Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics, v. 9, n. 1, 2022.

Trabalho apresentado no XLI CNMAC, Unicamp - Campinas - SP, 2022.

Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics
Preprint

Modelagem matemática para otimizar o processo de têmpera em uma fábrica de molas automotivas

Pedro R. L. Andrade[1] Silvio A. de Araujo[2] Adriana C. Cherri[3] Felipe K. Lemos[4]
[1]: DAENP/UTFPR, Londrina, PR, [2]: IBILCE/UNESP, S. J. do Rio Preto, SP, [1,3,4]: FEB/UNESP, Bauru, SP

Neste artigo, estuda-se a produção de molas de caminhão em uma fábrica de molas automotivas do estado do Paraná. O objetivo é otimizar o processo de têmpera, maximizando a alocação de molas no forno, economizando energia. Esta é uma abordagem pouco considerada na literatura, tanto por sua aplicação em um forno de têmpera, quanto pela metodologia proposta. O problema é tratado como um Problema de Corte de Estoque (PCE) e o modelo matemático é baseado no problema de fluxo em arcos.

O processo de têmpera inicia com a alocação dos items no forno. Em seguida, os itens que precisam de arqueamento (convencional ou parabólico) vão para as arqueadeiras e depois para os tanques de óleo. Os outros itens, vão direto para os tanques de óleo. Por fim, os itens (molas) são montados em produtos finais (feixes de molas).

Dependendo dos tipos de itens a serem processados, a velocidade e temperatura do forno precisam ser alteradas. Todos os tipos de itens são temperados em temperaturas entre 860ºC e 980ºC. Para realizar uma mudança de temperatura e/ou velocidade, um *setup* é necessário. A cada *setup*, cerca de metade do comprimento do forno fica vazio, entre os itens de um tipo e de outro. Além disso, a empresa definiu receitas padronizadas para simplificar a parametrização da velocidade e temperatura do forno. Cada receita pode ser utilizada apenas para processar itens que estão contemplados no intervalo de espessura definido, mas cada item pode ser contemplado por mais de uma receita.

Uma questão importante a ser considerada, para a viabilidade da solução, é a necessidade de que todos os itens estejam apoiados em pelo menos duas vigas dentro do forno, caso contrário eles cairão, inviabilizando a alocação.

Em um PCE, um padrão de corte corresponde a uma forma particular de cortar um objeto para a produção de itens menores. Neste estudo, um padrão de corte representa uma forma particular de alocar os itens no forno. O tamanho do objeto equivale à largura do forno. [2, 3] entre outros, utilizaram o modelo de fluxo em arcos para representar o PCE unidimensional.

Para descrever o problema através de um modelo de fluxo em arcos, considera-se um conjunto de objetos idênticos (cada um representando uma alocação do forno que é realizada entre dois passos consecutivos) e diversos tipos de itens a serem inseridos em cada objeto. Cada item inserido fornece uma determinada margem de ganho. Desta forma, a largura do forno (tamanho do objeto) é aproximada por um número de pontos equidistantes, $b = 1, \ldots, L$, em que L é a largura total do forno. Os pontos representam partes de igual tamanho ao longo da largura do forno, sendo que se diferenciam os pontos que representam partes onde estão localizadas as vigas. Utilizam-se arcos ligando um ponto inicial d a um ponto final e. Cada arco representa a alocação de um item i em um trecho $(d - e)$ do forno, e a diferença entre os pontos $(e - d)$ é igual ao comprimento do item (l_i).

[1]pedro.rochavetz@gmail.com
[2]silvio.araujo@unesp.br
[3]adriana.cherri@unesp.br
[4]felipeklemos@gmail.com

No modelo matemático proposto, a função objetivo maximiza a soma da margem obtida da têmpera de todos os itens. A primeira restrição garante que só exista produção em uma receita caso tenha sido feito um *setup* para essa receita. Na segunda restrição, garante-se que a produção de um tipo de item, em todas as alocações, em todas as receitas, seja ao menos igual à sua demanda. Há também uma restrição para garantir que a utilização de um tipo de item não supere a sua disponibilidade (estoque intermediário). A limitação para que o tempo utilizado na solução, considerando tempo de produção e de *setup*, não exceda o tempo total disponível em um dia, é feita na quarta restrição. Desta forma, pondera-se o tempo de processamento dos itens em cada alocação e seu consumo dos recursos disponíveis. As restrições cinco e seis garantem que o limite de capacidade das arqueadeiras, parabólicas e convencionais, seja respeitado a cada alocação. A sétima restrição trata da abordagem de fluxo em arcos. Se uma alocação k foi realizada em uma receita t, então a soma entre todos os arcos que saem e que chegam a cada nó é zero para todos os nós intermediários, sendo que essa soma vale um para o nó inicial (um arco sai e nenhum arco chega), e "-1" para o nó final (um arco chega e nenhum arco sai). Por outro lado, se uma receita t não foi utilizada em uma alocação k, nenhum item foi alocado, logo, a soma em todos os casos é 0.

Testes com dados reais e aleatórios foram realizados para análise do desempenho do modelo proposto. Tratando dos dados reais, resultados mostraram que o modelo obteve solução superior à prática da empresa, com uma produção de molas 51% maior. O principal motivo para isto foi a redução de 71,5% na perda de espaço no forno, reduzindo espaços vazios e alocando mais itens no forno. A redução do número de *setups* também colaborou para o bom resultado, permitindo mais tempo do forno em produção. Testes com dados aleatórios alcançaram a solução ótima em praticamente todos os casos, já que para 178 de 180 instâncias, o *gap* é igual a zero.

Por fim, uma linha interessante de estudo é a análise deste problema considerando múltiplos períodos. A solução do PCE unidimensional multiperíodo, já estudado em diversos contextos, supera abordagens que consideram períodos isolados [1].

Referências

[1] K. C. Poldi e S. A. De Araujo. "Mathematical models and a heuristic method for the multiperiod one-dimensional cutting stock problem". Em: **Annals of Operations Research** 238.1-2 (2016), pp. 497–520. DOI: 10.1007/s10479-015-2103-2.

[2] J. M. Valerio de Carvalho. "LP models for bin packing and cutting stock problems". Em: **European Journal of Operational Research** 141 (2002), pp. 253–273. DOI: 10.1016/S0377-2217(02)00124-8.

[3] L. A. Wolsey. "Valid inequalities, covering problems and discrete dynamic programs". Em: **Annals of Discrete Mathematics** 1 (1977), pp. 527–538. DOI: 10.1016/S0167-5060(08)70758-1.