

# UMA HEURÍSTICA PARA UM PROBLEMA DE CARREGAMENTO DE CAIXAS EM UM CONTÊINER COMPARTIMENTADO

**Rodolfo Ranck Jr.**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE  
rodolforanck@gmail.com.br

**Horacio Hideki Yanasse**

Universidade Federal de São Paulo – UNIFESP  
horacio.yanasse@unifesp.br

**Reinaldo Morabito**

Universidade Federal de São Carlos – UFSCAR  
morabito@ufscar.br

## RESUMO

Neste trabalho aborda-se um problema em que caixas de diferentes tipos têm de ser carregadas nos compartimentos de um contêiner para serem entregues em diferentes destinos de uma rota pré-definida. Este problema aparece, por exemplo, na distribuição de bebidas (empacotadas em “caixas”) usando caminhões com carroçarias compartimentadas. As caixas podem ser empacotadas sem um padrão específico e/ou em camadas horizontais separadas por divisórias, e deve-se atender a aspectos práticos como balanceamento de peso no contêiner, estabilidade do carregamento e resistência a empilhamento das caixas. Busca-se um empacotamento viável que reduza o remanejamento das caixas ao longo da rota. Para resolver este problema, apresenta-se um método de solução heurístico baseado na geração *a priori* de camadas horizontais, e auxiliado pela solução de modelos matemáticos simplificados do problema.

**PALAVRAS-CHAVE: Problemas de Carregamento de Contêineres. Problemas de Corte e Empacotamento. Múltiplos Compartimentos.**

## 1. Introdução

O Problema de Carregamento de Contêineres (PCC) é um problema de empacotamento tridimensional em que caixas (itens) precisam ser colocadas em contêineres observando um ou mais critérios. Na literatura, com algumas poucas exceções, os autores consideram itens retangulares e que devem ser arranjados ortogonalmente em contêineres também retangulares. Veja, por exemplo, Morabito e Arenales (1997), Lins et al. (2002), Silva e Soma (2003), Cecilio e Morabito (2004), Araujo e Armentano (2007), e Junqueira et al. (2010).

Nos PCCs, frequentemente, devem-se considerar diversos aspectos práticos de carregamento como o balanceamento de peso no contêiner, a entrega para múltiplos destinos, a estabilidade e a resistência dos itens ao empilhamento. Uma discussão recente das diversas considerações de carregamento pode ser encontrada em Bortfeldt e Wäscher (2012).

Neste trabalho investigamos um problema de carregamento de contêineres motivado de uma indústria de bebidas que precisa distribuir diariamente seus produtos a clientes. Um tipo de veículo largamente utilizado pela empresa é um caminhão que possui, em sua carroçaria, um contêiner multicompartimentado. Este tipo de contêiner é útil, por exemplo, quando se deseja aumentar a estabilidade da carga e/ou separá-la. O caminhão deve cumprir uma rota conhecida e todos os itens demandados pelos clientes dessa rota devem ser empacotados nele. Ao empacotar a carga, devem-se atender diversas restrições práticas como orientação dos itens, estabilidade do

carregamento, resistência dos itens ao empilhamento e balanceamento de peso no contêiner. Deseja-se encontrar um empacotamento viável que minimize o remanejamento dos itens no caminhão ao longo da sua rota.

## 2. Descrição do problema

Considere um veículo (ou simplesmente um contêiner) que dispõe de um conjunto de compartimentos destinados ao armazenamento da carga, e que podem ser acessados de maneira independente dos seus lados externos. Esses compartimentos são dispostos em fileiras justapostas, possuem a mesma largura e comprimento, porém podem ter alturas diferentes. Há um número variável de fileiras de compartimentos (depende do comprimento do contêiner) no lado maior do contêiner e duas fileiras de compartimentos definidas no lado menor do contêiner.

Os compartimentos e os itens são hexaedros retangulares. Os itens são rígidos, têm dimensões variadas e devem ser colocados ortogonalmente dentro dos compartimentos sem obedecer a um padrão específico e/ou em camadas horizontais. Uma camada é formada por itens de um mesmo tipo e já possui um padrão de empacotamento conhecido para a quantidade máxima de itens que ela pode conter. As camadas são separadas de outras camadas, ou itens, por uma divisória rígida que possui o comprimento e a largura de um compartimento.

O contêiner parte carregado de uma célula logística e sua rota é definida por uma sequência de *destinos* que ele deve cumprir para atender todos os clientes. A rota e as demandas de todos os clientes são conhecidas. Todos os itens demandados devem ser empacotados no contêiner e as seguintes restrições práticas devem ser contempladas:

- a) Orientação dos itens. Os itens têm orientação vertical fixa;
- b) Estabilidade dos itens. Os itens devem ser estabilizados, ao longo de toda rota, por outros itens e/ou pelas paredes presentes no contêiner;
- c) Resistência dos itens a empilhamento. Em qualquer empilhamento, um item abaixo deve ter resistência suficiente para suportar a pressão exercida nele pelos itens acima;
- d) Balanceamento de peso no contêiner. Deseja-se que o contêiner esteja balanceado, ao longo de toda a rota, nos eixos  $x$  e  $y$ . Diferentemente das restrições (a)-(c), essa restrição é fraca, ou seja, o fato do contêiner estar desbalanceado não o impede de ser utilizado para atender os clientes.

Consideramos como objetivo minimizar o remanejamento dos itens nos compartimentos do contêiner ao longo da sua rota. Um item descarregado no destino  $k'$  precisa ser remanejado em um destino  $k$  somente se ele estiver sobre itens desse destino  $k$ , com  $k' > k$ . Como as restrições (d) são fracas, também propomos penalizar os desvios de balanceamento de peso no contêiner na função objetivo.

## 3. Método de solução proposto

O método de solução proposto é uma heurística que busca empacotar os itens em camadas horizontais, separadas por divisórias, com o auxílio de modelos matemáticos. Esta seção descreve resumidamente as partes principais dessa heurística.

Consideramos dois tipos de camadas horizontais: *completas*, camadas repletas de itens de um mesmo tipo e que já possuem um padrão de empacotamento pré-definido para esses itens. Os itens na camada completa não são empilhados; e *falsas*, arranjos de itens que não possuem um padrão de empacotamento pré-definido. Os itens contidos em uma camada falsa (itens *residuais*) podem ser de tipos diferentes e não precisam seguir algum arranjo em específico (podendo, por exemplo, serem empilhados). Por questões de estabilidade, não permitimos que as camadas falsas sejam colocadas abaixo de alguma camada completa. A Figura 1 ilustra um exemplo de camada completa (a) e de camada falsa (b).

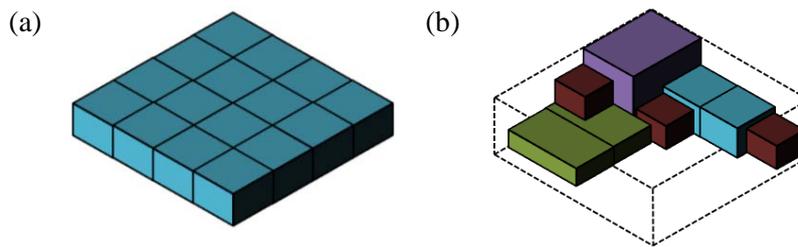


Figura 1 - Exemplo de uma camada completa (a) e falsa (b).

A heurística proposta é baseada na maneira com que a empresa, motivadora deste estudo, coloca os itens no contêiner: empacotando eles em camadas completas sempre que possível.

Inicialmente, geram-se as camadas completas atribuindo itens a elas em ordem inversa a de entrega. Desta maneira, os itens residuais, que só podem ficar no topo dos compartimentos, tendem a serem aqueles demandados nos destinos iniciais. Em seguida, tenta-se gerar as camadas falsas com um procedimento construtivo. Para isso, primeiramente, os itens residuais são ordenados de maneira inversa à ordem de entrega e, como um primeiro critério de desempate utiliza-se a ordem decrescente por altura do item. Como um segundo critério de desempate, utiliza-se a ordem decrescente por resistência a empilhamento do item. Em seguida, tenta-se empacotar todos os itens residuais sequencialmente em uma mesma camada falsa. Após essa tentativa, se ainda existirem itens residuais não empacotados, uma nova camada falsa é gerada e o processo é repetido com essa nova camada e com os itens residuais ainda não empacotados. Para tentar definir a orientação e a posição de um item residual em uma camada falsa utilizam-se duas heurísticas, que são variações das heurísticas de Tarantilis et al. (2009) adaptadas para o nosso problema:

- a) *First Fit* (FFT). As posições disponíveis na camada falsa são mantidas em uma lista em ordem lexicográfica nos eixos  $z$ ,  $y$  e  $x$ , nesta ordem. Seleciona-se a primeira posição dessa lista e tenta-se empacotar o próximo item residual nela. Caso nenhuma restrição for violada, o item é empacotado com a sua orientação atual na posição selecionada. Caso contrário, tenta-se empacotá-lo novamente na posição selecionada com a sua outra orientação possível. Caso o item ainda não tiver sido empacotado, seleciona-se a próxima posição da lista, se houver, e repete-se o procedimento para tentar empacotá-lo. Com essa heurística, tenta-se empacotar cada item residual primeiramente nas posições de altura (eixo  $z$ ) mais baixa da camada falsa, visando minimizar a altura final dessa camada;
- b) *Best Fit* (BFT). Tenta-se empacotar o próximo item residual em todas as posições disponíveis e com todas as orientações possíveis. Se houver, a combinação (posição e orientação) viável que maximizar a área de contato entre as faces laterais desse item e as faces laterais dos itens já empacotados é selecionada. Em seguida, o item é empacotado com essa combinação selecionada. Com essa heurística, busca-se favorecer um empacotamento mais compacto dos itens e, ao mesmo tempo, o empacotamento dos itens em posições mais baixas da camada.

Geradas todas as camadas, tenta-se empacotá-las nos compartimentos resolvendo um Problema de Programação Linear Inteira Mista - PPLIM (PPLI1) proposto em Ranck et al. (2013) que contempla todas as restrições e o objetivo do problema. Este problema pode ser visto como um problema de empacotamento unidimensional com restrições adicionais de empacotamento. Caso uma solução viável para este problema não possa ser obtida, aplica-se um procedimento iterativo que busca gerar um novo conjunto de camadas e, em seguida, empacotá-las resolvendo um novo problema PPLI1.

Se uma solução viável para o problema puder ser obtida, tenta-se melhorá-la por um procedimento iterativo de *busca local*, que consiste em procurar um empacotamento alternativo para os itens residuais. Com esse procedimento, tenta-se atribuir os itens residuais aos

compartimentos resolvendo-se outro PPLIM (PPLI2) e, em seguida, empacotá-los nos seus respectivos compartimentos com um procedimento construtivo similar ao utilizado na geração inicial das camadas falsas, novamente usando as heurísticas FFT e BFT.

#### 4. Resultados

Para avaliar a heurística proposta, 210 exemplares de tamanhos variados foram gerados aleatoriamente, a partir de dados realistas, por um procedimento desenvolvido para esse estudo. Consideraram-se exemplares com até 10 compartimentos e 20 destinos. Todos os PPLIMs foram resolvidos com auxílio do software IBM ILOG CPLEX versão 12.5.1. O tempo máximo permitido para a resolução de qualquer um desses problemas foi de 1200 segundos. O código das implementações foi escrito em C Sharp, compilado em uma plataforma de 64 *bits*, e executado em um computador com processador Intel Core i7-2860QM, 3.6 GHz, com 8GB de memória DDR3 SDRAM.

Ao menos uma solução foi encontrada pela heurística para todos os 210 exemplares avaliados. Em 205 destes 210 casos, uma solução pôde ser obtida com o procedimento de busca local proposto. Em 117 destes 205 casos, as soluções obtidas com esse procedimento de busca local são melhores do que as soluções iniciais (fornecidas com a resolução da formulação PPLI1). Em 107 destes 117 casos, essas soluções são melhores somente para o balanceamento de peso no contêiner, enquanto que nos 10 casos restantes elas também são melhores para o remanejamento de itens. A menor frequência de casos em que as penalizações com remanejamento dos itens são diminuídas com a busca local pode ser explicada pelo fato de os itens que são remanejados serem, na maioria dos casos, de camadas completas, que já têm suas posições definidas na solução inicial. Observe que este fato está relacionado com a estratégia da heurística em definir os itens residuais como os de destinos mais recentes e também em buscar empacotá-los, inicialmente, em um menor número de camadas. A Figura 2 apresenta um exemplo de solução para um dos exemplares avaliados em que 1818 itens, de 11 tipos e de 16 destinos, foram empacotadas em um contêiner com 8 compartimentos. Nesse exemplo, o padrão de empacotamento (arranjo dos itens) dentro de uma camada completa não é explicitado.

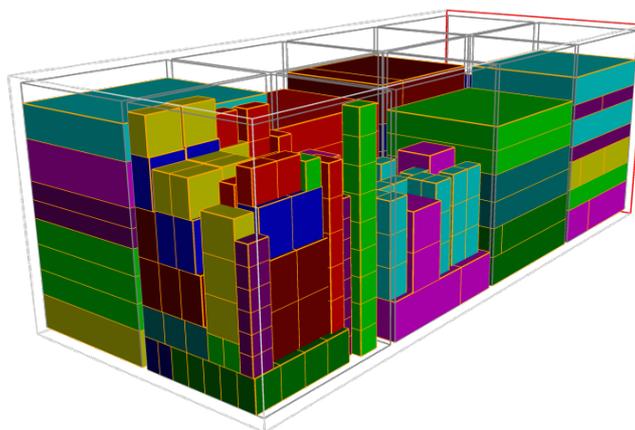


Figura 2 - Visualização de um exemplo de solução para o problema.

#### 5. Conclusões e perspectivas futuras

Apresentou-se uma heurística para a resolução de um PCC encontrado em situações reais, por exemplo, na distribuição de bebidas por meio de caminhões com carroçarias compartimentadas. Esse é um problema de empacotamento tridimensional em que diversos aspectos práticos de carregamento precisam ser atendidos ao longo de toda a rota do contêiner, características que o tornam bastante complexo. Convém salientar que esse é um primeiro estudo

focalizando um problema de carregamento em contêineres com carroçarias compartimentadas no contexto de distribuição de bebidas, e acreditamos que os modelos e a heurística desenvolvidos no estudo possam ser úteis para motivar outras pesquisas que abordem e estendam esse problema.

Uma possível extensão deste problema é avaliar outros objetivos que focalizem a redução do tempo de descarregamento dos itens ao longo da rota, como, por exemplo, buscar manter itens de um mesmo destino em menos compartimentos e/ou em compartimentos mais próximos. Outro possível estudo futuro é a integração do presente PCC com o problema de roteamento de veículos, para que as decisões de roteamento do veículo e de carregamento da carga no contêiner sejam consideradas de maneira integrada.

Os interessados em obter informações detalhadas dos desenvolvimentos abordados neste resumo, podem contatar os autores por e-mail.

**Agradecimentos:** Os autores agradecem a empresa de bebidas pela colaboração a esta pesquisa; também às agências CNPq, FAPESP e Capes pelo auxílio financeiro.

## Referências

- Araujo, O. C. B.; Armentano, V. A.** (2007). A multi-start random constructive heuristic for the container loading problem. *Pesquisa Operacional*, 27(2), 311-331.
- Bortfeldt, A.; Wäscher, G.** (2012). *Container Loading Problems - A State-of-the-Art Review*, No 120007, FEMM Working Papers, Otto-von-Guericke University Magdeburg, Faculty of Economics and Management.
- Cecilio, F. O.; Morabito, R.** (2004). Refinamentos na heurística de George e Robinson para o problema de carregamento de caixas dentro de contêineres. *Transportes*, 11(2), 32-45.
- Junqueira, L.; Morabito, R.; Yamashita, D. S.** (2010). Modelos de otimização para problemas de carregamento de contêineres com considerações de estabilidade e de empilhamento. *Pesquisa Operacional*, 30(1), 73-98.
- Lins, L.; Lins, S.; Morabito, R.** (2002). An n-tet graph approach for non-guillotine packing of n-dimensional boxes into an n-container. *European Journal of Operational Research*, 141(2), 421-439.
- Morabito, R.; Arenales, M.** (1997). Abordagens para o problema do carregamento de contêineres. *Pesquisa Operacional*, 17(1), 29-56.
- Ranck Junior, R.; Yanasse, H.; Morabito, M.** (2013). Contribuições para um problema de Carregamento de Contêiner com Múltiplos Compartimentos. *XLV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional – SBPO*, 2366-2377.
- Silva, J. L. C.; Soma, N. Y.** (2003). Um algoritmo polinomial para o problema de empacotamento de contêineres com estabilidade estática da carga. *Pesquisa O.*, 23(1), 79-98.
- Tarantilis, C. D.; Zachariadis, E. E.; Kiranoudis, C. T.** (2009). A hybrid metaheuristic algorithm for the integrated vehicle routing and three-dimensional container-loading problem. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 10(2), 255–271.