Figura 41 e Figura 42 já apresentadas acima.

O conjunto de restrições na equação (13) abaixo contorna o caso 2 para placas mortas evitando que a situação apresentada acima possa ocorrer na solução ótima do problema:

$$d_{l\tau i} + X_{kj} \leq 1 \quad (13)$$

$$\forall i \in \Omega;$$

$$\forall \tau \in \theta$$

$$\forall l, \quad \text{tal que,} \quad l \in \{M \mid \varphi_l \neq \tau \text{ e } Re_{il} = 1\}$$

$$\forall k, \quad \text{tal que,} \quad k > i, \quad k \in \Omega$$

2. A mesma placa candidata l também não poderá ser remanejada para uma pilha τ que possua uma placa p que tenha sido remanejada para esta mesma pilha τ no processo de atendimento de uma bobina m anterior a bobina i .

Se esta placa p está saindo do pátio no processo de atendimento de uma bobina n ($X_{np} = 1$) posterior a bobina i , teríamos exatamente o caso básico 3 com a placa l sendo uma placa morta e portanto esta teria que ser remanejada mais uma vez para liberar a placa p , conforme exemplo similar da Figura 46 já apresentada acima.

O conjunto de restrições na equação (14) abaixo representa o caso 3 para placas mortas evitando que a situação apresentada acima possa ocorrer na solução ótima do problema:

$$d_{l\tau i} + d_{p\tau m} X_{np} \leq 1 \quad (14)$$

$$\forall i \in \Omega;$$

$$\forall \tau \in \theta$$

$$\forall l, \quad \text{tal que,} \quad l \in \{M \mid \varphi_l \neq \tau \text{ e } Re_{il} = 1\}$$

$$\forall m, \quad \text{tal que,} \quad 1 \leq m < i, \quad m \in \Omega$$

$$\forall n, \quad \text{tal que,} \quad n > i, \quad n \in \Omega$$

$$\forall p, \quad \text{tal que,} \quad p \in \{C_n \mid \varphi_p \neq \tau \text{ e } Re_{mp} = 1\}$$

3. Seja uma placa p que esteja acima da placa l ($h_p > h_l$) e tenha sido remanejada para esta mesma pilha τ no mesmo processo de atendimento da bobina i ($X_{ip} = 1$ e $d_{p\tau i} = 1$). Logicamente, a placa l estará por cima da placa p na pilha τ .

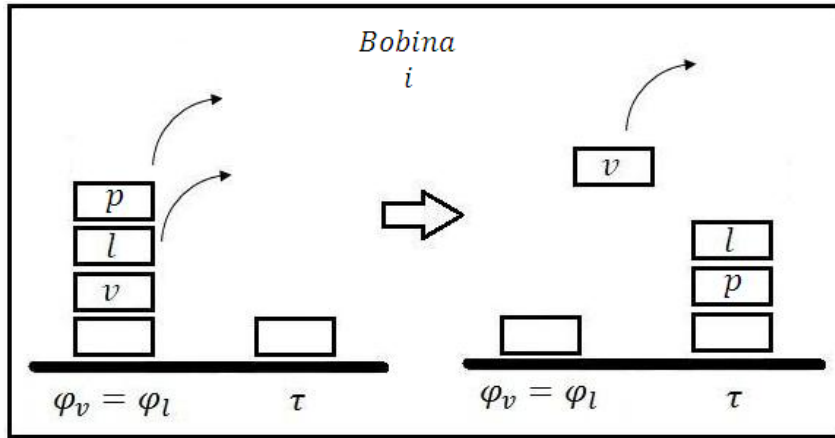


Figura 49 - Restrição de remanejamento. Atendimento da bobina i com a placa v . A placa l e a placa p necessitam ser remanejadas. Fonte: Autoria própria

Se esta placa p está saindo do pátio no processo de atendimento de uma bobina n ($X_{np} = 1$) posterior a bobina i , teríamos exatamente o caso básico 1. Portanto, a placa l (placa morta) teria que ser remanejada mais uma vez para liberar a placa p , conforme Figura 50 abaixo:

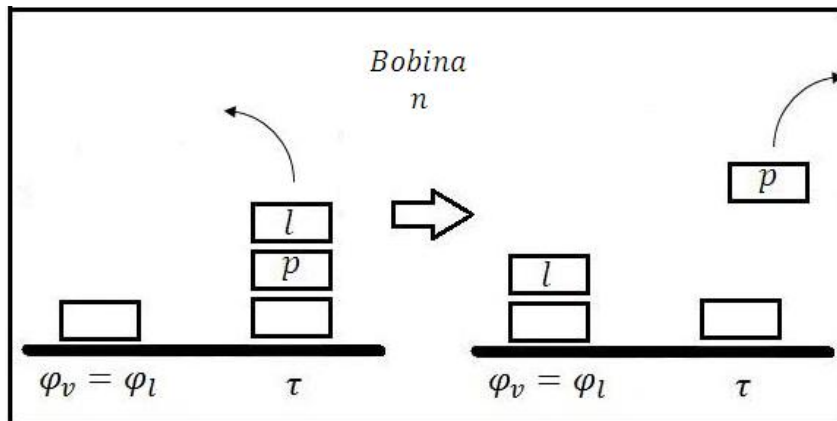


Figura 50 - Restrição de remanejamento. Atendimento da bobina n com a placa p . A placa l necessita ser remanejada novamente. Fonte: Autoria própria

O conjunto de restrições na equação (15) abaixo representa o caso 1 para placas mortas entre duas placas candidatas (v e p) evitando que a situação apresentada acima possa ocorrer na solução ótima do problema:

$$d_{lvi} + d_{p\tau i} X_{np} \leq 1 \quad (15)$$

$$\forall i \in \Omega;$$

$$\forall \tau \in \theta$$

$$\begin{aligned} \forall l, \quad & \text{tal que,} \quad l \in \{M \mid \varphi_l \neq \tau \text{ e } Re_{il} = 1\} \\ \forall n, \quad & \text{tal que,} \quad n > i, \quad n \in \Omega \\ \forall p, \quad & \text{tal que,} \quad p \in \{C_n \mid Re_{ip} = 1, h_p > h_l \text{ e } \varphi_p = \varphi_l\} \end{aligned}$$

Restrições de custo de remanejamento:

É possível concluir-se que o custo de se manusear uma placa qualquer é menor à medida que as placas que estão acima desta placa são remanejadas para outras pilhas ou são retiradas do pátio. Sabemos que essas placas remanejadas podem ser: mortas, candidatas escolhidas ou candidatas não escolhidas.

Tang chegou à conclusão em seu primeiro trabalho [2] sobre o problema SSS no qual as placas remanejadas voltam para a pilha original imediatamente após o atendimento de uma bobina, que o custo de laminar uma placa j qualquer para uma bobina i é menor à medida que as placas candidatas escolhidas para bobinas anteriores ($k < i$) que estão acima da placa j já deixaram o pátio. Embora Tang em todos seus artigos sobre o SSS e todos os outros autores que abordaram este problema tenham chegado a esta mesma conclusão, todos utilizaram funções não lineares para descrever essa situação, colocando estas restrições não lineares direto na função objetivo. Neste trabalho, um conjunto em separado de restrições lineares, ou seja, fora da função objetivo, foi criado para garantir esse tipo de situação durante a otimização do problema SSS.

Seja uma placa l e uma placa j onde $\varphi_l = \varphi_j$ e $l \in R_j$. Se a placa j for escolhida para uma bobina i ($j \in C_i$), a placa l deverá ser remanejada para uma pilha τ no processo de atendimento desta bobina ($d_{l\tau i}$).

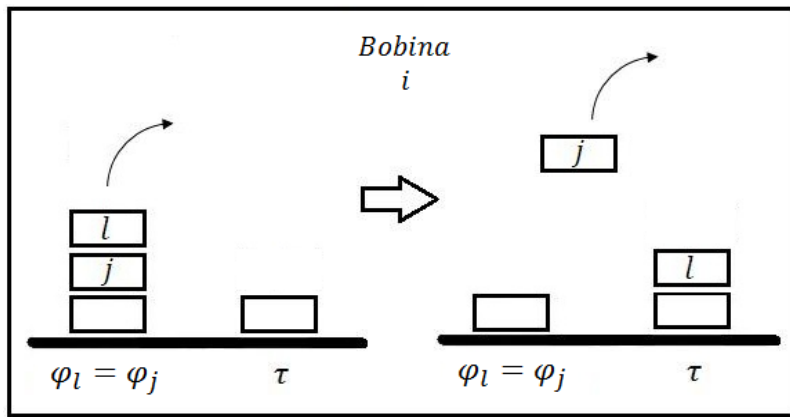


Figura 51 - Restrição de remanejamento. Atendimento da bobina i com a placa j . A placa l necessita ser remanejada. Fonte: Autoria própria

Com a escolha das placas e os remanejamentos ocorridos durante o atendimento das bobinas anteriores ($k < i$), esta placa l so não deverá ser remanejada para uma pilha τ ao atendermos uma bobina i com uma placa j ($d_{l\tau i}$), se:

- Esta placa l já tiver sido escolhida para uma bobina k anterior ($k < i$);

Neste caso a placa l já não se encontra no pátio, pois foi utilizada pra produzir uma bobina k anterior a bobina i .

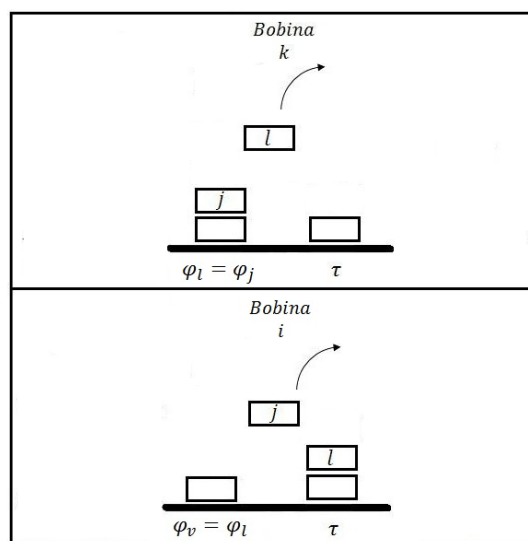


Figura 52 – Restrição de Custo de Remanejamento. A placa l já foi remanejada para a pilha τ no atendimento da bobina k . Fonte: Autoria própria.

- Esta placa l já tiver sido remanejada por uma placa v que tenha sido utilizada no processo de atendimento de uma bobina k anterior à bobina i ($k < i$).

Neste caso a placa l já não se encontra mais em cima da placa j

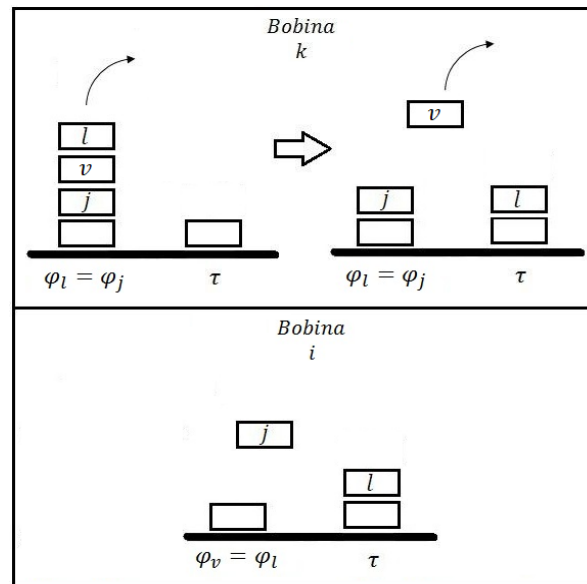


Figura 53 - Restrição de Custo de Remanejamento. A placa l já foi remanejada para a pilha τ no atendimento da bobina k . Fonte: Autoria própria.

O conjunto de restrições na equação (16) abaixo endereçam essas duas situações:

$$\sum_{\tau \in \{\theta \mid \tau \neq \varphi(l)\}} d_{l\tau i} \geq X_{ij} - \sum_{k=1}^{i-1} \sum_{\substack{v \in \{C_k \mid v=l \\ \text{ou } Er_{vl}=1\}}} X_{kv} \quad (16)$$

$$\forall i \in \Omega$$

$$\forall j, \quad \text{tal que,} \quad j \in C_i$$

$$\forall l, \quad \text{tal que,} \quad l \in R_j$$

Como pode ser visto esta restrição é linear. Na seção 8.3, mostraremos que os problemas [2], [3], [4], [5], [8] e [9] podem ser resolvidos de forma linear a partir desse novo conjunto de restrições, agilizando bastante o tempo de otimização.

Nota-se também que o lado direito da equação possui um somatório em negativo, que pode levar todo esse lado da equação a valores também negativos. Isso não há nenhum problema, uma vez que, o problema é de minimização de custos e as variáveis de decisão são binárias.

8.1

Linearização do modelo proposto

Na medida em que o modelo proposto possui produto de variáveis de decisão, o problema necessita ser linearizado para utilizarmos as técnicas de programação linear inteira. Em algumas restrições e na função objetivo apresentadas ocorrem o produto de variáveis binárias, do tipo:

$$d_{p\tau m}X_{np}$$

O número de ocorrência desse produto é função exclusiva da instância do problema. Utilizaremos aqui a mesma técnica utilizada por Fernandes em [8]. Nesta técnica, a cada ocorrência deste produto de variáveis do tipo binárias na modelagem ($d_{p\tau m}X_{np}$), uma nova variável binária é criada levando consigo os índices exclusivos das variáveis originais ($Z_{p\tau mn}$). Para cada variável criada, um conjunto de três novas restrições lineares são incorporadas no problema para modelar a não linearidade desse produto. Naturalmente, o que desejamos é representar todas as possibilidades da tabela verdade do produto de duas variáveis binárias:

Tabela 4 - Tabela verdade para o produto de variáveis binárias. Fonte: Autoria própria

$d_{p\tau m}$	X_{np}	$Z_{p\tau mn}$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Na tabela acima, a variável $Z_{p\tau mn}$ só corresponde ao valor '1' quando ambas as variáveis $d_{p\tau m}$ e X_{np} estão iguais a '1'. Caso contrário a variável $Z_{p\tau mn}$ corresponde ao valor '0'.

O conjunto de três restrições que representa a tabela verdade acima para cada nova variável $Z_{p\tau mn}$ é:

$$\begin{aligned} Z_{p\tau mn} &\leq X_{np} \\ Z_{p\tau mn} &\leq d_{p\tau m} \\ Z_{p\tau mn} &\geq X_{np} + d_{p\tau m} - 1 \end{aligned}$$

Por se tratar de um novo tipo de variável binária, para cada variável deveremos definir seu domínio:

$$Z_{p\tau mn} \in \{0,1\}$$

O produto de variáveis $d_{p\tau m}X_{np}$ deve ser substituído pela variável $Z_{p\tau mn}$ nas restrições e na função objetivo do modelo do problema SSS. O conjunto de restrições da equação (14) apresentada acima, por exemplo, após a linearização possuiria equações do tipo:

$$d_{l\tau i} + Z_{p\tau mn} \leq 1$$

Logicamente, as mesmas condições dos índices apresentadas para restrição (14) valem para a equação acima:

$$\begin{aligned} &\forall i \in \Omega; \\ &\forall \tau \in \theta \\ &\forall l, \quad \text{tal que,} \quad l \in \{M \mid \varphi_l \neq \tau \text{ e } Re_{il} = 1\} \\ &\forall m, \quad \text{tal que,} \quad 1 \leq m < i, \quad m \in \Omega \\ &\forall n, \quad \text{tal que,} \quad n > i, \quad n \in \Omega \\ &\forall p, \quad \text{tal que,} \quad p \in \{C_n \mid \varphi_p \neq \tau \text{ e } Re_{mp} = 1\} \end{aligned}$$

A mesma linearização deve ser aplicada a todas as restrições que possuem produto de variáveis binárias.

8.2

Índices de complexidade do problema SSS

O problema SSS tem sua dificuldade de resolução completamente atrelada à complexidade da instância do problema que queira se resolver. Esse fato já foi constatado na literatura disponível até o momento, tanto por Tang em [5] e [9] como por Fernandes em [8]. Estas medidas de complexidade serão definidas para que possamos comparar a performance da modelagem proposta com os modelos disponíveis na literatura. Tang em seu primeiro trabalho [2], apresentou quatro índices que poderiam ser utilizados para comparação de problemas de situações práticas do dia-a-dia de um pátio de placas. Os quatro índices estão apresentados abaixo e serão nomeados para futuras referências no texto:

1. Quantidade de bobinas no horizonte de programação – QB
2. Máximo número de placas candidatas por bobina – MCB
3. Quantidade de pilhas que abrigam todas as placas candidatas – QPC
4. Máxima altura das pilhas – MAP

Posteriormente, no trabalho [3], Tang apresentou um novo índice, o qual ele chamou de ‘fator de pilha’. Esse índice foi introduzido para substituir o índice QPC . Sua função é verificar a relação entre o número de pilhas que habitam todas as placas candidatas (QPC) e a quantidade mínima de pilhas necessárias para se armazenar todas as placas candidatas (MPC), ou seja:

5. Fator de Pilha – FP

FP

$$= \frac{\textit{quantidade de pilhas que abrigam todas as placas candidatas (QPC)}}{\textit{quantidade mínima de pilhas para se armazenar todas as placas candidatas (MPC)}}$$

O denominador da equação acima, MPC pode ser encontrado da seguinte forma:

$$MPC = \frac{\text{Total de Placas Candidatas (TPC)}}{\text{Máxima Altura das Pilhas (MAP)}}$$

O índice TPC acima é igual à cardinalidade do conjunto C de placas candidatas ($|C|$), apresentado na seção anterior. Além disso, embora não tenha sido citado por Tang, este fator já incorpora o fator MAP , o que dispensa a apresentação deste índice nas tabelas comparativas.

O índice FP consegue facilmente balizar as instâncias uma vez que mede a concentração das pilhas no pátio em relação a máxima concentração ($MPC = 1$). Um alto valor deste índice ($\gg 1$) indica que as placas candidatas estão espalhadas no pátio. Um baixo valor desse índice (próximo de um), indica que as placas estão bastante concentradas e possivelmente o problema apresenta uma maior dificuldade de solução.

Vimos na seção anterior que o problema cresce exponencialmente com o número de bobinas. Com certeza este fator é o mais impactante na criação das instâncias. Isso já tinha sido levantado por Tang em seus trabalhos - $O(MCB^{QB})$. Entretanto, é de se esperar que a gama de possibilidades de remanejamentos que surgem com a escolha das placas candidatas que serão utilizadas seja tão complexa quanto à própria escolha das placas candidatas. A inclusão da possibilidade de remanejamentos definitiva, ou seja, não retorno das placas remanejadas, leva o problema para um nível de esforço algoritmo $O(MCB^{QB}QP^{QB}MAP^{QB})$, onde QP significa a quantidade total de pilhas no pátio. Embora constatemos isso, mostraremos no próximo capítulo que o problema fica bem mais fácil de resolver quando o fator FP é bastante alto, ou seja, quando as placas candidatas encontram-se bastante espalhadas pelo pátio.

Portanto, neste trabalho utilizaremos para criação das instâncias e para teste da nova proposta para o problema SSS os seguintes índices de complexidade:

1. Quantidade de bobinas no horizonte de programação – QB
2. Máximo número de placas candidatas por bobina – MCB

3. Fator de Pilha – *FP*

8.3

Linearização dos modelos da literatura

Esta seção é dedicado a demonstrar que os modelos não lineares propostos nos trabalhos [2], [3], [4], [5], [8] e [9] podem ser resolvidos de forma linear a partir de um novo conjunto de restrições lineares, agilizando bastante o tempo de otimização dos algoritmos. O objetivo principal é mostrar que é possível encontrar modelos lineares que isentam a necessidade de linearização dos modelos propostos.

Devemos nesse ponto reforçar que, está fora do escopo desta seção testar os resultados deste modelo propostos. Os trabalhos supracitados possuem requisitos e premissas diferentes entre si e diferentes da nova proposta apresentada nessa dissertação. Desta forma, não faz sentido testar sua eficácia para depois não conseguirmos compará-los entre si, uma vez que, seria completamente inadequado. Embora seja, ainda sim, possível comparar um a um com o seu respectivo modelo original, focaremos somente na criação de uma modelagem linear do problema SSS para cada um desses trabalhos, mostrando que é possível fazê-los.

Para facilitar o entendimento, primeiramente, esses modelos foram separados em dois grupos, de acordo com a quarta premissa apresentada na seção 4 do capítulo 4:

1. Retornando com as placas remanejadas imediatamente após o atendimento de uma bobina;

Neste grupo incluímos os trabalhos [2], [3], [4] de Tang e o trabalho [8] de Fernandes.

2. Não retornando com as placas remanejadas imediatamente após o atendimento de uma bobina;

Neste grupo incluímos os trabalhos [5] e [9], ambos de Tang.

Nos modelos dos trabalhos [2], [3], [4] e [8] as linearidades presentes em suas funções objetivo e restrições foram substituídas por equações totalmente lineares.

Nos modelos dos trabalhos [5] e [9], embora saibamos que estes possuem funções objetivo que não endereçam corretamente o custo real de movimentação de placas dentro de um pátio, seus modelos foram assumidos como corretos e somente tiveram suas não linearidades substituídas também por funções lineares.

O conjunto de restrições lineares que será utilizado é bastante similar ao apresentado na equação (16), que tem papel de ativar somente os remanejamentos necessários durante as movimentações de atendimento de todo o horizonte de programação. Abaixo, rerepresentamos a equação (16):

$$\sum_{\tau \in \{\theta \mid \varphi(l) \neq \tau\}} d_{l\tau i} \geq X_{ij} - \sum_{k=1}^{i-1} \sum_{\substack{v \in \{C_k \mid v=l \\ \text{ou } Er_{vl}=1\}}} X_{kv} \quad (16)$$

$$\forall i \in \Omega$$

$$\forall j, \quad \text{tal que,} \quad j \in C_i$$

$$\forall l, \quad \text{tal que,} \quad l \in R_j$$

Conforme citamos na seção 4.3, os modelos prévios disponíveis da literatura não consideraram a escolha do destino das placas remanejadas (variável de decisão $d_{l\tau i}$ presente na equação (16)), que significa que a placa l foi remanejada para a pilha τ durante o atendimento da bobina i . Esta variável é uma inovação do modelo proposto nessa dissertação. Sem alterar o escopo inicial desses modelos, iremos então suprimir a escolha do destino e iremos somente manter o conceito de remanejamento da placa l durante o atendimento da bobina i , ficando então como uma variável de decisão do tipo d_{li} , que definiremos agora sendo:

$$d_{li} = \begin{cases} 1, & \text{se a placa } l \text{ foi remanejada durante o atendimento da bobina } i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Da mesma forma que para a variável d_{li} foi definido o domínio da variável, fazemos o mesmo para esta nova variável d_{li} :

$$d_{li} \in \{0,1\}$$

De posse dessa nova variável, iremos tratar os grupos acima em separado. Para cada grupo será apresentado a função objetivo e restrições originais do problema SSS de cada modelo e posteriormente um conjunto de restrições em substituição que fazem exatamente o mesmo papel das equações originais, só que somente com funções lineares.

É importante salientar que todos os modelos apresentados tiveram suas notações ajustadas com o modelo proposto nesta dissertação e que somente foram apresentadas as equações não lineares destes modelos. As restrições adicionais, lineares, devem ser pesquisadas no próprio artigo, via referências bibliográficas disponíveis no final dessa dissertação.

Primeiro grupo:

- Modelo dos trabalhos [2], [3] e [4];
 - Funções Originais

A função objetivo deste modelo visa reduzir a quantidade de remanejamentos necessários para se movimentar a placa j que atenderá a bobina i , chamado de W_{ij} :

$$W_{ij} = D_j - \sum_k^{i-1} \sum_{n \in \{m | \varphi(m) = \varphi(j)\}} \min\{1, \max\{D_j - D_n, 0\}\} X_{kn} \quad (17)$$

O objetivo do modelo é:

$$\min f(x) = \sum_{i \in \Omega} \sum_{j \in C_i} W_{ij} X_{ij} \quad (18)$$

- Modificação para estrutura linear;

Necessita-se substituir as equações (17) e (18) acima pelas equações (19) e (20) abaixo:

$$d_{li} \geq X_{ij} - \sum_{k=1}^{i-1} \sum_{v \in \{C_k | v=l\}} X_{kv} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} & \forall i \in \Omega \\ & \forall j, \quad \text{tal que,} \quad j \in C_i \\ & \forall l, \quad \text{tal que,} \quad l \in R_j \end{aligned}$$

O objetivo do modelo será:

$$\min f(x) = \sum_{i \in \Omega} \sum_{l \in \{R | Re_{il}=1\}} d_{li} \quad (20)$$

- Modelo do trabalho [8];
 - Funções originais

A função objetivo deste modelo visa reduzir a quantidade de remanejamentos necessários para se movimentar a placa j que atenderá a bobina i , chamado de W_{ij} :

$$W_{ij} = \sum_{i \in \Omega} \sum_{j \in C_i} D_{ij} X_{ij} - \sum_{i=2}^{|\Omega|} \sum_{j \in C_i} \sum_{k=1}^{i-1} \sum_{m \in \{C_k | \varphi_j = \varphi_m \text{ e } D_j > D_m\}} X_{ij} X_{km} \quad (21)$$

O objetivo do modelo é:

$$\min f(x) = \sum_{i \in \Omega} \sum_{j \in C_i} W_{ij} \quad (22)$$

- Modificação para estrutura linear;

Necessita-se substituir as equações (21) e (22) acima também pelas equações (19) e (20) já apresentadas.

Segundo grupo:

- Modelo dos trabalhos [5] e [9];

- Funções originais

A função objetivo deste modelo visa reduzir a quantidade de tempo gasto pelo equipamento ponte rolante para atendimento de um horizonte de programação, a partir dos custos da escolha da placa j que atenderá cada bobina i deste horizonte, chamada de W_{ij} :

$$W_{ij} = 2t_c + Co_j - Co_0 + t_0 + t_s D'_{ij} \quad (23)$$

Sendo,

$$\begin{aligned} D'_{ij} = \max\{0, D_j \\ - \max\{X_{kl}(D_l + 1) \mid k \in \Omega, k \leq i - 1, \varphi_j \\ = \varphi_l\}\} \end{aligned} \quad (24)$$

O objetivo do modelo é:

$$\min f(x) = \sum_{i \in \Omega} \sum_{j \in C_i} X_{ij} W_{ij} \quad (25)$$

- Modificação para estrutura linear;

Necessita-se substituir as equações (23), (24) e (25) acima pelas equações (26) e (27) abaixo:

$$d_{li} \geq X_{ij} - \sum_{k=1}^{i-1} \sum_{\substack{v \in \{C_k \mid v=l \\ \text{ou } Er_{vl}=1\}}} X_{kv} \quad (26)$$

$$\forall i \in \Omega$$

$$\forall j, \quad \text{tal que,} \quad j \in C_i$$

$$\forall l, \quad \text{tal que,} \quad l \in R_j$$

O objetivo do modelo será:

$$\begin{aligned} \min f(x) = & \sum_{i \in \Omega} \sum_{l \in \{R | Re_{il}=1\}} d_{il} t_s \\ & + \sum_{i \in \Omega} \sum_{j \in C_i} X_{ij} (2t_c + Co_j - Co_0 + t_0) \end{aligned} \quad (27)$$

Portanto todos os trabalhos apresentados acima podem ser representados de forma linear sem perda da informação das funções objetivo originais. É esperado que para os testes realizados com os modelos acima, os tempos computacionais sejam bem menores por se tratarem de algoritmos totalmente lineares. Entretanto, há de se lembrar de que não podemos comparar as funções objetivo acima com a nova proposta sem equalização coerente das premissas do problema.

Resultados

Todos os testes foram feitos em instâncias aleatórias levando-se em consideração os índices de complexidade apresentados no capítulo anterior. A utilização de instâncias aleatórias é bastante conveniente uma vez que, conforme demonstrado nos capítulos 2 e 3, a correlação entre a organização do pátio e as placas candidatas para laminação é baixa. O importante é que a grandeza desses índices corresponda a situações práticas do dia-a-dia. Além disso, para gerar as instâncias, a configuração inicial do pátio para cada uma delas é necessária. Qualquer instância gerada para teste do novo modelo para o problema SSS deverá fornecer esta configuração como parâmetro.

Foram utilizados como modelos comparativos à nova proposta o algoritmo proposto por Tang em [9] e a heurística gulosa proposta também por Tang em [2] que foi adaptada por Fernandes em [8] para aceitar placas em comum entre os diferentes conjuntos de placas candidatas. Entretanto, ambos os algoritmos deverão incorporar uma estratégia justa para escolha do destino das placas remanejadas, uma vez que, essa premissa não foi contemplada em nenhum deles. A escolha da estratégia e a forma como será feita a incorporação desta nos algoritmos será apresentada na primeira seção deste capítulo.

Para todos os algoritmos, foram utilizados índices de comparação de tempo e de eficácia dos algoritmos. A comparação da eficácia é realizada comparando-se as soluções dos modelos a serem apresentados com a nova proposta, sendo a referência da eficácia o menor valor de custo da função objetivo entre os algoritmos comparados. Para facilitar o comparativo da solução ótima, cria-se um índice '*benchmark*' de comparação - a função objetivo é dividida pela quantidade de bobinas no horizonte de programação, sendo este definido como o tempo médio de manuseio de uma placa expedida. Chamaremos este índice de *TMM* (Tempo Médio de Manuseio).

Tang, em seu primeiro trabalho, [2] apontou o problema SSS como um problema '*off-line*'. O tempo computacional de resolução do problema é apontado em cada teste, entretanto, este não é o parâmetro mais relevante para o problema

SSS, uma vez que, a otimização de um horizonte de programação (instrução de laminação) é feita durante o intervalo entre troca de cilindros de laminação, intervalo este bastante superior ao tempo computacional necessário para encontrarmos a solução ótima em todos os testes, inclusive em um cenário de *stress* do modelo apresentado a seção 4.3 deste capítulo. Neste intervalo o pátio de placas esta parado aguardando o início da próxima instrução de laminação.

Para demonstrar a redução de custo e motivar a realização desta nova proposta, apresentamos na última seção deste capítulo uma análise preliminar de viabilidade econômica no tempo de um software para implementar essa nova proposta em um pátio de placas de uma usina siderúrgica fictícia similar a uma usina de grande porte do Brasil. Essa análise utiliza o índice médio de ‘*benchmark*’ *TMM* apresentados por cada modelo para se estimar a redução de custo.

Todos os testes foram realizados na ferramenta comercial de programação linear inteira **Xpress, versão 7.3 – 64 bits** [16], utilizando um computador de 3 GHz Pentium CPU e 16GB of RAM.

9.1

Adaptação dos modelos comparativos

Os modelos comparativos que serão utilizados devem obviamente possuir às mesmas condições de requisitos e premissas, apontadas na seção 4.3 do capítulo anterior, que a nova proposta para o problema SSS.

A premissa número 4 - é de suma importância neste momento. Embora o modelo proposto por Tang em [9] tenha assumido a premissa 4 semelhante ao modelo proposto nesta dissertação, este não considerou a escolha do destino das placas remanejadas. Conforme descrito na seção 4.3, este fato causa uma diferença relevante na função objetivo, da forma que fica completamente incoerente compararmos a precisão dos modelos.

A consequência direta é a necessidade de balizar os modelos para que possa ser feita a comparação. Portanto, há a necessidade da inclusão de alguma estratégia para escolha da pilha de destino das placas remanejadas durante o processo de atendimento de um horizonte de programação.

O algoritmo de heurística gulosa proposto por Tang em [3] é bastante similar aos algoritmos utilizados pelas usinas do Brasil. É um tipo de algoritmo que resolve cada bobina por vez, levando em consideração somente o passado (de quais pilhas saíram às placas utilizadas para fabricar as bobinas anteriores). Este algoritmo foi adaptado por Fernandes em [8]. Entretanto, este também não considerou que as placas remanejadas ficam em outra pilha, muito menos a escolha da pilha destino dessas placas. Da mesma forma que o algoritmo anterior, há a necessidade da inclusão de alguma estratégia para escolha da pilha de destino durante o processo de atendimento de um horizonte de programação.

A estratégia que estamos propondo para esses modelos comparativos será gulosa, escolhendo como pilha destino as pilhas mais próximas da mesa de rolos para placas candidatas que podem ser escolhidas, e pilhas mais longe da mesa de rolos para placas candidatas que não podem ser escolhidas ou placas mortas.

O motivo é simples: as placas candidatas que podem ser utilizadas para futuras bobinas do horizonte de programação, podem ser remanejadas para pilhas mais próxima da mesa de rolos, seguindo o mesmo princípio apresentado por Tang em [9] de facilitar a saída das mesmas. Já as placas candidatas que não podem ser utilizadas para futuras bobinas e as placas mortas que não são candidatas a nenhuma bobina do horizonte de programação, podem ser remanejadas para pilhas longe da mesa de rolos de saída. Se estas fossem remanejadas para pilha próxima a mesa de rolos, poderíamos estar piorando ainda mais o custo de placas candidatas que já estejam nessas pilhas, uma vez que estas placas (candidata não escolhida e morta) não deixarão o pátio no horizonte de programação.

Para exemplificar o funcionamento dessa estratégia, suponhamos uma situação de atendimento de uma bobina i a partir de uma placa l e a seguinte configuração do pátio de placas apresentada na Figura 54:

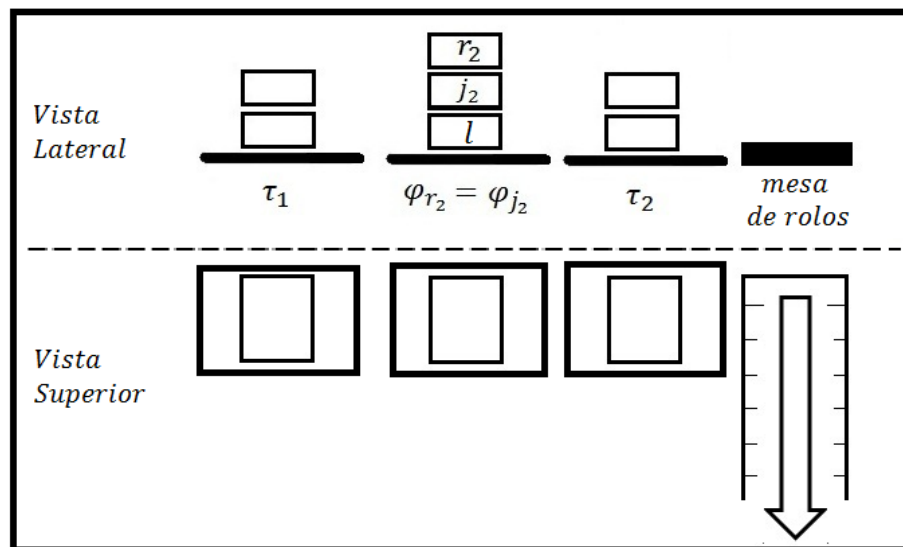


Figura 54 - Vista lateral e superior de um pátio de placas exemplo, com a mesa de rolos localizado no canto direito do pátio. A placa r_2 é uma placa morta e a placa j_2 é uma placa candidata a uma bobina k , onde $k > i$. A placa l é candidata a bobina i . Fonte: Autoria própria.

A figura acima apresenta as vistas lateral e superior de 3 pilhas do pátio e a posição da mesa de rolos em relação as mesmas. A placa r_2 é uma placa morta e a placa j_2 é uma placa candidata a uma bobina k , onde $k > i$, sendo ambas as placas pertencentes ao conjunto de placas remanejadas da placa l ($\{r_2, j_2\} \in R_l$). Seguindo a estratégia apresentada acima, a placa r_2 por se tratar de uma placa morta, será remanejada para a pilha τ_1 e a placa j_2 por se tratar de uma placa candidata a uma futura bobina será remanejada para a pilha τ_2 . A Figura 55 abaixo mostra a disposição das placas após o atendimento da bobina i com a placa j :

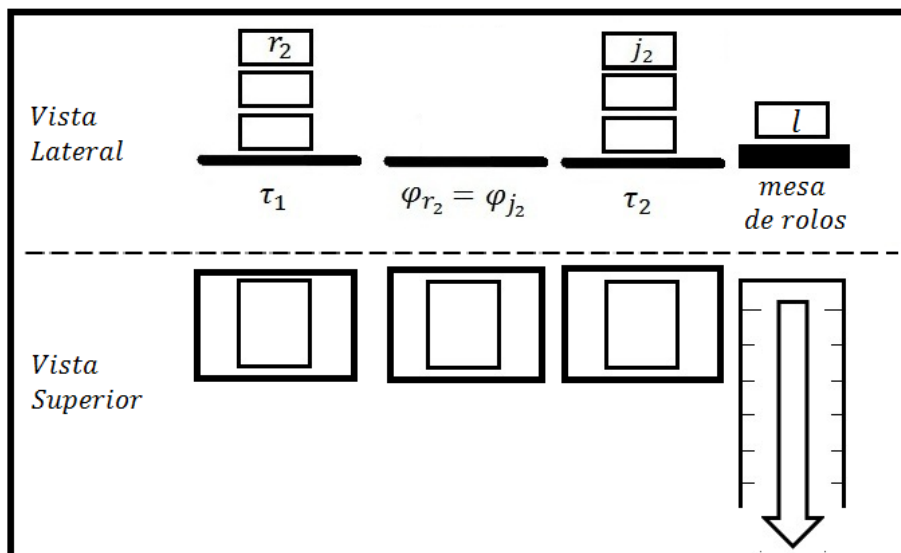


Figura 55 - A placa r_2 é remanejada para a pilha τ_1 e a placa j_2 é remanejada para a pilha τ_2 . A placa l é levada para a mesa de rolos para atender a bobina i . Fonte: Autoria própria.

É claro que a incorporação dessas estratégias independe da escolha das placas candidatas que irão atender cada bobina do horizonte de programação. A escolha das placas candidatas é conhecida antes da execução da estratégia através da utilização dos modelos propostos originalmente nos trabalhos citados, ou seja, primeiramente é feita otimização para encontrar a solução de placas candidatas que serão escolhidas e depois é executada a estratégia indicada de escolha da pilha destino das placas remanejadas. Estamos somente incorporando esta estratégia para ajustar a função objetivo dos modelos à nova proposta e finalmente compararmos os modelos. Obviamente, a desvinculação da escolha das placas candidatas da escolha do destino das placas remanejadas causa uma situação gulosa, pois a mesma não leva em consideração a interdependência do processo de atendimento de cada bobina do horizonte de programação, da localização das placas candidatas e da escolha do destino das placas remanejadas. Em outras palavras, essa estratégia não consegue contornar os casos 1, 2 e 3 apresentados na premissa 4 da seção 4.3.

Embora não consiga contornar os casos acima (conforme a nova proposta) os custos de movimentação desses modelos comparativos estarão balizados com os da nova proposta através da implementação dessa estratégia. Portanto, a partir desse momento podemos finalmente comparar a eficácia dos modelos comparativos com a nova proposta.

Para facilitar a identificação dos modelos, chamaremos daqui pra frente o algoritmo do modelo proposto por Tang em [9] e incorporado com a estratégia acima, de **Tang [9] adaptado**. O algoritmo guloso proposto por Tang em [3], adaptado por Fernandes em [8] e incorporado também com a estratégia acima, de **Guloso [8] adaptado**.

9.2

Testes com instâncias aleatórias

As instâncias aleatórias foram criadas com base nos índices de complexidade apresentados no capítulo anterior, seção 8.2, que repetiremos aqui por conveniência:

4. Quantidade de bobinas no horizonte de programação – QB
5. Máximo número de placas candidatas por bobina – MCB
6. Fator de Pilha – FP

Quando dizemos instâncias aleatórias, nos referimos a configuração inicial do pátio de placas e as placas pertencentes a cada um dos conjuntos de placas candidatas (C_i). A configuração inicial do pátio foi apresentada no capítulo 8, sendo representada pelos seguintes parâmetros de entrada:

$R_l \rightarrow$ Conjunto de placas que são remanejadas pela placa l na configuração original do pátio

$\varphi_l \rightarrow$ Pilha onde está a placa l na configuração original do pátio

$t_{\tau_1\tau_2} \rightarrow$ Matriz de custo para levar a placa l da pilha τ_1 para a pilha τ_2

$h_l \rightarrow$ Altura da placa l na pilha φ_l na configuração original do pátio

$Re_{il} \rightarrow$ Matriz binária que identifica se uma placa l é remanejada ao atendermos uma bobina i , na configuração original do pátio

$Er_{jl} \rightarrow$ Matriz binária que identifica se a placa l é remanejada pela placa j , na configuração original do pátio

O conjunto de placas candidatas (C_i) é gerado aleatoriamente para cada testes respeitando-se o limite do índice de complexidade MCB (Máximo de placas candidatas por bobina).

Para avaliar a qualidade das instâncias, os três índices de complexidade citados acima foram variados em três níveis, conforme a tabela abaixo.

Tabela 5 - Variação dos índices de complexidade em três níveis. Fonte: Autoria própria.

Índices de Complexidade	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Quantidade de Bobinas - QB	18	25	45
Max. Candidatas por Bobina - MCB	2	3	4
Fator de Pilha - FP	3	2	1,5

Para cada índice de complexidade foram realizados comparativos com intuito de verificar como a precisão dos modelos se comportam em relação à nova proposta, variando um único índice de complexidade por vez entre os três níveis apresentados na tabela cinco acima.

Foram gerados nove tipos de testes aleatórios (três para cada índice) para o problema. Para cada teste foram realizados 10 ensaios, totalizando 90 instâncias do problema. As 90 instâncias foram separadas por grupo de variação de índice de complexidade (3 grupos) e separadas também em três níveis (nível 1, 2 e 3) dentro desses grupos.

Além disso, iremos apresentar como o tempo computacional do algoritmo varia com esses índices de complexidade.

A média dos resultados de cada teste (10 ensaios) foi utilizada para apresentar os resultados. Sendo assim, as tabelas abaixo apresentam todos os testes executados, cada um com seus resultados (solução ótima, precisão e tempo computacional) entre os modelos comparativos utilizados e a nova proposta.

1. Variando a quantidade de bobinas no horizonte de programação (QB);

- Testes realizados

Tabela 6 - Testes realizados variando o índice QB

TESTES	Total Placas	Qtd. Pilhas	QB	MCB	MAP	FP
Teste 1	120	24	18	3	5	3
Teste 2	135	27	25	3	9	2
Teste 3	135	27	45	3	5	2

Foram realizados três tipos de testes, um em cada nível, variando-se a quantidade de bobinas em cada nível, começando-se em 18 bobinas até 45 bobinas. Os outros índices foram mantidos próximos para tentarmos capturar o efeito dessa variação no TMM e no tempo computacional do algoritmo.

- Resultados

Tabela 7 – Resultados dos testes realizados variando o índice QB

TESTES	(1) Nova Proposta		(2) Tang [9] - Adaptado			(3) Guloso [8] - Adaptado		
	TMM	Tempo	TMM	Varição	Tempo	TMM	Varição	Tempo
Teste 1	3,78	2,0	4,06	108%	0,0	5,01	133%	0,0
Teste 2	3,36	19,1	3,92	117%	0,0	4,21	125%	0,0
Teste 3	3,81	303,0	4,96	130%	0,1	5,22	137%	0,0

O algoritmo número 2 da tabela acima perde bastante precisão a medida que o número QB aumenta. Isso é esperado uma vez que a complexidade do problema aumenta exponencialmente com esse fator. À medida que o espaço de soluções aumenta, um algoritmo guloso adaptado começa a promover otimizações gulosas locais.

O algoritmo número 3 possui uma média de precisão muito pior que o algoritmo 2 (dois). Entretanto há uma menor sensibilidade na sua precisão em relação à nova proposta quando comparado com o algoritmo 2. Por se tratar de um algoritmo 100% guloso, este deve cada vez mais perder precisão à medida que o número de bobinas aumenta.

O tempo computacional da nova proposta, embora não seja um limitador para o problema SSS, cresce exponencialmente com o número de bobinas (QB) no horizonte de programação.

À medida que o número de bobinas (QB) aumenta, é esperado que ambos os algoritmos comparativos (2 e 3) tenham precisão similares. O motivo é o fato da estratégia gulosa incorporada no algoritmo 2 ganhar cada vez mais relevância com o aumento desse índice.

Em alguns ensaios do teste de nível 3, o algoritmo 3 conseguiu melhor precisão que o algoritmo 2. Isto corrobora a tendência de similaridade dos algoritmos à medida que o índice QB aumenta, conforme citado no item anterior.

Há em média uma redução de mais de 1 minuto no tempo de movimentação por bobina laminada (TMM) quando comparamos a heurística gulosa (3) com a nova proposta. Isto representa uma redução em média de 24%.

Tabela 8 - TMM em minutos para os testes realizados variando o índice QB

	TMM (Tempo médio de manuseio) (Min)		
	Nova Proposta	Tang [8] - Adaptado	Guloso [7] - Adaptado
Teste 1	3,78	4,06	5,01
Teste 2	3,36	3,92	4,21
Teste 3	3,81	4,96	5,22
MÉDIA	3,65	4,32	4,81

2. Variando o número máximo de placas candidatas por bobina (MCB);

- Testes realizados

Tabela 9 - Testes realizados variando o índice MCB

TESTES	Tot. Placas	Qtd. Pilhas	QB	MCB	MAP	FP
Teste 1	90	18	25	2	5	2
Teste 2	120	24	25	3	5	2
Teste 3	180	96	25	4	5	2

Foram realizados três tipos de testes, um em cada nível, variando-se a quantidade de placas candidatas por bobina (MCB), começando-se em 2 placas até 4 placas. Os outros índices foram mantidos próximos para tentarmos capturar o efeito dessa variação na precisão e no tempo computacional do algoritmo.

- Resultados

Tabela 10 – Resultado dos testes realizados variando o índice *MCB*

TESTES	(1) Nova Proposta		(2) Tang [8] - Adaptado			(3) Guloso [7] - Adaptado		
	TMM	Tempo	TMM	Variação	Tempo	TMM	Variação	Tempo
Teste 1	4,20	4,7	4,94	118%	0,0	5,12	122%	0,0
Teste 2	3,99	25,1	4,70	118%	0,0	4,90	123%	0,0
Teste 3	3,88	108,1	4,87	126%	0,0	4,80	124%	0,0

Os algoritmos número 2 e 3 da tabela acima perdem precisão à medida que o número *MCB* aumenta. Isso é esperado uma vez que a complexidade do problema aumenta exponencialmente com esse fator. À medida que o espaço de soluções aumenta, um algoritmo guloso adaptado começa a promover otimizações gulosas locais.

Embora o algoritmo número 3 tenha tido média de precisão muito pior que o algoritmo 2 no índice de complexidade 1, neste índice a diferença foi bem menor. Era esperado um comportamento similar uma vez que o espaço de solução do problema também aumenta exponencialmente com o *MCB*.

O tempo computacional da nova proposta, embora não seja um limitador para o problema SSS, assim como no índice 1, cresce exponencialmente com o número de placas candidatas por bobina (*MCB*).

À medida que o número (*MCB*) aumenta, é esperado que ambos os algoritmos comparativos (2 e 3) tenham variações similares. O motivo é o fato da estratégia gulosa incorporada no algoritmo 2 ganhar cada vez mais relevância com o aumento desse índice.

Na média o algoritmo 3 conseguiu melhor precisão que o algoritmo 2 no teste 3. Isto corrobora a tendência de similaridade dos algoritmos à medida que o índice *MCB* aumenta, conforme citado no item anterior.

Há em média uma redução de quase 1 minuto no tempo de movimentação por bobina laminada (*TMM*) quando comparamos a heurística gulosa (3) com a nova proposta. Isto representa uma redução em média de 19%, conforme tabela abaixo.

Tabela 11 - *TMM* em minutos dos testes realizados variando o índice *MCB*

	<i>TMM</i> (Tempo médio de manuseio) (Min)		
	Nova Proposta	Tang [8] - Adaptado	Guloso [7] - Adaptado
Teste 1	4,20	4,94	5,12
Teste 2	3,99	4,70	4,90
Teste 3	3,88	4,87	4,80
MÉDIA	4,02	4,84	4,94

3. Variando o fator de pilha (*FP*);

- Testes realizados

Tabela 12 - Testes realizados variando o índice *FP*

TESTES	Tot. Placas	Qtd. Pilhas	QB	MCB	MAP	FP
Teste 1	150	30	18	3	5	3
Teste 2	105	21	18	3	5	2
Teste 3	75	15	18	3	5	1,5

Foram realizados três tipos de testes, um em cada nível, variando-se o índice *FP*, começando-se em uma relação de 3 (placas candidatas espalhadas no pátio) até uma relação de 1,5 (placas candidatas mais concentradas no pátio). Os outros índices foram mantidos próximos para tentarmos capturar o efeito dessa variação na precisão e no tempo computacional do algoritmo.

- Resultados

Tabela 13 – Resultados dos testes realizados variando o índice *FP*

TESTES	(1) Nova Proposta		(2) Tang [8] - Adaptado			(3) Guloso [7] - Adaptado		
	TMM	Tempo	TMM	Variação	Tempo	TMM	Variação	Tempo
Teste 1	3,93	1,3	4,29	109%	0,0	5,20	132%	0,0
Teste 2	3,50	2,4	3,75	107%	0,0	4,51	129%	0,0
Teste 3	3,61	4,2	3,93	109%	0,0	6,81	188%	0,0

O algoritmo número 2 mantém uma precisão constante na medida em que o número *FP* aumenta. Isso mostra que o algoritmo 2 não está muito distante da nova proposta para situações no qual o pátio fica bastante concentrado. Isso era esperado, pois um dos objetivos principais do algoritmo 2 é resolver o problema de pátios altamente concentrados.

O algoritmo 3 mostra uma piora significativa no nível 3 em sua precisão. Por se tratar de uma média, houve situações que a resposta chegou a ser 100% pior que a nova proposta. Isso é esperado por se tratar de um algoritmo 100% guloso que naturalmente sofre com as otimizações locais.

Há em média uma redução de quase 2 minutos no tempo de movimentação por bobina laminada (*TMM*) quando comparamos a heurística gulosa (3) com a nova proposta. Isto representa uma redução em média de 33%, conforme tabela abaixo.

Tabela 14 – *TMM* em minutos dos testes realizados variando o índice *FP*

TESTES	<i>TMM</i> (Tempo médio de manuseio) (Min)		
	Nova Proposta	Tang [8] - Adaptado	Guloso [7] - Adaptado
Teste 1	3,93	4,29	5,20
Teste 2	3,50	3,75	4,51
Teste 3	3,61	3,93	6,81
MÉDIA	3,68	3,99	5,51

Se comparamos somente o algoritmo 2 com a nova proposta em todos os 9 testes, a menor redução encontrada foram nos testes realizados com 18 bobinas no horizonte de programação. Nesses testes a redução ficou na média em 8%, sendo 7% a pior delas (teste 2 do índice de complexidade *FP*). A maior redução de custo nesta mesma comparação de algoritmos ocorreu no teste 3 do índice de complexidade *QB*, onde a quantidade de bobinas no horizonte de programação era de 45. Houve uma redução de 23%, sendo este o único teste no qual houve uma redução de mais de 1 minuto no tempo de atendimento de uma bobina. Da mesma forma, nesta mesma comparação as maiores reduções encontradas se devem a variação dos índices de complexidade *QB* e *MCB*. A média de redução dos 9 testes ficaram em 14% na comparação desses algoritmos.

Se compararmos somente o algoritmo 3 com a nova proposta as precisões encontradas nos 9 conjuntos de testes realizados acima mostram que a nova proposta é bastante eficiente, conseguindo em média uma redução de 1,3 minutos por bobina durante o atendimento de um horizonte de programação (instrução de laminação). Isto demonstra uma redução de 26% em média no tempo total gasto. O teste 3 do índice 3 em média apresentou uma redução de quase 50% neste número. A menor redução encontrada foi no teste 3 do índice *MCB*, apresentando uma redução de 23%. A tabela 15 consolida dos dados dos testes:

Tabela 15 - Média geral para todos os 9 testes da métrica *TMM* em minutos.

TMM (Tempo médio de manuseio)		
(1)	(2)	(3)
Nova Proposta	Tang [8] - Adaptado	Guloso [7] - Adaptado
3,79	4,38	5,09

É interessante notar que a menor redução encontrada no algoritmo 3 de 23% é maior que a média encontrada no algoritmo 2 de 14%. Como o tipo de algoritmo guloso é o mais praticado nas usinas do Brasil e provavelmente em todo o mundo da siderurgia, é esperado encontrar no pior de todos os casos no mínimo 9% a mais de redução no custo do problema SSS com a utilização desta nova proposta.

9.3

Stress da nova proposta

Para estressar o modelo proposto nesta dissertação, foram realizados 10 testes em um cenário com todos os índices de complexidade (*QB*, *MCB* e *FP*) no nível 3. O objetivo deste cenário é observamos o limite para o qual a nova proposta consegue resolver o problema em SSS em um tempo menor que 1 hora (3600 segundos). Esse tempo é a metade do tempo médio tipicamente encontrado nas usinas para trocas dos cilindros de laminação [11]. Chamaremos esse cenário de ‘Cenário *Stress*’, conforme tabela 16 abaixo:

Tabela 16 - Cenário *Stress*

Índices de Complexidade	Cenário Stress
Quantidade de Bobinas - <i>QB</i>	45
Max. Candidatas por Bobina - <i>MCB</i>	4
Fator de Pilha - <i>FP</i>	1,5

Considerando os valores dos índices de complexidade da tabela acima, uma configuração inicial de pátio padrão para todos os testes e os algoritmos comparativos apresentados na seção 9.1, a tabela 17 abaixo apresenta a comparação dos 10 testes realizados com seus respectivos resultados (solução ótima, precisão e tempo computacional) encontrados.

Tabela 17 - Testes realizados com o cenário *stress*

TESTES	TMM	(1) Nova Proposta		(2) Tang [8] - Adaptado			(3) Guloso [7] - Adaptado		
		Ref.	Tempo	TMM	Variação	Tempo	TMM	Variação	Tempo
Teste 1	3,21	100%	1232	3,70	115%	1,7	4,40	137%	0,1
Teste 2	3,56	100%	1010	4,12	116%	1,9	4,77	134%	0,0
Teste 3	4,01	100%	1034	4,85	121%	1,1	5,21	130%	0,1
Teste 4	3,48	100%	1089	4,24	122%	2,5	4,44	128%	0,2
Teste 5	3,63	100%	1100	4,46	123%	1,4	4,73	130%	0,0
Teste 6	3,94	100%	1023	4,60	117%	0,0	5,21	132%	0,1
Teste 7	3,84	100%	1326	4,37	114%	2,1	5,21	136%	0,2
Teste 8	4,02	100%	987	4,74	118%	1,8	5,32	132%	0,2
Teste 9	3,25	100%	1247	3,99	123%	2,0	4,09	126%	0,2
Teste 10	4,17	100%	1190	5,04	121%	2,4	5,31	127%	0,2

Neste cenário, chama a atenção o tempo computacional necessário para encontrar o valor ótimo da métrica *TMM* (Tempo médio de manuseio). Nenhum dos testes chegou perto do limite de 3600, mas todos com exceção do teste 8, ultrapassaram a marca dos 1000 segundos.

O tempo médio de manuseio (*TMM*) dos algoritmos comparativos manteve-se coerente com os testes aleatórios realizados na seção anterior e também coerente entre os próprios ensaios. A tabela 18 abaixo resume os valores encontrados com as suas respectivas médias:

Tabela 18 - Resumo do *TMM* para os testes do cenário *stress*

TESTES	TMM (Tempo médio de manuseio)		
	Nova Proposta	Tang [8] - Adaptado	Guloso [7] - Adaptado
Teste 1	3,21	3,70	4,40
Teste 2	3,56	4,12	4,77
Teste 3	4,01	4,85	5,21
Teste 4	3,48	4,24	4,44
Teste 5	3,63	4,46	4,73
Teste 6	3,94	4,60	5,21
Teste 7	3,84	4,37	5,21
Teste 8	4,02	4,74	5,32
Teste 9	3,25	3,99	4,09
Teste 10	4,17	5,04	5,31
MÉDIA	3,81	4,59	4,91

Se compararmos somente o algoritmo 2 com a nova proposta, a menor redução encontrada foi no teste 7. Neste teste a redução ficou em 12%. A maior redução de custo nesta mesma comparação de algoritmos ocorreu nos testes 5 e 9. Houve uma redução de 19%. A média de redução dos 10 testes ficou em 17% na comparação desses algoritmos.

Se compararmos somente o algoritmo 3 com a nova proposta as precisões encontradas nos 10 conjuntos de testes realizados acima mostram que a nova proposta é eficaz no cenário de *stress*, conseguindo em média uma redução de 1,1 minutos por bobina durante o atendimento de um horizonte de programação (instrução de laminação). Isto demonstra uma redução de 26% em média no tempo total gasto. A menor redução encontrada foi nos testes 9 e 10, apresentando uma redução de 21%.

9.4

Análise preliminar de viabilidade econômica

Com intuito de mostrar como os ganhos observados na seção anterior podem ser utilizados em uma análise preliminar econômica de utilização da nova proposta em uma situação real. Portanto, para fazermos uma análise de viabilidade econômica da implantação da nova proposta em uma usina siderúrgica fictícia

similar a uma usina no Brasil, necessitamos desenvolver um estudo de caso que represente a realidade de alguma usina de grande porte produtora de aços planos.

O estudo de caso contemplará uma usina fictícia produtora de aço carbono, do tipo planos, com capacidade instalada de produção de até 5 milhões de toneladas por ano. Esta usina possui uma aciaria com três fornos convertedores (BOF) de 160 toneladas cada, e 3 máquinas de lingotamento contínuo. Essas máquinas tem capacidade conjunto de produzir 5 milhões de toneladas de placas de aço por ano, assim como o LTQ (laminador de tiras a quente). O pátio de placas utilizado é similar ao apresentado no capítulo 4, seção 4.1 desta dissertação. Este pátio está localizado geograficamente em ponto próximo ao LTQ, sendo a mesa de rolos que encaminha as placas para o forno de reaquecimento localizado no centro deste pátio, similar ao *layout* da Figura 24.

Considerando que as placas produzidas possuem um peso médio de 20 toneladas, estaríamos falando de uma produção de 250 mil placas por ano e posterior laminação destas no LTQ, produzindo 250 mil bobinas a quente (BQ). Conforme descrito na seção 3.2, o LTQ trabalha em regime de sequenciamento de placas em bateladas. As sequências ocorrem sempre entre duas trocas consecutivas dos cilindros de laminação, em um processo conhecido como instrução de laminação. No contexto do problema SSS, uma instrução de laminação será considerada como uma quantidade de placas a se laminar para se produzir bobinas em um horizonte de programação. Podemos considerar um horizonte de programação com até duas instruções de laminação para aplicação do modelo da nova proposta. Além disso, conforme descrito na seção 3.2, assumiremos que esta usina já realiza o procedimento de apontamento dos conjuntos de placas candidatas para cada uma das bobinas presentes em qualquer instrução de laminação.

Para o estudo de caso em questão, consideraremos que a usina trabalha em regime de 24 horas, 7 dias por semana, 365 dias por ano, em regime de 3 turnos (sendo cada turno de 8 horas). Para a produção de 250 mil placas por ano, o LTQ em questão tem capacidade de realizar até 8 instruções em um turno (uma instrução por hora) no melhor cenário, e portanto estaríamos tratando da ordem de 20 placas laminadas em cada instrução de laminação. Mantendo-se a capacidade de produção de 250 mil placas por ano, em um pior cenário podemos considerar que a capacidade de realizar instruções de laminação cai pela metade (meia

batelada por hora) e logo estaríamos tratando da ordem de 35 placas em cada instrução de laminação. Para facilitar a compreensão do estudo de caso acima, as tabelas 19 e 20 abaixo resumem os números apresentados de produção:

Tabela 19 - Números de produção da usina fictícia.

Números de Produção	Anual	Mensal	Diário
Produção de Aço Líquido	5.000.000	250.000	8.333
Produção de Placas de Aço	250.000	12.500	417
Laminação de Tiras a Quente (LTQ)	250.000	12.500	417

Tabela 20 - Produtividade do LTQ da usina fictícia.

Produtividade do LTQ	Melhor Cenário	Pior Cenário
Bobinas por Turno	139	139
Instruções por Turno	8	4
Placas por Instrução/ QB	17	35
Instruções por Ano	14.400	7.200

A tabela 20 acima mostra dois tipos de cenário de produtividade do LTQ. Se assumirmos 50% de chance de ocorrência de cada cenário, teríamos que produzir 7,2 mil instruções com 17 placas e 3,6 mil instruções com 35 placas. Cada placa pertencente à instrução de laminação gera um custo de movimentação (remanejamento + expedição) devido ao próprio processo de atendimento do horizonte de programação. A partir deste ponto, conhecendo a demanda de instruções necessárias para cumprir os números de produção da usina fictícia na Tabela 19 acima, podemos estimar as horas incorridas a partir da utilização do modelo proposto nesta dissertação (nova proposta) e uma heurística gulosa usada pelas usinas siderúrgicas do país. Para a heurística gulosa, utilizaremos o algoritmo guloso adaptado (Guloso [8] - Adaptado) que apresentamos e testamos nas seções 9.1 e 9.2 respectivamente, como modelos comparativos à nova proposta.

Utilizaremos a média global de *TMM* (Tempo médio de manuseio) dos 9 testes aleatórios que foram realizados na seção 9.2. Essa escolha é interessante uma vez que os testes aleatórios foram feitos em uma faixa que cobre os cenários positivo e negativo de horizonte de programação do LTQ da usina fictícia.

Recapitulando, o *TMM* é o tempo médio necessário para manusear uma placa que atenderá uma bobina do horizonte de programação. Desta forma, utilizaremos o *TMM* de 3,79 para a nova proposta e de 5,09 para o algoritmo guloso adaptado (Guloso [8] - Adaptado). Ambos os números são os números médios encontrados para todos os testes.

1. Nova proposta ($TMM = 3,79$)

Tabela 21 - Número de instruções e horas de ponte rolante utilizando $TMM = 3,79$

Ocorrência dos Cenários de Produtividade do LTQ	Melhor Cenário (50%)	Pior Cenário (50%)	TOTAL
Instruções por Ano	7.200	3.600	10.800
Horas de Ponte Rolante por ano	7.885	7.885	15.771

2. Algoritmo Guloso adaptado ($TMM = 5,09$)

Tabela 22 - Número de instruções e horas de ponte rolante utilizando $TMM = 5,09$

Ocorrência dos Cenários de Produtividade do LTQ	Melhor Cenário (50%)	Pior Cenário (50%)	TOTAL
Instruções por Ano	7.200	3.600	10.800
Horas de Ponte Rolante por ano	10.597	10.597	21.195

Comparando o número de horas gastas com a nova proposta (15.771 horas por ano) e o algoritmo guloso (21.195 horas por ano), houve uma redução de aproximadamente 5.500 horas por ano do equipamento ponte rolante, que conforme a seção 2.3, é responsável por movimentar as placas dentro do pátio. Portanto, essas horas efetivamente trabalhadas se tornam horas ociosas onde a máquina fica parada, sem custo. Para averiguarmos o impacto que essas 5.500 horas, necessitamos conhecer o custo horário (R\$/hora) desta máquina. Tipicamente esta máquina gasta (considerando os custos de manutenção e operação) R\$60 por hora trabalhada. A tabela 23 abaixo apresenta a redução de custo esperada:

Tabela 23 - Comparação dos índices operacionais e financeiros da nova proposta com o algoritmo Guloso [8] – Adaptado.

Índices Operacionais e Financeiros	Unidade de Medida	Nova Proposta	Guloso [7] - Adaptado	Redução de Custo
Horas de Equipamento:	horas/ano	15.771	21.195	5.424
Custo Horário do Equipamento:	R\$/hora	60,00	60,00	60,00
Custo por ano	R\$/ano	946.257	1.271.696	325.439

Há uma redução anual estimada em 325 mil reais, ou seja, 26% do valor gasto com a utilização do algoritmo guloso conforme apresentado na média global de todos os testes aleatórios da seção 9.2. É claro que para conseguir essa redução generosa, a usina deve incorrer no investimento do desenvolvimento e implantação da ferramenta que implementará a nova proposta. Por se tratar de um investimento, trataremos a análise preliminar de viabilidade econômica no tempo da implantação da nova proposta para o problema SSS como um projeto econômico. Desta forma esse investimento entra como CAPEX⁹ necessário ao projeto. É claro que teremos custos de OPEX¹⁰ para manutenção e gerenciamento do software, entretanto, assumiremos que esta função será agregada as atuais equipes de acompanhamento e controle de produção de uma LTQ. Na tabela 24 abaixo, é apresentando os custos de CAPEX da implantação da nova proposta.

Tabela 24 - CAPEX esperado para implantação da nova proposta.

CAPEX		
Investimentos	Dispêndio (R\$) (Ano 0)	Depreciação (meses)
Software (Solução <i>Turn Key</i>)	250.000	60
Tecnologia (<i>State of the Art</i>)	80.000	60
Computadores / Servidores / Rede	25.000	36
Contingência (3%)	10.650	60
TOTAL	365.650	6.372

⁹ Despesas de capital ou investimento em bens de capital e que designa o montante de dinheiro despendido na aquisição de bens de capital.

¹⁰ Custo associado à manutenção dos equipamentos e aos gastos de consumíveis e outras despesas operacionais, necessários à produção e à manutenção em funcionamento do negócio ou sistema.

A solução do software deverá ser do tipo *turn key*¹¹ para garantir que o sistema estará realizando as otimizações no momento da entrega do projeto. Além disso, colocamos um item de tecnologia em separado como sendo o lucro e a expertise do especialista desenvolvedor do software. Incluímos também as instalações de hardware para implantação física e uma contingência de 3% para eventuais investimentos imprevistos adicionais ao projeto. O prazo de vigência do projeto será de 5 anos (60 meses), que é o tempo de depreciação mais frequente nos itens de investimento da tabela acima. Logo, durante esse prazo de vigência, não haverá a necessidade de incorrer novos investimentos no projeto. Na tabela 24, o dispêndio no ‘Ano 0’ significa a quantidade de dinheiro em moeda brasileira (reais) que deverá ser desembolsado antes do projeto estar pronto, ou seja, antes do projeto gerar os frutos da redução de custo motivadora do mesmo. Já a depreciação¹² é um índice financeiro que compõe o custo de OPEX que será apresentado a seguir. Na tabela 25 abaixo, apresentamos o OPEX da implantação da nova proposta:

Tabela 25 - OPEX mensal esperado para implantação da nova proposta.

OPEX	
Custos (Mensais)	Dispêndio (mês) (R\$)
Manutenção do Software	3.750
Royalties da Tecnologia	8.000
Manutenção dos Hardwares	750
Depreciação	6.372
Gastos Gerais	250
TOTAL	19.122

Os gastos de OPEX são custos operacionais necessários para manter o sistema funcionando e pagar os royalties da tecnologia utilizada. Os valores da tabela 25 acima devem ser onerados mês a mês durante o prazo de vigência do projeto.

¹¹ É um tipo de operação empregue em processos licitatórios no qual a empresa contratada fica obrigada a entregar a obra em condições de pleno funcionamento.

¹² Custo ou despesa decorrentes do desgaste ou da obsolescência dos ativos imobilizados.

Após levantamento de todos os custos de investimento (CAPEX) e operacionais (OPEX) e utilizando como receita estimada a redução de custo esperada em um ano de 325 mil reais, devemos antes explicitar as premissas financeiras para calcularmos os retornos financeiros do projeto. A tabela 26 abaixo apresenta as premissas utilizadas para cálculo desses retornos:

Tabela 26 - Premissas financeiras utilizadas para cálculo dos retornos financeiros do projeto.

Premissas de Projeto	Índices
Custo de Capital (a.a.)	13,08%
Imposto de Renda para Empresas	26,00%
Inflação Brasileira (a.a) – IPCA 2012	5,83%
Vigência do Projeto	5 anos

Os índices acima são padrões para empresas de médio porte no Brasil e que necessitam capturar capital no mercado. Os números da tabela acima juntos com os dispêndios calculados de CAPEX e OPEX nos levam aos seguintes retornos financeiros de projeto:

Tabela 27 - Retornos financeiros do projeto de implantação da nova proposta para o modelo SSS.

Retorno do Projeto	Valores
Investimento Total (Capital)	R\$ 365.650
Lucro Líquido	R\$ 367.443
Margem Líquida	22,58%
<i>Cash Payback</i> ¹³	2,6 anos
Valor Presente do EVA	R\$ 138.849
EVA/Capital	0,38

A tabela acima 27 apresenta os resultados financeiros para um projeto de 5 anos (60 meses). Em 2,6 anos, todo o investimento incorrido de 365 mil reais é pago e a partir deste momento todo retorno financeiro, é contabilizado como fruto da redução de custo estimada. Estimamos que ao final de cinco anos este projeto terá gerado um lucro líquido de 367 mil reais (média de 74 mil reais por ano). Após os primeiros 5 anos, os equipamentos já estarão totalmente depreciados e

¹³ Tempo decorrido entre o investimento inicial e o momento no qual o lucro líquido acumulado se iguala ao valor desse investimento. Este número foi calculado com base no fluxo de caixa com valores trazidos ao valor presente líquido.

somente pequenos investimentos deverão ser feitos para atualizar a tecnologia do software para este não ficar defasado por mais 5 anos de projeto, ou seja, o lucro mensal irá aumentar para quase o dobro, totalizando 127 mil reais anuais. Desta forma, considerando um período total de dez anos teríamos um lucro líquido de 1 milhão de reais em todo o período.

Os indicadores que levam em consideração o índice EVA (*Economic value Added*) mostram que o projeto retorna o investimento além da taxa de retorno sem risco do mercado.

É sempre importante lembrar que este estudo é somente uma análise preliminar da viabilidade econômica do projeto, sendo vantajoso para as usinas e para o investidor estudar minuciosamente a viabilidade econômica real de implementar esta tecnologia, avaliando criteriosamente o comportamento de todas as variáveis apresentadas acima para obter uma estimativa mais fidedigna da redução de custo esperada.

É importante salientarmos também que nesta análise preliminar só consideramos como fonte de receita as reduções de custo da redução de horas de equipamentos. Em uma análise minuciosa poderíamos ter considerado também a redução de jornada de trabalho e possíveis sinergias de operadores com o aumento da disponibilidade das pontes rolantes. Entretanto, essas análises devem ser feitas projeto a projeto em um estudo minucioso, uma vez que cada usina possui particularidades operacionais que podem ou não viabilizar essas reduções de custos adicionais.

Conclusão

Esta dissertação teve com objetivo principal desenvolver uma nova modelagem para melhorar a eficiência no problema de remanejamento de placas entre pilhas. A partir da contextualização do problema, dos conceitos já conhecidos da literatura e o enquadramento do problema SSS dentro do processo siderúrgico, o problema SSS foi remodelado para atingir reduções de custo ainda maiores no que se refere ao custo total de movimentação de placas durante o atendimento de uma laminação. Para isso novos conceitos foram apresentados e consequentemente a nova proposta foi modelada de forma fidedigna ao custo real de movimentação de placas.

Além disso, as incoerências encontradas na atual literatura foram estudadas minuciosamente servindo de motivação principal para a nova proposta apresentada nessa dissertação. Estas incoerências relacionadas a não consideração de nenhum dos três casos básicos da seção 4.3, foram realçadas e contornadas uma a uma, ajustando a função objetivo do problema para endereçar corretamente o custo real de movimentação das placas.

Em testes aleatórios realizados, foi possível encontrar uma redução de custo de movimentação de quase 26% em relação a estratégias de heurística gulosa praticadas em grande parte das usinas do Brasil.

O modelo proposto Tang em [9] que assume que as placas remanejadas não retornam imediatamente para a pilha original, embora tenha sido adaptado para balizar com a nova proposta, foi também passível de se averiguar uma redução de 14% no custo total de movimentação quando comparado a nova proposta.

Isto demonstra a eficácia do modelo desenvolvido nesta dissertação, quando os outros modelos comparativos são equalizados em suas premissas. Obviamente sem essa equalização, seria completamente injusto comparar os modelos e apresentar os ganhos citados.

A partir dessa redução de custo, um case de uma usina fictícia de grande porte produtora de aço carbono planos no Brasil foi apresentado, mostrando uma

análise preliminar de viabilidade econômica positiva para se implantar a nova proposta do problema SSS dentro de um pátio de placas real. A redução de custo apresentada foi compatível ao custo de implementação do modelo, com ganho de gestão notável e quantificável, da ordem de um milhão de reais de lucro líquido ao longo de 10 anos.

A nova modelagem alcançou o objetivo de preencher várias lacunas existentes na atual literatura do problema SSS, com suas devidas limitações realçadas. As reduções de custo verificadas mostram números bastante significativos quando comparados com a literatura existente. Desta forma, a visão ampla de desenvolver soluções de engenharia para o maior desafio da siderurgia brasileira atual: ganhar competitividade a partir de redução de custo operacional; foi alcançada.

Entretanto, devemos lembrar que a estratégia de contornar os três casos básicos inevitavelmente corta possíveis soluções do problema através das restrições de atendimento apresentadas no capítulo 8. Sendo assim, o modelo proposto possui limitações de não encontrar soluções viáveis em instâncias de pátios de placas com a configuração original altamente concentrada.

Para trabalhos futuros, seria interessante a construção de um modelo que, a partir da exaustiva discussão nesta dissertação dos três casos básicos, considerasse a possibilidade de ocorrências dos mesmos na solução ótima do problema, sem obviamente falhar na representação do custo de movimentação na função objetivo. Este novo modelo naturalmente sanaria a limitação do modelo proposto nesta dissertação e garantiria um modelo completo no qual todas as possíveis soluções seriam consideradas no espaço de busca, evitando-se que em algumas instâncias do problema sejam inviabilizadas.

Essa dissertação apresentou uma forma de contribuição para a indústria siderúrgica vencer seus atuais desafios, uma vez que, buscou minimizar ainda mais os custos de logística interna de placas de uma siderúrgica sendo este parte do grande leque de oportunidades de redução de custo operacionais internos existentes dentro do processo siderúrgico.

Referências bibliográficas

- [1] L. Tang, J. Liu, A. Rong, Z. Yang. **A review of planning and scheduling systems and methods for integrated steel production**, European Journal of Operational Research, vol. 133, pp. 1-20, 2001.
- [2] L. Tang, J. Liu, A. Rong, Z. Yang. **An effective heuristic algorithm to minimize stack shuffles in selecting steel slabs from the slab yard for heating and rolling**, Journal of the Operational Research Society , vol. 52, pp. 1091-1097, 2001.
- [3] L. Tang, J. Liu, A. Rong, Z. Yang. **Modelling and a genetic algorithm solution for the slab stack shuffling problem when implementing steel rolling schedules**, International Journal of Production Research, vol. 40, No. 7, pp. 1583-1595, 2002.
- [4] K.A. Singh, S.M.K. Tiwari. **Modelling the slab stack shuffling problem in developing steel rolling schedules and its solution using improved Parallel Genetic Algorithms**, International Journal of Production Economics, vol. 91, pp. 135-147, 2004.
- [5] L. Tang, H. Ren. **Modelling and a segmented dynamic programming-based heuristic approach for the slab stack shuffling problem**. Computers and Operations Research, vol. 37, pp. 368-375, 2010.
- [6] L. A. Wolsey. **Integer Programming**, New York, NY: Wiley, 1998.
- [7] L. Tang, X. Wang. **Integration of batching and scheduling for hot rolling production in the steel industry**, Int J Adv Manuf Technol, 36: 431-441, 2008
- [8] E. Fernandes, L. Freire, A. Passos, A. Street. **Solving the Non-linear Slab Stack Shuffling Problem Using Linear Binary Integer Programming**, EngOpt 2012 – 3rd International Conference on Engineering Optimization, code 359, 2012.
- [9] L. Tang, R. Huizhi. **Modeling and an ILP-based Algorithm Framework for the Slab Stack Shuffling Problem Considering Crane Scheduling**. 2010 International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering. 2010
- [10] J. de Souza, J. Almeida, A. Campos, L. Roberto, R. Sergio, C. Perin, V. dos Santos, G. Nucci, **Estratégia de Operação do Pátio de Placas do LTQ na ArcelorMittal Tubarão**. 2007. 44 Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos – 16 a 19 de Outubro de 2007 – Campos do Jordão – São Paulo – Brasil

- [11] R. Coelho, F. Cézar. **Avaliação do tempo de troca e resfriamento dos cilindros de trabalho para uma produção de 4Mt/ano do laminador de tiras a quente da ArcelorMittal Tubarão.** 2010. XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção, São Carlos, SP, Brasil, 12 a15 de outubro de 2010.
- [12] M. Shamanian, A. Najafizadeh. **Hot Charge of Continuously Cast Slabs in Reheating Furnaces.**, International Journal of ISSI, vol. 1 (2004), No. 1, pp. 35-37
- [13] M.P.M. Lopes. 2011. **Indústria Brasileira do Aço: Situação Atual e Principais Desafios**, ABM, Rio de Janeiro.
- [14] L. Tang, G. Wang, J. Liu. **A Combination of Lagrangian Relaxation and Column Generation for Order Batching in Steelmaking and Continuous-Casting Production**, 2011, Wiley Periodicals, Inc.
- [15] Ramos, Ricardo Antonio. **Um sistema para auxílio no seqüenciamentode um laminador de tiras a quente em uma usina siderúrgica integrada.** Rio de Janeiro, 2002. 81p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- [16] FICO Xpress Optimization Suite, disponível em <http://www.fico.com/>
- [17] <http://www.acobrasil.org.br/>
- [18] <http://www.portalbrasil.net/ipca.htm>
- [19] <http://tli.neu.edu.cn/>
- [20] M.A. Pacheco. **Algoritmos Genéticos: Princípios e Aplicações.** (www.ica.ele.puc-rio.br)
- [21] <http://www.thyssenkrupp-csa.com.br/pt.html>
- [22] L.J.S. Chevrant (Coord), G.O.N. Reis dos (Coord) **Lingotamento Contínuo de Billets.** Curso Associação Brasileira de Metais – ABM. São Paulo, 1989.
- [23] L. Lopez, M.W. Carter, M. Gendreau. **The hot strip mill production scheduling problem: a tabu search approach.** European Journal of Operational Research, v. 106, p. 317-335, 1998.

12.1

Apêndice A - História e Panorama da Siderurgia

No atual estágio de desenvolvimento da sociedade, é impossível imaginar o mundo sem o uso do aço. A produção de aço é um forte indicador do estágio de desenvolvimento econômico de um país. Seu consumo cresce proporcionalmente à construção de edifícios, execução de obras públicas, instalação de meios de comunicação e produção de equipamentos. Esses materiais já se tornaram corriqueiros no cotidiano, mas fabricá-los nos dias atuais exige técnica que deve ser renovada de forma cíclica, por isso o investimento constante das siderúrgicas e prestadores de serviços da área em pesquisa e desenvolvimento.

A produção mundial de aço alcançou em 2010 o expressivo patamar de 1,4 bilhões de toneladas por ano sendo a China responsável por 44% deste valor. Conforme a Figura 56, o segundo maior crescimento da produção mundial do aço se deu na última década, com uma média de 4,2% a.a., principalmente estimulado pelo crescimento acelerado da China, maior produtora mundial desde a década de 90, sendo responsável por 84% deste crescimento médio.

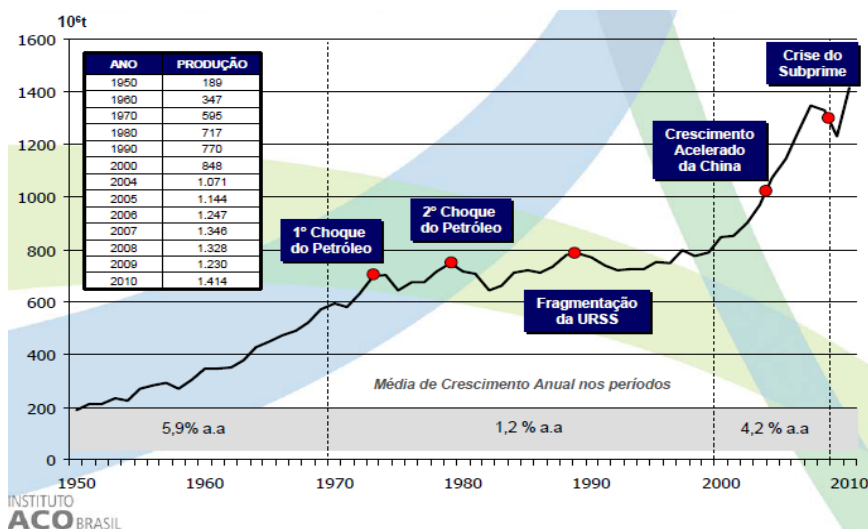


Figura 56 – Evolução da Produção de Aço de 1950 a 2010. Fonte: [17] - IABR

No Brasil, a história do aço começou timidamente nas primeiras décadas do século XX impulsionado por um movimento industrial a partir de 1917. A década de 30 registrou um grande aumento na produção siderúrgica nacional, principalmente incentivada pelo crescimento da usina Belgo-Mineira que, em 1937, inaugurava a usina de Monlevade, (1ª usina siderúrgica do Brasil) com capacidade inicial de 50 mil toneladas anuais de lingotes de aço. Ainda em 1937, foram constituídas a companhia siderúrgica de Barra Mansa e a Companhia Metalúrgica de Barbará. Apesar disso, o Brasil continuava muito dependente de aços importados [17].

O cenário de permanente dependência brasileira de produtos siderúrgicos importados começou a mudar nos anos 40, com a ascensão de Getúlio Vargas à presidência do Brasil. Era uma das suas metas fazer com que a indústria de base brasileira crescesse e se nacionalizasse. Um dos grandes exemplos desse esforço foi a inauguração, em 1946, no município de Volta Redonda (RJ), da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), que começou produzindo coque metalúrgico. No mesmo ano, nesta usina foram ativados também os altos-fornos e a aciaria. As laminações entraram em atividade somente em 1948 e marcaram o início da autonomia brasileira na produção de ferro e aço [17].

A produção de aço no Brasil alcançou 788 mil toneladas em 1950. Dez anos depois, a produção triplicava e passados mais dez anos, em 1970, eram entregues ao mercado 5,5 milhões de toneladas por ano. Na década de 80, o mercado interno estava em retração e a alternativa era voltar-se para o exterior. De uma hora para outra, o Brasil passou de grande importador a exportador de aço [17].

O parque siderúrgico nacional iniciou a década de 90 contando com 43 empresas estatais e privadas, cinco delas integradas a coque, nove a carvão vegetal, duas integradas à redução direta e 27 semi-integradas, além de produtores independentes de ferro-gusa e carvão vegetal, que somavam cerca de 120 altos-fornos. A instalação dessas unidades produtoras se concentrou principalmente no estado de Minas Gerais e no eixo Rio-São Paulo, devido à proximidade de regiões ricas em matérias-primas empregadas na fabricação do aço, ou de locais com grande potencial de consumo. Em 1991, começou o processo de privatização das siderúrgicas. Dois anos depois (1993), oito empresas estatais, com capacidade

para produzir 19,5 milhões de toneladas de aço (70% da produção nacional), tinham sido privatizadas [17].

Atualmente a indústria siderúrgica brasileira esta representada por 14 empresas privadas, controladas por 11 grupos empresariais e operando 29 usinas distribuídas por 10 estados brasileiros. A indústria do aço no Brasil foi responsável pela produção, em 2011, de 35,2 milhões de toneladas de aço bruto, levando o país a ocupar a 9ª posição no ranking da produção mundial [17]. Na Figura 57 é apresentado os atuais dados do mercado siderúrgico:

DADOS DE MERCADO
Parque produtor de aço: 29 usinas, administradas por 11 grupos empresariais.
Capacidade instalada: 47,8 milhões de t/ano de aço bruto
Produção Aço Bruto: 35,2 milhões de t
Produtos siderúrgicos: 33,3 milhões de t
Consumo aparente: 25,0 milhões de t
Número de colaboradores: 137.134
Saldo comercial: US\$ 3,9 bilhões - 13,0% do saldo comercial do país
12º Exportador mundial de aço (exportações diretas)
5º Maior exportador líquido de aço (exp - imp): 7,1 milhões de t
Exporta para mais de 100 países
Exportações indiretas (aço contido em bens): 2,9 milhões de t
Consumo per capita de aço no Brasil: 145 quilos de aço bruto/habitante
Principais setores consumidores de aço: Construção Civil; Automotivo; Bens de capital, Máquinas e Equipamentos (incluindo Agrícolas); Utilidades Domésticas e Comerciais.

Figura 57 - Dados do Mercado Siderúrgico Brasileiro em 2011. Fonte: [17] – IABR.

Os produtos siderúrgicos se dividem entre produtos para venda semiacabados e produtos laminados, que por sua vez, são divididos em produtos longos e produtos planos. Esses produtos totalizaram 33 milhões de toneladas em 2011, sendo somente 75% deste valor (25 milhões de toneladas) consumido no país, entre vendas internas e importações.

O Brasil possui um excesso de capacidade da ordem de 48% quando comparados o consumo aparente (vendas internas mais importações) em 2011 com a atual capacidade instalada no país. Sendo assim, a capacidade instalada de produção de 47,8 milhões de toneladas permite ao setor atender plenamente ao mercado interno e exportar quase a metade desta capacidade.

A evolução do consumo per capita de aço no Brasil é baixo quando comparado com outros países grandes produtores de aço no mundo. A Figura 58 mostra a evolução deste índice entre alguns países produtores do mundo:

	Unid: kg por habitante		
	1980	2000	2010
China	34,1	97,9	427,4
Coréia do Sul	160,0	817,7	1077,2
Japão	610,5	600,5	502,9
USA	376,0	425,3	267,3
Alemanha	469,4	474,8	466,8
Espanha	202,1	434,8	323,1
Brasil	100,6	92,6	136,9
Chile	56,4	96,7	154,0
México	120,2	141,5	142,8

INSTITUTO
ACO BRASIL

Figura 58 - Consumo per capita de aço. Fonte: [17] – IABR

Um baixo consumo per capita de aço é reflexo do crescimento da economia do país. O Brasil e México possuem um dos piores índices nos períodos analisados entre os países da Figura 58, sendo uma consequência direta dos setores da economia que dependem diretamente da indústria do aço como indústria de bens de capital, automobilística e principalmente construção civil. Esses três setores juntos compõem mais de 75% das vendas internas, tendo os mesmos apresentado crescimento moderado nas últimas duas décadas.

A produção de aço no Brasil voltou aos patamares de produção pré-crise do ‘*subprime*¹⁴’ em 2008, somente em meados de 2010. Neste período as importações cresceram enquanto as exportações obtiveram pequena queda. Isso devido à falta de competitividade da indústria siderúrgica nacional e o câmbio do dólar desfavorável às exportações no mercado internacional. Na Figura 59 podemos visualizar a evolução recente da indústria siderúrgica brasileira:

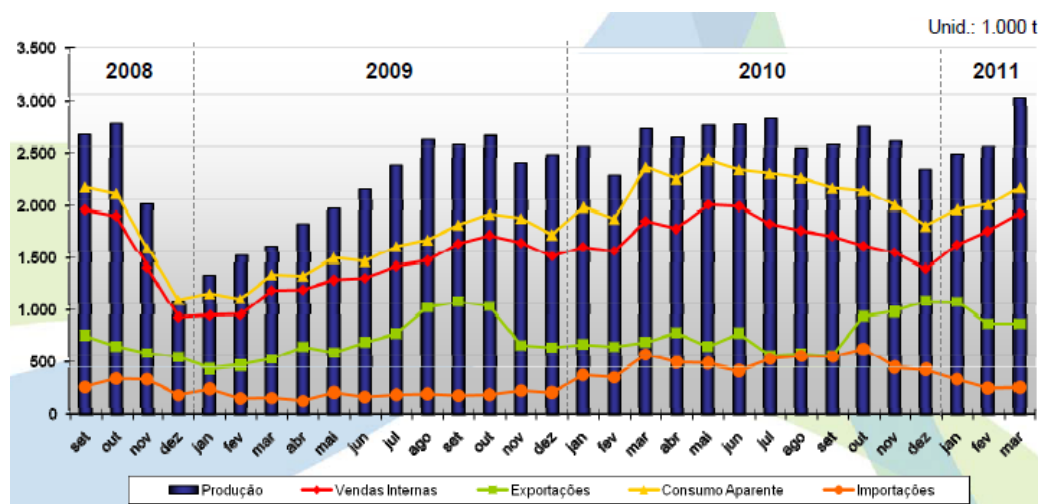


Figura 59 - Evolução recente da indústria brasileira do aço. Fonte: [17] – IABR.

A indústria brasileira investiu expressivamente no setor na última década, principalmente nos últimos dois anos quando investiu na ordem de 9 bilhões de reais [13]. Esses investimentos proporcionaram o aumento da capacidade instalada de produção do parque industrial em 60% com atualização tecnológica e construção de novas siderúrgicas.

Embora a produção atual (2012) tenha retornado ao período pré-crise e os investimentos realizados nos últimos dois anos em novas usinas e *up-grades* de atuais parques industriais, o país não refletiu esses avanços em números. As importações indiretas de aço (através de bens), por exemplo, apresentou um aumento expressivo neste mesmo período. Isso se deve exclusivamente a entrada de produtos estrangeiros derivados da cadeia do aço, principalmente chineses, mais baratos que os produtos nacionais.

¹⁴ A ‘crise do *subprime*’ é uma crise financeira desencadeada em 2006, a partir da quebra de instituições de crédito dos Estados Unidos, que concediam empréstimos hipotecários de alto risco (em inglês: *subprime loan* ou *subprime mortgage*), arrastando vários bancos para uma situação de insolvência, repercutindo fortemente sobre as bolsas de valores de todo o mundo e afetando todos os setores econômicos.

Os números e fatos apresentados nesta seção corroboram a atual realidade do Brasil, no qual este é atualmente um país com baixa competitividade no mercado internacional de aço e com um excesso de capacidade de produção expressivo.

Finalmente, pode-se afirmar que o cenário econômico atual da siderurgia brasileira é mais favorável a iniciativas de redução de custo operacionais do que às novas expansões ou *up-grades* do parque industrial.