

3 Revisão Bibliográfica

O objetivo deste capítulo é apresentar alguns modelos e técnicas usadas em problemas de seqüenciamento de produção específicos de laminação em siderurgia, e métodos aplicáveis à situação estudada.

Na siderurgia existem algumas tentativas de resolver diferentes problemas de seqüenciamento que surgem nos diversos processos. Geralmente os problemas de seqüenciamento são classificados como problemas de ‘otimização combinatorial’, por tratarem de posições relativas de objetos. São diversas as técnicas de solução utilizadas, e isto se deve ao fato de que apesar de os processos serem parecidos, a grande maioria das usinas possuem características peculiares de programação e seqüenciamento, de forma que uma técnica utilizada em uma usina pode não ser aplicável em outra.

Uma busca bibliográfica cuidadosa, porém não exaustiva, não produziu muitas referências relevantes. Tal resultado é típico de problemas industriais práticos, onde a divulgação de resultados é limitada por questão de sigilo industrial, ou por falta de interesse científico.

A nomenclatura e os termos usados nesta revisão estarão em conformidade com suas respectivas fontes.

3.1 **Sistemas e métodos para planejamento e seqüenciamento da produção integrada em siderurgia.**

Tang et al. (2001) fazem um levantamento do estudo da arte em métodos e sistemas de planejamento e seqüenciamento integrado de produção em siderurgia. O processo moderno de integração entre aciaria (AC), máquina de lingotamento contínuo e laminador de tiras a quente (AC-MLC-LTQ) visa conectar da forma mais direta possível estas três áreas, buscando um melhor sincronismo da produção e, conseqüentemente, um fluxo quase contínuo de metal quente reduzindo o consumo de energia, melhorando a qualidade do produto, aumentando a produtividade e reduzindo o tempo de espera entre estágios de produção. Todas essas melhorias são observadas quando se comparam processos

de enformamento ‘a quente’ entre MLC-LTQ com o tradicional processo de CC-CCR entre MLC-LTQ. Lembrando, o CC-CCR é o processo de enformamento considerado no caso em estudo.

Os autores afirmam que as companhias siderúrgicas japonesas propuseram e implantaram as novas técnicas de enformamento a quente (CC-HCR, CC-DHCR e a técnica CC-HDR que direciona a placa diretamente da MLC para a área de laminação do LTQ) para proporcionar uma redução significativa da energia gasta no processo siderúrgico.

A Figura 3.1 abaixo demonstra a ligação entre os quatro tipos de processo de enformamento possíveis.

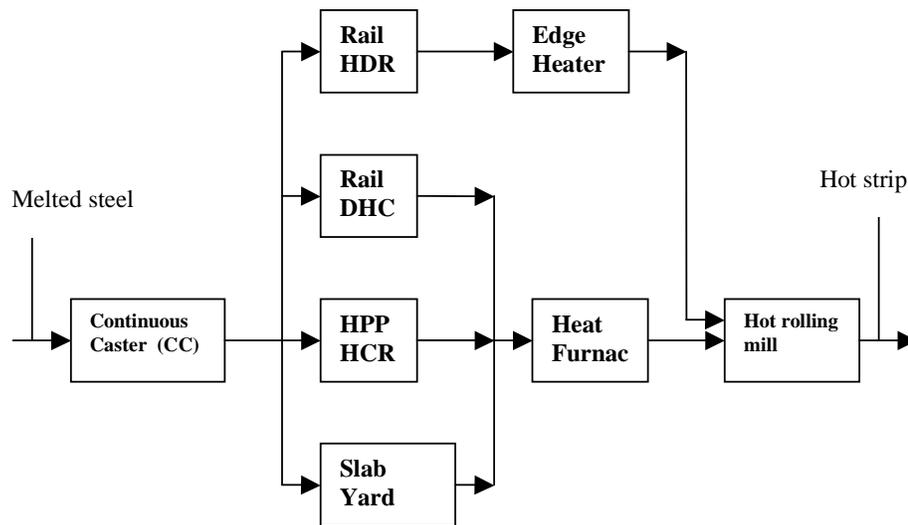


Figura 3.1. Tipos de ligação entre o lingotamento contínuo (CC) e o LTQ.
Fonte: Tang et al. (2001).

Os autores fazem uma importante e interessante revisão sobre sistemas de gerenciamento integrado para AC-MLC-LTQ, onde comentam sobre os sistemas desenvolvidos e utilizados com este intuito em várias siderúrgicas espalhadas pelo mundo. Comentam também sobre os métodos de planejamento e seqüenciamento de produção para AC-MLC-LTQ, onde mencionam que os principais métodos utilizam pesquisa operacional, inteligência artificial (AI- *artificial intelligence*) e

métodos interativos homem/máquina (programador e sistema de seqüenciamento computadorizado).

Os autores mostram otimismo na aplicação da pesquisa operacional em gerenciamento de operações voltado para o planejamento e seqüenciamento de produção na siderurgia, mas procuram demonstrar também que quanto maior for o nível de integração, maiores serão as dificuldades de sincronismo no planejamento e seqüenciamento da produção. Isto porque nessas condições, os ‘problemas combinatoriais’ com maiores graus de complexidade tornam inviáveis os esforços para uma solução exata.

3.2

Estudo do seqüenciamento na linha de chapas grossas da Cosipa

Massote (1991), conduz um estudo com o intuito de analisar e aplicar algoritmos heurísticos já existentes de seqüenciamento de produção em outra áreas, que não a de laminação siderúrgica, na solução do problema específico de seqüenciamento de placas aço, em uma linha de laminação de chapas grossas (LLCG). O estudo se desenvolve em uma usina siderúrgica que se caracteriza como *flow shop*, objetivando minimizar o ‘tempo total’ de fabricação de um determinado lote. O tempo total de fabricação engloba os tempos de processamento das placas de aço em cada unidade (equipamento) distinta que compõe a LLCG, bem como os tempos de espera do material em processo entre as unidades.

O objetivo do estudo de Massote é determinar boas seqüências de laminação das chapas grossas, de forma a se obter a melhor produtividade possível para a LLCG da Companhia Siderúrgica Paulista (COSIPA). No caso da COSIPA, o melhor perfil para as seqüências de chapas grossas é cônico com larguras decrescentes, devido a particularidades do processo (um pouco diferente do perfil geralmente adotado na maioria dos LTQs, que é o perfil de caixão).

O autor fez uma interessante coletânea bibliográfica, e em sua dissertação são apresentados fundamentos teóricos necessários ao desenvolvimento do trabalho, bem como discutidas e apresentadas às diversas técnicas utilizadas para a solução de problemas de seqüenciamento.

São discutidos também os aspectos computacionais, e o sistema elaborado também permite que seja feita uma análise precisa do tempo de espera das placas entre um processo e outro, bem como a ociosidade.

3.3

Problema de seqüenciamento da produção em um laminador de tiras a quente

A abordagem através de uma heurística de busca tabu foi utilizada por Lopez, Carter e Gendreau (1998) para o problema de seqüenciamento de placas no LTQ da Dofasco, empresa Canadense de laminação. Os autores propõem o modelo como sendo uma generalização do problema do caixeiro viajante colecionador de prêmios (PCVCP) com objetivos múltiplos e conflitantes e restrições complexas. Formulam o problema como um modelo de programação matemática e propõem um método heurístico para determinar boas soluções aproximadas. A heurística é baseada em '*tabu search*' (TS), ou busca tabu (BT), e uma nova idéia denominada pelos autores de '*canibalização*'. Pela sua similaridade com o problema tratado nesta pesquisa, abaixo essa abordagem será revista em maior detalhe.

Descrição do problema de seqüenciamento do LTQ na Dofasco

A Dofasco produz ou compra placas de aço com diferentes dimensões e composições químicas, que são as entradas para o LTQ. As placas compradas vão para um pátio de estocagem de placas (PEP), assim como parte das produzidas no lingotamento contínuo (LC) da própria empresa, que lá resfriarão até a temperatura ambiente. As demais placas produzidas na empresa são enviadas para um pátio local (onde ficarão aguardando poucas horas antes de serem processadas no LTQ, mantendo-se ainda quentes), ou então diretamente para um dos fornos de reaquecimento de placas do LTQ. Existem dois FRs na área de reaquecimento da Dofasco com capacidade de reaquecimento de 40 placas simultâneas cada um. Verifica-se então que na Dofasco a alimentação dos FRs pode ser feita via CC-CCR, CC-HCR ou então CC-DHCR.

A espessura das placas de aço que serão laminadas em seu LTQ são de 8 ou 10 polegadas. Diferenças dimensionais são críticas no que se refere ao seqüenciamento do forno, pois, mesmo havendo compatibilidade de material, placas com espessuras diferentes possuem tempo de residência distintos. Como a velocidade de avanço no forno é ajustada em função da placa que tiver maior tempo de residência, um aquecimento desnecessário é gerado nas placas com tempo de residência menor da mesma fornada. Isto significa desperdício de energia no forno e redução da sua capacidade efetiva de produção.

Na área de laminação do LTQ, o LD reduz a espessura de uma placa para aproximadamente 30 mm. No TA existem sete cadeiras de cilindros de laminação que reduzem gradualmente a espessura da chapa grossa para a espessura final requerida (de 1,39 até 6,19 mm).

Um *line-up* (ciclo de desbaste) na Dofasco normalmente inclui três *product blocks* (caixões de laminação), pois, em média, os cilindros de trabalho do TA são substituídos a cada 8 h e os cilindros do LD são substituídos a cada 24 h.

Os fatores restritivos do seqüenciamento da produção das BQs na Dofasco são praticamente os mesmos de qualquer outro LTQ em geral, ou seja: especificações de qualidade superficial do produto e datas prometidas de entrega. As características importantes das placas de aço também são: largura, espessura, grau (composição química), temperatura de carregamento no FR, *drop-out*, dureza, e dimensões finais requeridas para a BQ que será produzida.

Uma boa seqüência de placas no LTQ da Dofasco requer trocas suaves de: largura das BQs e, além disso, em cada faixa de largura deve haver também trocas suaves de: espessura das BQs, dureza e tempo de residência no FR.

A troca suave de largura das BQs se deve a fatores que determinam que a seqüência tenha a forma de um 'caixão'. No *break in* (acerto) do caixão é necessário sequenciar poucas BQs (entre 2 e 6 apenas) 'estreitas' nesta zona inicial da seqüência. Como já visto, as placas ali seqüenciadas devem ter as menores exigências dimensionais e de qualidade possíveis, pois é uma zona de ajustes iniciais. Na zona seguinte com larguras crescentes, ou *wide-out* (abertura), devem ser seqüenciadas no máximo 15 BQs ainda sem grandes exigências de qualidade e tolerância dimensional. Na zona de decréscimo de larguras, ou *comming-down* (corpo), pelas regras da Dofasco, o ideal é concentrar as BQs com as maiores exigências entre as 50 primeiras.

Formulação do Problema

Os autores formularam o *hot strip mill production scheduling problem* (HSMPSP) como uma combinação de modelo matemático com um grupo de restrições controladas por programa de computador. O grupo de restrições refere-se à qualidade superficial de algumas bobinas, placas especiais para o *wide-out*, e restrições de FR.

O modelo matemático é uma generalização do problema do caixeiro viajante colecionador de prêmios (PCVCP) desenvolvido por Balas (1989). Esta abordagem é uma interessante variação do Problema do Caixeiro Viajante (PCV), porém mais complexa. O PCVCP pode ser explicado como segue: Um vendedor deve fazer trajetos entre cidades, sendo que cada trajeto possui um determinado custo. Ele obtém um prêmio em cada cidade que visita e paga uma penalidade para cada cidade que deixa de visitar. Ele deve encontrar o *tour* (conjunto de trajetos) que minimiza seu custo de viagem enquanto inclui em seu *tour* cidades suficientes para que alcance um prêmio mínimo preestabelecido.

Balas (1989) destaca duas importantes questões determinantes para a aplicação do PCVCP no problema de seqüenciamento de BQs: a boa escolha das placas que irão compor a seqüência entre as várias placas que estão no estoque, o que ele chama de etapa de ‘seleção’ e a determinação da seqüência em que estas placas entrarão no LTQ de forma a atender outros critérios como a vida útil dos cilindros, o que ele chama de etapa de ‘seqüenciamento’. Para obtenção de uma solução ótima, essas duas questões devem ser tratadas simultaneamente. O PCVCP é então formulado como sendo a combinação de um ‘problema da mochila’, responsável pela etapa de seleção, com um simples PCV, que é responsável pela etapa de seqüenciamento.

A Figura 3.2 mostra um pequeno exemplo de como funciona o PCVCP. As cidades 2, 3, 5 e 6 são incluídas na solução ótima (seqüência), enquanto as outras, 1 e 4, ficam de fora.

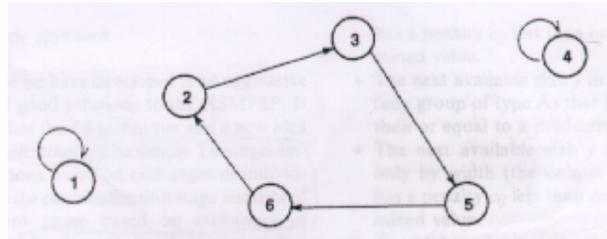


Figura 3.2 – Ilustração do PCVCP
Fonte: Lopez, Carter e Gendreau (1998)

O PCVCP pode ser equacionado da seguinte maneira: um vendedor viaja entre pares de cidades i e j ao custo c_{ij} , recebe um prêmio w_i em cada cidade i que ele visita e paga uma penalidade c_{ii} para cada cidade que ele não visita. Ele deseja minimizar seu custo de viagem e penalidades enquanto visita cidades suficientes para tentar obter um prêmio predeterminado w_0 .

As variáveis e parâmetros definidos para a formulação matemática são: considerar um grafo $G=(N, A \cup O)$ onde N é o grupo de nós, A é o grupo de arcos, O é o grupo de 'loops', X é a matriz de loops e arcos de G , $X \in \{0,1\}^{n^2}$; $x_{ij}=1$ significa que a placa j é seqüenciada logo depois da placa i , com uma penalidade c_{ij} , $x_{ii}=1$ significa que a placa i não está incluída na seqüência, desta forma uma penalidade c_{ii} deve ser somada a função objetivo. A função objetivo é minimizar a penalidade total para o seqüenciamento das placas em uma seqüência. w_i é definido como o comprimento (ou peso) da placa i (prêmio no PCVCP), então, $\sum_{i \in N} w_i$ é o comprimento total disponível (prêmio total disponível no PCVCP). Se $x_{ii}=1$ significa que a placa i não é seqüenciada, desta forma o comprimento (prêmio) w_i não é laminado (obtido). Se $x_{ii}=0$ significa que a placa i é seqüenciada e o comprimento w_i é laminado. Assim, $\sum_{i \in N} w_i x_{ii}$ representa o comprimento não laminado (prêmio não obtido), e então $\sum_{i \in N} w_i - \sum_{i \in N} w_i x_{ii}$ representa o comprimento laminado (prêmio obtido). A quilometragem de uma seqüência deve ficar entre um limite mínimo (w_0) e um máximo (w_1), e isto pode ser implementado na forma: $w_0 \leq \sum_{i \in N} w_i - \sum_{i \in N} w_i x_{ii} \leq w_1$. Fazendo $L = \sum_{i \in N} w_i - w_1$ e $U = \sum_{i \in N} w_i - w_0$, pode-se rescrever a restrição como $L \leq \sum_{i \in N} w_i x_{ii} \leq U$.

Resumindo, o PCVCP encontra as melhores placas (nós) dentre todas as disponíveis na empresa e uma seqüência ótima de laminação destas placas, com a

condição que a quilometragem total laminada se situe entre limites pré-estabelecidos.

O HSMPPSP foi modelado matematicamente da seguinte forma:

$$\text{Min } \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

s.a.

$$\sum_{j=0}^n x_{ij} = 1, \quad i = 0, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ij} = 1, \quad j = 0, \dots, n \quad (3)$$

$$L \leq \sum_{i=0}^n w_i x_{ii} \leq U \quad (4)$$

$$x_{00} = 0 \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i, j = 0, \dots, n \quad (6)$$

$$G(x) \text{ tem apenas um ciclo com comprimento } \geq 2 \quad (7)$$

$$\text{Restrições de qualidade superficial} \quad (8)$$

$$\text{Restrições de placas especiais para o } \textit{wide-out} \quad (9)$$

$$\text{Restrições do Forno de Reaquecimento} \quad (10)$$

A restrição 5 significa que deve ser incluída uma placa falsa '0' (fechamento do ciclo) na solução ótima. As restrições de 8 a 10 não podem ser expressas facilmente na forma matemática.

Heurística de Aproximação

Os autores desenvolveram um método 'agressivo' para encontrar boas soluções para o HSMPPSP, aplicando repetidamente a BT e uma técnica por eles denominada 'canibalização'. O simples estágio BT melhora a solução fazendo trocas de placas individualmente, enquanto que o estágio de canibalização consiste em busca de melhorias através de trocas de grupos de placas. O estágio de canibalização foi inspirado em um método chamado '*cross exchange*' que, segundo os autores, foi originalmente proposto por Taillard et al. (1995) no

contexto de uma metaheurística BT para o problema de roteamento de veículos com janela de tempo.

A canibalização consiste na troca de pequenas subsequências ruins (*bad sections*) na seqüência completa por outras pequenas subsequências boas (*good sections*) de outras seqüências completas, geradas de forma similar.