RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DE CARREGAMENTO DE CONTAINER ATRAVÉS DE UMA HEURÍSTICA

RESOLUTION OF THE PROBLEM BIN-PACKING CONTAINER THROUGH AN HEURISTIC

Eliane Vendramini de Oliveira
Mestre em Engenharia Elétrica – UNESP/ Ilha Solteira - Professora da FAI

RESUMO

Este artigo analisa o problema do Carregamento de Container a ser resolvido por uma heurística. Através do emprego de uma heurística um container com carga heterogênea, tem sua carga configura tal que o volume utilizado em relação ao volume total disponível do container seja maximizado. A importância da abordagem deste problema está na prática constante do transporte internacional de mercadorias e produtos através de containers. O problema abordado no artigo é considerado NP-difícil e por isso complexo de ser resolvido matematicamente e deterministicamente, justificando o emprego de heurísticas para resolução do problema.

Palavras-chave: Heurística. Problema de Carregamento de Container. Problema Knapsack.

ABSTRACT

This article analyzes the problem Bin-packing container to be solved by a heuristic.
Through the use of a heuristic with a container load heterogeneous, has set its load such that the volume used in relation to the total volume of container available is maximized.
The importance of addressing this problem is the practice of the international transport of goods and products through containers.
The problem addressed in the article is considered NP-hard and so complex to be solved mathematically and deterministically, justifying the use of heuristics to solve the problem.

Key-words: Heuristics. Problem Bin-Packing Container. Knapsack Problem.

INTRODUÇÃO

O Problema de Carregamento de Container é um problema clássico em pesquisa operacional, na literatura ele é diferenciado entre aqueles problemas em que a carga completa tem que ser armazenada, podendo usar mais de um container (conhecido na literatura como Problema Bin- Packing) e aqueles que toleram que alguns itens sejam deixados para trás, utilizado somente um container (conhecido como problema Knapsack). Outro tipo de suposta diferenciação é a definição de tipos de carga que será alocada no container, a carga pode ser homogênea (um tipo de caixa somente), heterogênea fraca (poucos tipos de caixa com muitas caixas de cada tipo) e uma carga fortemente heterogênea (muitos tipos de caixa com poucas caixas de cada tipo).

O assunto do artigo é o problema Knapsack com carga heterogênea, cujo objetivo geral segundo Pisinger (2002), é determinar uma configuração de carga tal que o volume utilizado em relação ao volume total disponível do container seja maximizado. Outros objetivos que podem ser agregados ao problema são: Maximização do peso da carga, do equilíbrio (centro de gravidade) e do valor monetário associado à carga. Todos os esforços são usados para que os itens de carga sejam adequados dentro do container da melhor maneira possível, visando os objetivos já citados.

A importância da abordagem deste problema está na prática constante do transporte internacional de mercadorias e produtos através de containers, por vias aéreas ou marítimas. Este tipo de transporte é oneroso e cobra-se pelo container alugado e não pela quantidade de produto que será carregada. Por isso a vantagem de aproveitar o volume do container ao máximo. Se o carregamento do container não for bem planejado, pode comprometer o valor final da mercadoria transportada ou até ser encarado como prejuízo para quem vendeu o produto que está sendo transportado.

O problema abordado no artigo é considerado NP-difícil e por isso complexo de ser resolvido matematicamente e deterministicamente, justificando o emprego de heurísticas para resolução do problema. O artigo aqui exposto propõe como resolução para o problema de carregamento de container uma heurística diferenciada, onde é proposta uma divisão do container e cada divisão é encarada como um problema Knapsack.

MATERIAIS E MÉTODOS

A Heurística Proposta

A heurística proposta neste artigo trabalha de maneira sistemática. Caixas de vários tipos estarão disponíveis para o carregamento do container. A quantidade de caixas de cada tipo será contabilizada no início da aplicação da heurística, e caixas com mesmas dimensões mas de tipos diferentes serão contabilizadas como caixas de um único tipo.

A ordem como as caixas serão carregadas no container ao final da aplicação da heurística será chamada de padrão de carregamento. Este padrão de carregamento será armazenado em um vetor onde o índice do vetor indica a ordem que a caixa será alocada no container e o conteúdo do vetor naquele índice (posição) mostra qual caixa será alocada no container naquela ordem.

O cálculo do volume ocupado pela carga carregada, além dos cálculos do peso da carga, do equilíbrio e valor da carga carregada serão realizados após o processo heurístico aplicado no problema, processo que será chamado de decomposição dos espaços do container.

A heurística proposta por este artigo possibilita através da decomposição dos espaços do container o preenchimento do mesmo dividindo-o em quatro partes.

São elas: Parte Principal ou Corpo Principal do Container, Espaço Lateral Residual, Espaço Superior Residual e Espaço Frontal Residual.

O preenchimento dos quatro espaços do container obedece a uma ordem de preenchimento partindo primeiramente da lateral esquerda para a direita, preenchendo o espaço horizontal, logo após segue o preenchimento do espaço vertical de baixo para cima e em seguida do fundo do container para frente.

A heurística procura também, alocar caixas mais pesadas abaixo e em camadas específicas, onde o risco de esmagamento da carga por outra mais pesada se anula.

Codificação do Padrão de Carregamento

A representação do padrão de carregamento (P) é formada por índices de caixas bi: P={b1, b2, b3, ..., bn}, onde i = 1, ..., n são índices das caixas.

A seqüência b1, b2, ..., bn representa a ordem com que as caixas devem ser posicionadas no container, seguindo as regras de preenchimento previamente definidas.

A figura 1 mostra como seria um possível padrão de carregamento com quatro caixas disponíveis.

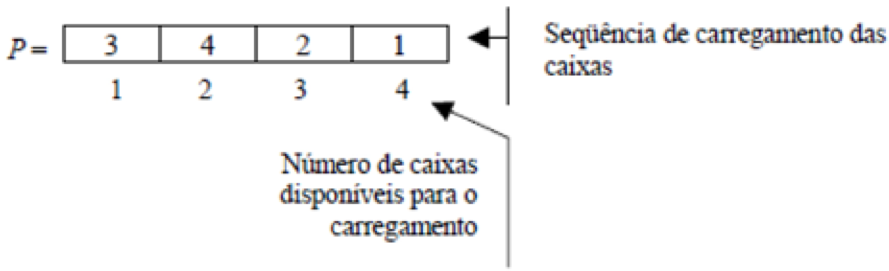

Fig 1. Exemplo de Padrão de Carregamento

Os índices das caixas também representam os tipos de caixas, pois se temos x tipos de caixas, e cada tipo de caixa tem m caixas representando-o, então as caixas com índices de 1 a m1 representam as caixas do tipo 1, as caixas com índices de m1+1 a m2 representam as caixas do tipo 2 e assim sucessivamente, até completar os índices das caixas disponíveis para o carregamento.

A tabela 1 logo abaixo, traz de maneira simples e didática como identificar o tipo de cada caixa.

Tabela 1. Exemplo de Identificação de Tipo de caixa

Tipo	Qtde. Caixas	Intervalo de Tipos de Caixas
1	2	1 à 2
2	3	3 à 5
3	5	6 à 10

Além do vetor onde é representado o padrão de carregamento, a codificação do problema estudado necessita de um vetor auxiliar onde é sinalizado como as caixas foram rotacionadas e alocadas no container. Para tanto a variação da orientação da caixa é identificada através de índices.

Se a largura da caixa está apoiada na base, e altura e profundidade não variaram, então o índice que representa esta posição de caixa é igual a 1.

Se a altura da caixa está apoiada na base, e largura da caixa no lugar da altura, com profundidade sem variar, então o índice que representa esta posição de caixa é igual a 2.

Se a profundidade está apoiada na base, a altura sem variar e largura da caixa está no lugar da profundidade, então o índice que representa esta posição de caixa é igual a 3.

Se a largura está apoiada na base, e altura e profundidade trocaram de lugar entre si, então o índice que representa esta posição de caixa é igual a 4.

Se a altura está apoiada na base, profundidade está no lugar da altura e largura no lugar da profundidade, então o índice que representa esta posição de caixa é igual a 5.

Se a profundidade está apoiada na base, largura está no lugar da altura e altura está no lugar da profundidade, então o índice que representa esta posição de caixa é igual a 6.

Assim depois de aplicar o processo de decomposição de espaços é gerado um outro vetor complementar ao padrão de carregamento onde é identificado de que maneira a caixa foi alocada no container.

Cálculos para a avaliação do Padrão de Carregamento

Temos duas propostas para a avaliação do padrão de carregamento. São elas: a avaliação com o objetivo de maximizar somente o volume da carga alocada no container pela heurística (avaliação mais comum na literatura) e a avaliação com o objetivo de maximizar volume, peso, centro de gravidade e valor da carga carregada, este segundo tipo de avaliação foi proposta por Rodrigues (2005) e será aplicada no trabalho para fins de comparação.

(1) Maximizar somente volume da carga

O cálculo mais comum no meio científico para a avaliação do padrão de carregamento é calcular apenas a porcentagem do volume ocupado pela carga alocada no container em relação ao volume do container. O objetivo é obter o valor máximo de 100% na ocupação do volume do container, mas como muitas vezes isso não é possível, procura-se o valor mais próximo.

A função usada para maximizar o volume da carga é:

$$\varpi = \frac{\sum_{i=1}^{m} VL_{bi}}{VL_c} x100$$

Onde VL_{bi} é o volume de cada caixa carregada, onde i determina o índice da caixa, e VL_c é o volume disponibilizado pelo container.

(2) Maximizar volume, peso, centro de gravidade e valor da carga

Os cálculos para a avaliação do padrão de carregamento após a aplicação do processo de decomposição dos espaços são realizados de maneira separada, pois serão calculados vários interesses e só depois os resultados serão reunidos para um valor final. Segundo Rodrigues (2005) avalia-se a configuração da carga carregada conforme o volume ocupado, o peso dos produtos carregados, o centro de gravidade e o valor total dos produtos. Cada sub-função possui um peso associado que prioriza os objetivos mais importantes em relação a outros objetivos.

O objetivo principal é obter o valor máximo da função geral que rege este problema. A função geral é:

$$\varpi = \frac{k_1 x VL + k_2 x P + k_3 x G + k_4 x V}{k_1 + k_2 + k_3 + k_4}$$

As sub-funções são as seguintes:

VL - Sub-função para o cálculo do volume;
P - Sub-função para o cálculo do peso;
G - Sub-função para o cálculo do centro de gravidade e
V - Sub-função para o cálculo do máximo valor dos produtos carregados.

Os pesos são determinados por k_1, k_2, k_3 e k_4, que estão associados às sub-funções do volume (VL), do peso (P), do centro de gravidade (G) e do valor da carga (V), respectivamente.

Sub-função do Volume (VL)

$$VL = \frac{\sum_{i=1}^{m} VL_{bi}}{VL_c} x100$$

Na expressão, VL_{bi} é o volume de cada caixa carregada, onde i determina o índice da caixa, e VL_c é o volume disponibilizado pelo container.

Sub-função do Peso (P)

$$P = \begin{cases} 0 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \sum_{i=1}^{m} P_{bi} > P_c \\ \dfrac{\sum_{i=1}^{m} P_{bi}}{P_c} x100 \ldots\ldots \sum_{i=1}^{m} P_{bi} \leq P_c \end{cases}$$

P_c é o peso máximo suportado pelo container, P_{bi} é o peso da caixa de índice i e m representa o número de caixas da carga.

Sub-função do Centro de Gravidade (G)

$$G = \left[\left(H_c x 1.5 - \frac{\sum_{i=1}^{m} P_{bi} x G_{bi}}{\sum_{i=1}^{m} P_{bi}} \right) / H_c \right] x100$$

P_{bi} representa o peso da caixa carregada, G_{bi} representa a distância do centro de gravidade de cada caixa para com a base do container, conforme índice i, e assume-se que o valor médio da altura da caixa é o seu centro de gravidade, e H_c é a altura do container.

Considera-se como ideal um centro de gravidade no centro geométrico do container (metade da altura). Caso o centro de gravidade esteja abaixo do valor médio da altura do container, o valor de G será maior que 100 e, caso contrário, G assumirá um valor abaixo de 100.

Sub-função do Valor (V)

$$V = \begin{cases} 0 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \sum_{i=1}^{m} V_{bi} > V_c \\ \dfrac{\sum_{i=1}^{m} V_{bi}}{V_c} x100 \ldots\ldots \sum_{i=1}^{m} V_{bi} \leq V_c \end{cases}$$

V_{bi} é o valor associado a cada produto e V_c é o valor monetário máximo que a carga do container deve possuir.

Decomposição dos Espaços do Container

A decomposição dos espaços do container para obtenção da seqüência de caixas que permitirá conhecer o padrão de carregamento do container é realizada de maneira sistemática.

O processo respeita as restrições que as caixas e o próprio container apresentam, como limites dimensionais. As caixas poderão ser rotacionadas (mudança de orientação) em até seis variações.

As caixas preencherão o container seguindo a ordem de preenchimento da esquerda para a direita, de baixo para cima e do fundo do container para frente.

No processo de decomposição dos espaços do container temos uma seqüência de passos a seguir e que deve ser respeitada a sua ordem.

1. Primeiramente, verifica-se qual a caixa que tem o maior número de similares, ou seja, qual a caixa que tem o maior número de caixas com dimensões idênticas a ela.
2. A caixa escolhida é alocada no ponto de partida que é a origem do container, localizada no canto inferior esquerdo do fundo do container.
3. A caixa é rotacionada para que minimize primeiramente o espaço restante na lateral direita do container, o ideal seria que não houvesse sobra. Então a dimensão que retornar a menor sobra é fixada como largura da caixa.
4. Depois, nesta ordem de prioridade, rotaciona as duas dimensões livres para que minimize o espaço restante superior. Então a dimensão que retornar a menor sobra é fixada como altura da caixa.
5. E por último, na ordem de prioridade, a única dimensão livre da caixa é atribuída ao comprimento da caixa, tendo também uma sobra no espaço frontal do container.
6. A partir desta posição fixa, outras caixas com dimensões iguais serão colocadas uma do lado da outra e uma em cima da outra até que o espaço na lateral direita e acima sejam minimizados, formando assim uma camada.
7. Camadas iguais à descrita logo acima preencherão o container até que não existam mais caixas iguais às utilizadas na camada anterior disponíveis ou que o espaço restante na parte frontal do container não consiga alocar mais uma camada.
8. A parte do container que foi preenchida pelo conjunto de camadas iguais será chamada de **Parte Principal** ou **Corpo Principal do Container**, e os espaços restastes serão chamados de **Espaço Lateral Residual, Espaço Superior Residual e Espaço Frontal Residual.**

Portanto houve uma divisão de quatro partes no container para melhor preenchê-lo.
Logo após o Corpo Principal do Container ser encontrado, é verificado se os espaços residuais são excessivos. Será considerada sobra excessiva se esta ultrapassar cerca de 4% do tamanho da dimensão do container relacionada com esta sobra. Se não for constatado sobra excessiva deve-se ignorar os passos relacionados a ela.

9. Verifica-se a largura do Espaço Lateral Residual, se esta largura for maior que 4% da largura do container é verificado também se girando a caixa em suas três dimensões, a menor sobra encontrada é maior ou igual ao tamanho da menor dimensão de caixa disponível para carregamento. Se esta condição for satisfeita não será executado o passo 10 e volta-se ao passo 4.
10. Para um resultado negativo da condição acima este passo deve ser executado, se a largura do Espaço Lateral Residual for maior que 4% da largura do container, mas o tamanho da sobra não é maior ou igual ao tamanho da menor dimensão de caixa encontrada entre as caixas disponíveis, a primeira caixa alocada na origem do container deve ser substituída pela caixa que detém o segundo maior número de caixas similares a ela, se mesmo esta não satisfazer a condição dos 4%, deve ser testada a caixa que detém o terceiro maior número de caixas similares a ela e se mesmo assim esta terceira caixa não satisfazer a condição imposta deve-se optar pela melhor entre elas, ou seja, a

caixa que resultou na menor sobra mesmo não satisfazendo a condição imposta será a escolhida. Volta-se ao passo 4.

O mesmo deve acontecer com o Espaço Superior Residual.

11. Verifica-se a largura do Espaço Superior Residual, se esta altura for maior que 4% da altura do container é verificado também se girando a caixa em suas duas dimensões livres, a menor sobra encontrada é maior ou igual ao tamanho da menor dimensão de caixa disponível para carregamento. Se esta condição for satisfeita não será executado o passo 12 e volta-se ao passo 5
12. Para um resultado negativo da condição acima este passo deve ser executado, se a altura do Espaço Superior Residual for maior que 4% da altura do container, mas o tamanho da sobra não é maior ou igual ao tamanho da menor dimensão de caixa encontrada avaliando os tipos de caixas disponíveis, deve-se retirar a última caixa colocada acima das outras e voltar ao passo 11.

Com o Corpo Principal do Container definido, os espaços residuais serão preenchidos procurando seguir as mesmas orientações que a parte principal.

A ordem de preenchimento dos espaços residuais é primeiramente o Espaço Lateral Residual, em seguida Espaço Superior Residual e por último Espaço Frontal Residual.

13. Procurando-se caixas de dimensões idênticas capazes de preencher ao máximo os espaços residuais. E a partir do momento que a caixa foi escolhida para preencher o espaço livre do container ela não poderá mais ser utilizada para preenchimentos posteriores.

Dentro do processo de decomposição, os espaços do container são analisados separadamente verificando a existência de caixas de mesmas dimensões, mas pesos diferentes e se existir, as caixas serão colocadas dentro do espaço que se encontra abaixo das outras ou em camadas específicas para não ocorrer esmagamento de carga.

A figura 2 traz o fluxograma do Processo de Decomposição dos Espaços do Container.

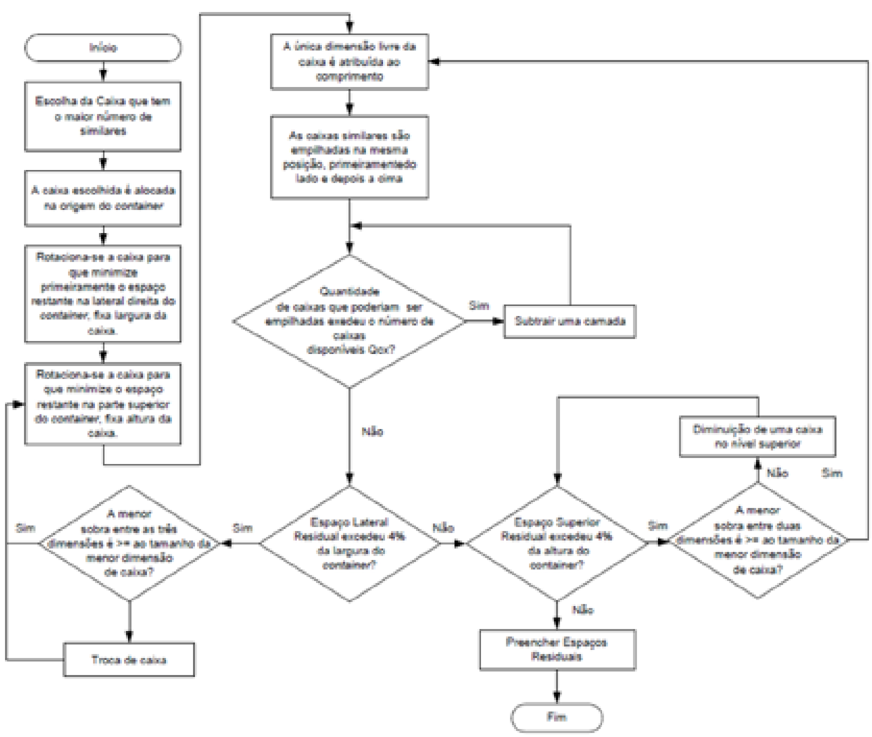

Fig 2. Fluxograma do Processo de Decomposição dos Espaços do Container

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A heurística desenvolvida foi testada com diferentes dimensões de caixas disponíveis para o carregamento e com diferentes grupos de caixas, homogêneos e heterogêneos.

A heurística foi desenvolvida em FORTRAN 4.0 e os testes foram realizados em um PC HP BRIO PentiumII Processador IntelMMX/ 256 MB de memória RAM, com sistema operacional Windows 98

Os dados que foram utilizados em nossos testes foram apresentados em Rodrigues (2005), o container tinha proporções de 1.35m de altura, 5m de comprimento e 1.08m de largura. Tinha como peso máximo de carregamento 18070 kg e o valor de 300000.

Os valores dos pesos k_1, k_2, k_3 e k_4 que foram utilizados no cálculo de uma das propostas de avaliação do padrão de carregamento são respectivamente 7, 0.5, 0.5 e 2.

A tabela 2 revela os dados dimensionais, peso, valor e quantidade de caixas disponíveis para os testes.

Tabela2 – Dados dimensionais, pesos e valores das caixas do teste com 285 caixas.

Tipo	Altura(cm)	Compr.(cm)	Largura(cm)	Volume(cm^3)	Peso(kg)	Valor(R$)	Qtd.
A	18.3	50.0	38.2	34953.00	4.2	548	55
B	15.6	50.0	38.2	29796.00	3.9	508	30
C	69.6	59.3	86.9	358660.63	53.0	1410	68
D	69.6	57.6	89.8	360004.61	82.0	3135	26
E	41.9	56.3	35.8	84451.126	9.6	626	45
F	41.9	56.3	35.8	84451.126	10.6	791	43
G	41.9	56.3	35.8	84451.126	10.6	791	18

Os testes realizados com 285 caixas com dimensões heterogêneas alcançaram o valor de 78.6% para a Função Geral, 94.5% para o volume ocupado, 23.1% do valor admitido, 4.6% do peso permitido e 139.3% de equilíbrio alcançado.

O programa foi executado em menos de 3 min, e o padrão de carregamento resultante é este:
Corpo Principal: 66 caixas entre os tipos E, F e G.
Espaço Lateral Residual: não foi possível preenchê-lo, espaço de sobra desprezível.
Espaço Superior Residual: 24 caixas do tipo A.
Espaço Frontal Residual: 16 caixas do tipo B.
Com o vetor auxiliar trazendo a posição de cada caixa com estes valores:
Corpo Principal: 4.
Espaço Lateral Residual: não foi possível preenchê-lo, espaço de sobra desprezível.
Espaço Superior Residual: 3.
Espaço Frontal Residual: 3.

CONCLUSÕES

Como observado a heurística proposta demonstrou ser uma técnica eficiente para o problema de carregamento de container, ocupando o espaço disponível quase em seu total.

Os resultados obtidos são altamente satisfatórios, tendo em vista que na literatura encontram-se resultados inferiores aos aqui apresentados.

A heurística proposta se mostrou flexível ao se adaptar ao problema específico estudado, trabalhando de maneira aceitável tanto com grupos de caixas homogêneas quanto heterogêneas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BELOV, G.; SCHEITHAUER, G. **A cutting plane algorithm for the one-dimensional cutting stock problem with multiple stock lengths.** European Journal of Operational Research 141, pp 274-294, 2002.

BISCHOFF, E. E.; MARRIOTT, M. D. **A comparative evaluation of heuristics for container loading**. European Journal of Operational Research, North-Holland, pp 267-276, 1990.

BORTFELDT, A.; GEHRING, H. **A hybrid genetic algorithm for the container loading problem.** European Journal of Operational Research, North-Holland, pp 143-161, 2001.

DÍAZ, A.; GLOVER, F.; HASSAN M.; GHAZIRI, J. L. G.; LAGUNA, M.; MOSCATO, P.; TSENG, F. T. **Optimización Heurística y Redes Neuronales.** editora: Paraninfo, MADRID, 1996.

LAGUNA, M. **A Guide to Implementing Tabu Search.** Investigación Operativa, Vol.4, nº1 Abril 1994.

LODI, A.; MARTELLO, S.; MONACI, M. **Two-Dimensional packing problems: A survey.** European Journal of Operational Research 141, pp 241-252, 2002.

PISINGER, D. **Heuristics for the container loading problem.** European Journal of Operational Research, North-Holland, pp 382-392, 2002.

RODRIGUES, L. L. **Um Algoritmo Genético para o Problema de Carregamento de Container.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

WU, Y.; HUANG, W.; LAU, S.; WONG, C.K.; YOUNG, G. H. **An effective quasi-human based heuristic for solving the rectangle packing problem.** European Journal of Operational Research 141, pp 341-358, 2002.