



DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO DE CONSOLIDAÇÃO BIDIMENSIONAL DE CARGA

FRANCISCO DIOGO AZEVEDO SOARES MATEUS

outubro de 2022



DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO DE CONSOLIDAÇÃO BIDIMENSIONAL DE CARGA

FRANCISCO DIOGO AZEVEDO SOARES MATEUS

Agosto de 2022

DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO DE CONSOLIDAÇÃO BIDIMENSIONAL DE CARGA

Francisco Diogo Azevedo Soares Mateus
1150471

2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO DE CONSOLIDAÇÃO BIDIMENSIONAL DE CARGA

Francisco Diogo Azevedo Soares Mateus

1150471

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor André Borges Guimarães Serra e Santos e coorientação da Doutora Marlene Ferreira de Brito.

2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutor António Manuel Pereira da Silva Amaral
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Doutor André Borges Guimarães Serra e Santos
Professor Adjunto Convidado, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Coorientador

Doutora Marlene Ferreira de Brito
Professor Adjunto Convidado, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Arguente

Doutora Maria Leonilde Rocha Varela
Professora Auxiliar, Universidade do Minho

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, Doutor André Borges Santos, por nunca me ter falhado com uma resposta ou uma opinião sincera. Estou certo de que sem a sua preciosa ajuda, a tarefa de realizar esta dissertação se dificultaria mais ainda. Fico contente pela sensação que tenho em partilhar da minha satisfação ao ter acompanhado este trabalho.

À minha coorientadora, Doutora Marlene Ferreira de Brito, por toda a sinceridade e orientação numa primeira fase mais teórica da dissertação, sem nunca deixar de contar com o seu apoio

Aos meus colegas na Justlog, em especial ao Eng^o Filipe Silva, pelo excelente ambiente laboral em que fui recebido e por nunca me terem negado qualquer ajuda ou pedido de informação mais específica.

Sem nunca esquecer todo o incentivo dos meus amigos durante toda esta jornada, agradeço-lhes as palavras de alento para nunca desistir nos dias em que os pensamentos não fluíam.

À minha família, por toda a estabilidade que sempre me proporcionou sem nunca questionar os avanços e recuos no meu caminho. Crescer assim torna-se muito mais fácil, canalizando as energias para o que era realmente importante.

À Patrícia, pelo companheirismo ao longo de um período com tantas mudanças e desafios na minha vida.

PALAVRAS-CHAVE

Container Loading Problem, Knapsack, Crise de contentores, Heurísticas de carregamento, Consolidação de carga

RESUMO

O setor dos transportes e logística onde os transitários se inserem, constitui uma vasta rede de indivíduos fulcral para um bom desempenho nos serviços prestados.

Com a pandemia da COVID-19 e os seus efeitos a assolar a economia global, verificou-se uma enorme escassez no número de contentores disponíveis face à procura do mercado, surgindo assim a necessidade de otimizar o carregamento dos equipamentos disponíveis como forma de evitar desperdícios e maximizar os proveitos em cada exportação.

O presente trabalho visa o desenvolvimento de um protótipo com recurso a heurísticas já abordadas para problemas semelhantes e assim aumentar os lucros na Justlog.

Para isso, foram criadas um conjunto de restrições que aplicadas em sinergia com o algoritmo GRG Não Linear, visam alocar as caixas em diferentes linhas consecutivas até formar uma parede, e, por conseguinte, essas paredes completarem o contentor.

No final, foram apresentados 3 casos distintos nos quais o protótipo foi colocado em prática como forma de testar a sua utilidade, entre os quais foram criadas soluções de parede cujas ocupações rondam os 80% a 90% em situações reais ou de grande heterogeneidade entre caixas.

Assim, podemos perspetivar uma grande utilidade futura deste protótipo nas tomadas de decisão relativas a serviços de consolidação de contentores, prestados pela Justlog.

KEYWORDS

Container Loading Problem, Knapsack, Container Crisis, Loading Heuristics, Cargo Consolidation

ABSTRACT

The transport and logistics sector, where freight forwarders are inserted, constitutes a vast network of individuals that is central to a good performance in the services provided.

With the COVID-19 pandemic and its effects ravaging the global economy, there was a huge shortage in the number of containers available in the face of market demand, thus creating the need to optimize the loading of available equipment to avoid waste and maximize profits from each export.

The present work aims to develop a prototype using heuristics already addressed for similar problems and thus increase profits at Justlog.

For this, a set of restrictions were created that, applied in synergy with the Non-Linear GRG algorithm, aim to allocate the boxes in different consecutive lines until forming a wall, and, therefore, the walls complete the container.

In the end, 3 different cases were presented in which the prototype was put into practice as a way of testing its usefulness, among which wall solutions were created whose occupations are around 80% to 90% in real situations or with great heterogeneity between boxes.

Thus, we can foresee a great future use of this prototype in decision-making regarding container consolidation services provided by Justlog.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

AEO-F	Operador Económico Autorizado
APAT	Associação dos Transitários de Portugal
CLP	<i>Container Loading Problem</i>
DPLP	<i>Distributor Pallet Loading Problem</i>
FCL	<i>Full Container Loading</i>
FEU	<i>Forty Foot Equivalent Unit</i>
IATA	<i>International Air Transport Association</i>
IPP	<i>Identical Item Packing Problem</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IVA	Imposto sobre o Valor Acrescentado
LCL	<i>Lot Container Loading</i>
LIFO	<i>Last In First Out</i>
MBSBPP	<i>Multiple Bin Size Bin Packing Problem</i>
MHKP	<i>Multiple Heterogeneous Knapsack Problem</i>
MHLOPP	<i>Multiple Heterogeneous Large Object Placement Problem</i>
MIKP	<i>Multiple Identical Knapsack Problem</i>
MILOPP	<i>Multiple Identical Large Object Placement Problem</i>
MPLP	<i>Manufacturer Pallet Loading Problem</i>

MSSCSP	<i>Multiple Stock-Size Cutting Stock Problem</i>
NP EN	Norma europeia
PME	Pequena e Média Empresa
RBPP	<i>Residual Bin Packing Problem</i>
RCSP	<i>Residual Cutting Stock Problem</i>
SBSBPP	<i>Single Bin-Size Packing problem</i>
SKP	<i>Single Knapsack Problem</i>
SLOPP	<i>Single Large Object Placement Problem</i>
SSSCSP	<i>Single Stock-Size Cutting Stock Problem</i>
TEU	<i>Twenty Foot Equivalent Unit</i>
VBA	<i>Visual Basic</i>

GLOSSÁRIO DE TERMOS

Crossdocking Processo de redistribuição de mercadoria, onde a mesma não chega a ser armazenada

Identical Item Packing Problem Variante dos problemas de CLP

Last In First Out Política de armazenamento que defende que os itens devem ser carregados pela ordem inversa de saída

Multiple Bin Size Bin Packing Problem Variante dos problemas de CLP

Multiple Heterogeneous Knapsack Problem Variante dos problemas de CLP

Multiple Heterogeneous Large Object Placement Problem Variante dos problemas de CLP

Multiple Identical Knapsack Problem Variante dos problemas de CLP

Multiple Identical Large Object Placement Problem Variante dos problemas de CLP

*Multiple Stock-
Size Cutting
Stock Problem* Variante dos problemas de CLP

*Residual Bin
Packing
Problem* Variante dos problemas de CLP

*Residual
Cutting Stock
Problem* Variante dos problemas de CLP

*Single Bin-Size
Packing
problem* Variante dos problemas de CLP

*Single
Knapsack
Problem* Variante dos problemas de CLP

*Single Large
Object
Placement
Problem* Variante dos problemas de CLP

*Single Stock-
Size Cutting
Stock Problem* Variante dos problemas de CLP

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Impactos das quebras nas cadeias de distribuição (Notteboom et al., 2021)	10
Figura 2 - Variação média das taxas de frete para as principais rotas segundo dados do Shanghai Container Freight Index (SCFI) entre as semanas 1 e 49 dos anos 2016 a 2020 (Notteboom et al., 2021)	12
Figura 3 - Esquema de contentor	32
Figura 4 - Esquema de Cores das Caixas	36
Figura 5 - Fluxograma do Protótipo	37
Figura 6 - Desperdício entre linhas	50
Figura 7 - Desperdício entre Paredes	51

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Problemas de Minimização de Recursos	14
Tabela 2 - Problemas de Maximização de Proveitos	15
Tabela 3 - Caixas do Problema A	38
Tabela 4 - Contentor do Problema A	39
Tabela 5 - Parede 1 (Problema A)	39
Tabela 6 - Parede 2 (Problema A)	39
Tabela 7 - Análise de Resultados do Problema A	40
Tabela 8 - Caixas do Problema B	41
Tabela 9 - Contentor do Problema B	41
Tabela 10 - Resultados Problema B	41
Tabela 11 - Análise de Resultados do Problema B	42
Tabela 12 - Caixas do Problema C	44
Tabela 13 - Contentor do Problema C	44
Tabela 14 - Resultados Problema C	44
Tabela 15 - Comparação de Soluções (Problema C)	45
Tabela 16 - Combinações (Comprimento; Largura; Altura)	50

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Enquadramento	3
1.2	Objetivos e exposição do problema	3
1.3	Apresentação da Empresa	4
1.4	Metodologia	5
1.5	Estrutura do Relatório	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1	Transporte de carga por via marítima	9
2.1.1	Benefícios e limitações	9
2.2	Crises na Indústria de Transporte de Contentores	10
2.2.1	Impactos da Crise Financeira de 2008 na Indústria de Transporte de Contentores	11
2.2.2	Crise Pandémica na Indústria de Transporte de Contentores	12
2.2.2.1	Crise de Contentores	13
2.2.2.2	Medidas Adotadas pelas Companhias	13
2.3	Problemas de Carregamento de Contentores	14
2.3.1	Definição do Problema	14
2.3.2	Restrições	16
2.3.2.1	Restrições relacionadas com o contentor	16
2.3.2.2	Restrições relacionadas com o item	17
2.3.2.3	Restrições relacionadas com a carga	19
2.3.2.4	Restrições relacionadas com o carregamento	20
2.4	Algoritmos e Heurísticas	21
2.4.1	Algoritmos exatos e aproximados	21

2.4.1.1	GRG Não Linear (Gradiente Reduzido Generalizada)	21
2.4.2	Heurísticas de carregamento.....	22
2.4.2.1	Wall Building	23
2.4.2.2	Layer Building.....	23
2.4.2.3	Sequência de carregamento	24
2.4.3	Técnicas de pesquisa	24
2.5	Modelo	24
2.5.1	Modelo MILP	25
3	DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO	31
3.1	Desenvolvimento do Protótipo	31
3.1.1	Formulação Matemática.....	32
3.1.2	Método Resolutivo	35
3.2	Aplicação do Protótipo.....	38
3.2.1	Problema A	38
3.2.1.1	Resultados do Problema A	39
3.2.2	Problema B	41
3.2.2.1	Resultados do Problema B	41
3.2.3	Problema C (Caso Real).....	44
3.2.3.1	Resultados do Problema C	44
4	CONCLUSÕES E OPORTUNIDADES DE MELHORIA	49
4.1	Conclusões	49
4.2	Limitações e Oportunidades de Melhoria.....	50
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	55

INTRODUÇÃO

- 1.1 Enquadramento
- 1.2 Objetivos e exposição do problema
- 1.3 Apresentação da Empresa
- 1.4 Metodologia
- 1.5 Estrutura do Relatório

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Num mundo dos negócios cada vez mais competitivo, fruto da globalização económica, é fulcral para o bom desempenho de qualquer organização fazer uma boa gestão dos recursos disponíveis com o objetivo de minimizar os custos associados à sua atividade.

Além do mais, com o aumento da competitividade torna-se imperativo atender, da melhor forma possível, às expectativas do cliente no que diz respeito à qualidade do produto/serviço, custo, prazos de entrega, etc.

Desta forma, é de realçar a importância da cadeia de transporte, que influenciará tanto os prazos de entrega, como os custos dos produtos a serem transportados.

1.2 Objetivos e exposição do problema

Como efeito da crise pandémica, a falta de contentores registada à escala mundial tem comprometido o setor dos transportes. Por conseguinte, é de extrema importância otimizar o espaço nos equipamentos atualmente em circulação como forma de não só amenizar as consequências dessa mesma escassez, como também, evitar a sua subutilização no combate aos desperdícios de espaço.

O carregamento de caixas num contentor ou palete constitui para Zhao et al. (2016) um dos problemas de otimização mais complexos, considerando, para além das restrições físicas relacionadas com as dimensões do contentor, todas as restrições impostas pelo mundo real, tal como a distribuição do peso, o empilhamento, a estabilidade da carga, entre outras.

Assim, o objetivo deste trabalho passa por implementar em contexto real uma ferramenta que permita uma consolidação de carga nos contentores com a maior taxa de ocupação possível.

Desta forma, é esperado que com a utilização da ferramenta de otimização desenvolvida, a entidade acolhedora tome uma maior consciência dos desperdícios, e consiga traduzir esse conhecimento numa maior rentabilidade em serviços prestados.

1.3 Apresentação da Empresa

A Justlog- Agentes Transitários Lda. é uma empresa que opera na área da logística, com 24 anos de atividade no mercado. Neste momento, presta vários tipos de serviços de apoio à importação e exportação de mercadorias, entre os quais se destacam:

- Transporte Aéreo – Membro IATA (*International Air Transport Association*) o que confere aos clientes certas regalias por intermédio dos acordos estabelecidos com companhias de aviação;
- Transporte Terrestre – Variedade de linhas regulares, com a vantagem de possuírem serviço de consolidação/desconsolidação e *crossdocking*. Para além disso, é possível oferecer ao cliente um serviço completo “porta-a-porta” e também desalfandegamento de mercadorias;
- Transporte Marítimo – Oferta de serviços para os mais variados tipos de carga, desde os mais recorrentes contentores de carga completa ou grupagem (respetivamente FCL e LCL), assim como contentores de carga refrigerada, líquidos e sólidos a granel ou até serviços personalizados para cargas de grandes dimensões;
- Armazenagem e Logística – A Justlog conta com um armazém de 1600 metros quadrados onde para além de oferecer a possibilidade de armazenagem multiclente, com áreas reservadas, controlo de stocks, separação e preparação de encomendas e as já anteriormente referidas operações de *crossdocking*. Tem o seu armazém autorizado para a importação e exportação de mercadorias e detém o estatuto de destinatário autorizado, depósito temporário concedido pela autoridade tributária. Na área da Logística, também se diferenciou a nível nacional como a única capaz de efetuar serviços de entrega de plástico granular na vertical, podendo efetuar descargas desta mercadoria;
- Entrepasto Aduaneiro – Permite aos clientes usufruir do diferimento do pagamento de direitos, IVA e outros impostos. Este regime confere vantagens a particulares e empresas que necessitem de armazenar indefinidamente mercadorias originárias de outros países. No entanto, em alguns casos, as autoridades aduaneiras podem estabelecer prazos para a aplicação do novo regime;
- Operador Económico Autorizado (AEO-F) - Certificado pelas autoridades fiscais e aduaneiras transmitindo assim segurança, estabilidade de mercado e confiança na relação com as autoridades aduaneiras. Com a mais completa certificação incluindo simplificação aduaneira, segurança e proteção, a Justlog disponibiliza

aos seus clientes uma ferramenta para facilitar o fluxo do comércio de maior segurança.

Para além disso, a empresa já foi distinguida inúmeras vezes pela sua estabilidade a nível financeiro e boas práticas laborais de onde se destacam os prémios:

- IAPMEI - PME Líder (2020, 2019, 2018, 2017, 2016, 2015) e PME Excelência (2017, 2015) – Distingue as empresas que demonstrem os melhores desempenhos e indicadores económico-financeiros e de gestão;
- APAT – Selo de Excelência (2020, 2019, 2018, 2017) – Distingue a Justlog como membro da Associação dos Transitários de Portugal, que cumpre os requisitos de aptidão para o desempenho da atividade, integridade financeira e formação dos seus ativos;
- Millenium BCP – Empresa Aplauso – Distinção, pela referida instituição bancária, da Justlog como parceiro, pela solidez financeira, capacidade de inovação e posicionamento no setor de atividade;
- Revista EXAME – 100 Melhores Empresas para Trabalhar em Portugal – Distingue as empresas com um bom clima organizacional e práticas responsáveis perante os trabalhadores e sociedade.

É de salientar também que a organização é associada da FIATA (Federação Internacional das Associações de Transitários), e possui um Sistema de Gestão da Qualidade certificado pela SGS, segundo os requisitos da norma NP EN ISO 9001:2015.

1.4 Metodologia

Para a elaboração de um processo de investigação é necessário em primeiro lugar definir qual o objetivo do mesmo e efetuar uma pesquisa baseada em fundamentos científicos que abordem temas ou questões semelhantes.

Desta forma, tomando nota do conhecimento adquirido até então na esfera científica é possível identificar quais as componentes relevantes para chegar à solução do objetivo a que se propõe a investigação.

No caso presente, foi identificada na empresa Justlog uma grande dificuldade na adjudicação de serviços de importação e exportação de carga por via marítima com recurso a contentores, dada a falta de disponibilidade dos mesmos no mercado. Deste modo, surgiu a necessidade de otimizar o espaço nos equipamentos disponíveis.

Para além da compreensão do problema através da análise do setor nos últimos 15 anos, a investigação focou-se em formas de amenizar a crise vivida por meio de ferramentas de otimização, tais como: algoritmos e heurísticas usadas previamente nas resoluções de problemas da mesma natureza.

Por fim, é feito um resumo das conclusões tiradas da revisão bibliográfica, adicionando uma visão pessoal de aspetos que podem ser melhorados no estado da arte.

1.5 Estrutura do Relatório

O presente relatório divide-se em quatro capítulos.

Inicia-se com um pequeno enquadramento do tema, seguindo-se a exposição do problema inerente e, por conseguinte, quais os objetivos a cumprir. É também apresentada a empresa onde o trabalho foi desenvolvido, concluindo o capítulo com uma descrição da metodologia e da estrutura do relatório.

No capítulo 2, é caracterizado o transporte marítimo de contentores no que diz respeito às suas vantagens e limitações sem esquecer as crises que se fizeram ou ainda fazem sentir no setor, e quais as respostas dadas pelo mesmo. De seguida fez-se uma identificação dos problemas e restrições mais comuns no carregamento de carga em contentores, terminando o capítulo abordando os tipos de algoritmos e heurísticas utilizadas na resolução deste tipo de situações.

O capítulo 3 apresenta as diferentes etapas de modelação do protótipo, a sua modelação matemática e por fim a aplicação em três casos distintos com a respetiva análise dos resultados obtidos.

Já na conclusão é sumariada a toda informação reunida até então, juntamente com algumas ilações tiradas a partir da revisão bibliográfica desenvolvida e posterior aplicação, finalizando com algumas oportunidades de melhoria.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Transporte de carga por via marítima
- 2.2 Crises na Indústria de Transporte de Contentores
- 2.3 Problemas de Carregamento de Contentores
- 2.4 Algoritmos e Heurísticas

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Transporte de carga por via marítima

O transporte por via marítima é feito com recurso a contentores, sendo estes *Twenty Foot Equivalent Unit* (TEU) ou *Forty Foot Equivalent Unit* (FEU), em grandes navios. Esta é a forma mais segura da carga efetuar longas travessias, ao contrário do que se passa no transporte rodoviário em que podem ser transportadas dentro de um atrelado em lona, ou no caso do transporte aéreo, no porão da aeronave, sem qualquer proteção externa.

Dentro do universo dos transportes marítimos, é possível identificar 2 grandes grupos:

- *Full Container Load* (FCL) - Contentor completo com carga de um só cliente;
- *Less than a Container Load* (LCL) - Contentor com cargas consolidadas de clientes diferentes.

2.1.1 Benefícios e limitações

Hege Høyer Leivestad, Elisabeth Schober (2021) afirmam que grande parte do crescimento nas trocas comerciais a nível internacional, encontrou no transporte por via marítima uma oportunidade para minimizar custos. Isso deve-se ao desenvolvimento de embarcações com capacidade para levar uma grande quantidade de contentores, aliadas a infraestruturas portuárias localizadas estrategicamente para otimizar as rotas destes navios, sendo, desta forma, possível otimizar os custos da operação e reduzir as taxas de frete dos clientes.

Contudo, Levinson (2016) sugere que devido às dimensões destes navios, estes podem ter desempenhado um papel fundamental no atual estado do mundo, ampliando os efeitos da pandemia da COVID-19, uma vez que requerem mais tempo de carga/descarga e, um eventual atraso nas rotas comprometer um maior número de cargas, fazendo alastrar esses efeitos por várias cadeias de distribuição.

Assim, concluímos que uma das maiores limitações ao nível do transporte marítimo prende-se ao facto de se tornar por vezes bastante demorado, não só pela natureza do próprio transporte, como também pelo processo lento que atravessa em cada porto (de destino ou transbordo) aquando da estiva da carga.

2.2 Crises na Indústria de Transporte de Contentores

“Uma crise coloca à prova um sistema, testando a sua resiliência e demonstrando as suas debilidades” (Notteboom et al., 2021).

A rápida expansão da pandemia provocada pelo vírus SARS-CoV-2 representou um grande impacto nas cadeias de abastecimento, uma vez que à semelhança da crise financeira de 2008, o procura dos consumidores diminuiu, tendo impacto imediato nas atividades de transporte e portuárias (Fusillo & Haralambides, 2020) (Notteboom et al., 2021). Apesar de Luke & Rodrigue (2008) considerarem que as crises económicas são eventos recorrentes, com elevado impacto nas cadeias de distribuição, uma pandemia traz consigo a agravante de não dar quaisquer sinais da sua chegada.

Ao contrário dos bens de primeira necessidade e artigos de luxo (os mais resilientes neste tipo de crises), a recessão tem um maior impacto em artigos considerados de longa duração tais como: carros, artigos eletrónicos, roupas, máquinas, etc. Esta tendência verificou-se desde a chegada da pandemia da COVID-19 (Notteboom et al., 2021).

No entanto, a problemática das quebras nas cadeias de distribuição sentida desde o início da pandemia é bem mais complexa. Uma vez que ao contrário de uma crise económica, onde os sinais de recessão vão sendo “absorvidos” pelo sistema económico durante um período mais extenso, a COVID-19 constituiu um choque com impacto em todo o sistema em simultâneo (Notteboom et al., 2021).

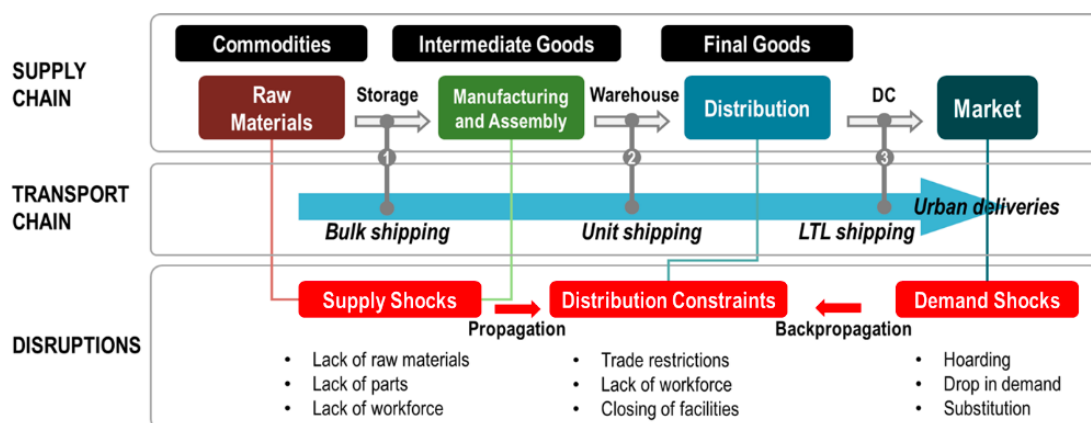


Figura 1 - Impactos das quebras nas cadeias de distribuição (Notteboom et al., 2021)

Na Figura 1 podem ser analisadas as quebras anteriormente referidas. O autor divide as quebras em três tipos distintos entre os quais:

- Quebra no fornecimento – Falta de matéria-prima, componentes ou, até mesmo, na capacidade de fabrico. Por ser a 1ª linha, consoante a preocupação prévia para a criação de stocks, esta quebra pode demorar mais ou menos tempo até ser sentida pelo consumidor final;
- Quebra na procura – Tal como foi abordado anteriormente, uma crise altera os hábitos de consumo, restringindo-os ao essencial. Dessa forma, e à exceção de equipamentos médicos e produtos farmacêuticos, todos os restantes bens de consumo sofrem um decréscimo nas vendas. Por consequência, a produção diminui, não sendo capaz de acompanhar a volatilidade do mercado, gerando períodos em que a oferta é maior do que a procura;
- Quebra na distribuição – Fatores como restrições ao nível dos recursos humanos (devido ao isolamento profilático) e encerramento de infraestruturas de distribuição, têm um forte impacto pelo facto da distribuição se tratar de um serviço e por isso depender muito dos seus ativos humanos para desempenhar as suas tarefas, comparativamente às fases de produção e até venda dos mais variados artigos.

Na falta da distribuição, toda a cadeia fica comprometida, uma vez que os fornecedores não conseguirão fazer chegar as matérias-primas aos seus clientes (entidades transformadoras) e, da mesma forma, estes não farão chegar o produto final ao consumidor.

Quanto mais fases e intervenientes houver numa determinada cadeia de distribuição, mais necessidade de transporte terão e, por conseguinte, mais comprometidas estarão as trocas comerciais.

Outro problema é o facto de a China ser um dos maiores produtores a nível mundial. Isto, aliado ao facto de o país ter sido o epicentro da pandemia, causou uma interrupção não só ao nível da produção, como também da distribuição, pelas medidas de confinamento impostas (Knowler, 2020).

Os ativos na indústria de transporte de contentores dividem-se entre equipamentos próprios ou arrendados. Para isto, é necessária uma boa gestão dos mesmos, de forma a contrabalançar a falta de flexibilidade nos horários e na capacidade dos navios que os transportam (Notteboom et al., 2021).

2.2.1 Impactos da Crise Financeira de 2008 na Indústria de Transporte de Contentores

Fusillo & Haralambides (2020) fazem referência à crise que se começou a fazer sentir no outono de 2008 como exemplo das dificuldades que as empresas de transporte de contentores enfrentaram perante uma mudança brusca das condições do mercado, causando uma sobre capacidade.

Um estudo sobre o tema já foi levado a cabo por (Notteboom et al., 2010) e (J. H. Chen et al., 2012), com o objetivo de analisar as estratégias adotadas no período que englobou a crise referida neste subcapítulo.

Os autores verificaram uma baixa rentabilidade, provocada por tarifas reduzidas, numa tentativa de incitar ao consumo num mercado que tinha uma procura inferior à oferta. No entanto, Fusillo, (2006), Graham (1998) e Notteboom (2012) consideram que o problema central desta indústria passa pelo facto de ser pouco flexível face às alterações da procura.

Mais tarde Notteboom & J.S.L. Lam (2014) verificaram que a solução que as empresas do ramo adotaram para contornar as dificuldades mencionadas, passava por utilizar estratégias e ferramentas de gestão que lhes permitissem uma maior flexibilidade e assim tornarem-se mais resilientes às ameaças de crise. Estas empresas começaram também a recorrer a soluções a nível tecnológico, como forma de criar valor nos seus negócios (Yang et al., 2019).

2.2.2 Crise Pandémica na Indústria de Transporte de Contentores

Ao instalar-se a pandemia da COVID-19 o panorama de ajustes levados a cabo pelas empresas mudou radicalmente face ao que se verificou em crises passadas.

Não só as taxas de frete não decresceram, como atingiram valores record face aos últimos cinco anos em algumas das habituais rotas, dados que podem ser analisados na Figura 2.

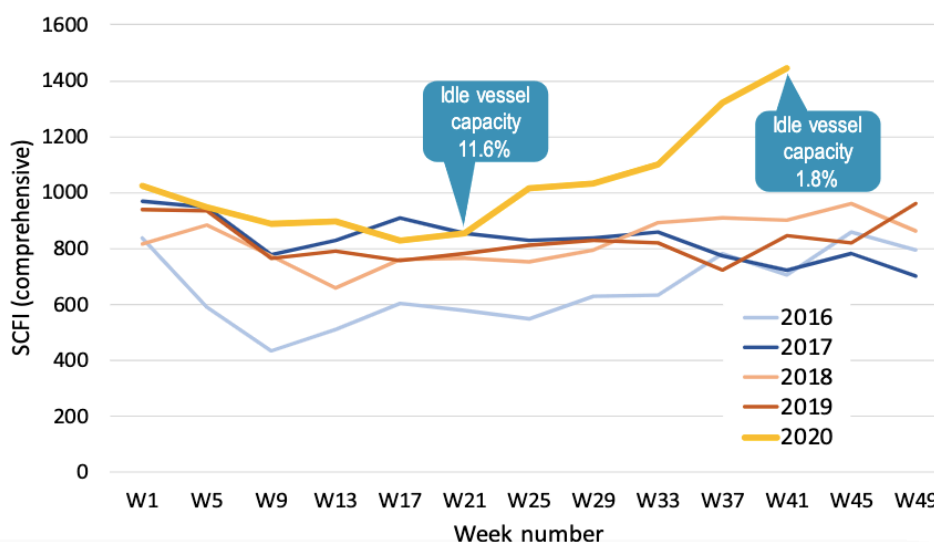


Figura 2 - Variação média das taxas de frete para as principais rotas segundo dados do Shanghai Container Freight Index (SCFI) entre as semanas 1 e 49 dos anos 2016 a 2020 (Notteboom et al., 2021)

2.2.2.1 Crise de Contentores

Apesar do bom desempenho económico das companhias em resposta à pandemia, em abril/ maio de 2020 os efeitos das restrições e confinamentos impostos na Europa e América do Norte fizeram-se refletir na produção e na consequente diminuição da procura até níveis historicamente baixos. Isto fez com que as empresas transportadoras perdessem cerca de 20% do volume total de negócio nas suas principais rotas.

Em resposta, estas companhias optaram por parar mais de 2,7 milhões de TEU de capacidade das suas frotas, o que à data equivale a cerca de 11% dos contentores à escala global. Para além disso, os navios que passaram a estar inativos representavam em maio desse ano um cancelamento de 47 em 249 viagens programadas.

Este último dado é particularmente importante pelo facto de o nº de navios ativos possuir uma relação de proporcionalidade direta com o nº de contentores que são transportados e, por conseguinte, estão disponíveis para novos serviços.

Alguns portos tiveram um cancelamento ao nível das escalas entre 20% e 50% de abril até junho de 2020 o que vai de acordo ao planeado inicialmente pelas companhias (Knowler, 2020), com uma maior incidência na rota que liga o Extremo Oriente à Europa.

Com a retoma da produção nos mercados europeus e norte-americanos em meados de 2020, provocado pelo alívio das restrições de combate à pandemia, visando o reabastecimento de stocks, as taxas de frete cobradas dispararam, uma vez que nesse período a procura era muito superior à oferta (Notteboom et al., 2021). Analisando novamente a Figura 2, é possível concluir que para além de se cobrar mais pelo serviço de transporte, também a percentagem de inatividade da frota diminuiu de 11,6% em maio de 2020 para 1,8% em outubro de 2020, aumentando assim os lucros.

2.2.2.2 Medidas Adotadas pelas Companhias

Para além da redução inevitável do número de contentores em utilização, provocada pelo cancelamento de algumas viagens programadas, outras formas das companhias otimizarem as suas frotas, não cometendo os mesmos erros da crise financeira de 2008, passam pela redução dos pedidos, ao enviar navios obsoletos para desmantelamento e (à semelhança de 2009) utilizarem, ocasionalmente, a rota do Cabo (África do Sul) em alternativa a do Canal do Suez, uma vez que para navios com menor taxa de ocupação, a rota do Cabo apresenta custos de combustível menores.

A somar às estratégias anteriores, estas empresas trouxeram novas soluções com o objetivo de diminuir o cancelamento de reservas. Foram implementados programas de apoio aos seus clientes sem possibilidades de receber as mercadorias num período de crise, com serviços de suspensão, detenção e armazenamento em trânsito, o que

permitiu a estes um ajuste das datas de entrega conforme as suas possibilidades (Notteboom et al., 2021).

2.3 Problemas de Carregamento de Contentores

Referenciados em vários artigos como *Container Loading Problems* (CLP), para Bortfeldt & Wäscher (2013) a resolução deste tipo de problemas é interpretado como um caso de alocação geométrica onde pequenos itens tridimensionais (carga) são alocados num objeto de grandes dimensões (contentores), sendo que o principal objetivo desde problema é que o padrão de carregamento encontrado permita que o maior nº de itens seja carregado de forma a preencher ao máximo o espaço do contentor, sem que esses mesmos itens se sobreponham (George & Robinson 1980; Gilmore & Gomory 1965; Huang & He 2009; Martello et al. 2000; Miyazawa & Wakabayashi 2000; Morabito & Arenalest 1994; Parreño et al. 2008, 2010; Pisinger 2002; Wang et al. 2008).

2.3.1 Definição do Problema

Partindo do pressuposto de que os contentores onde são alocados os itens, têm dimensões fixas, é possível dividir um CLP nas seguintes categorias:

- Caso o objetivo do problema passe por minimizar os recursos, ou seja, carregar todos os itens no menor número de contentores possível, Zhao et al., (2016) agrupa os diferentes casos segundo a Tabela 1.

Tabela 1 - Problemas de Minimização de Recursos

	Múltiplos Contentores Idênticos	Múltiplos Contentores Pouco Heterogéneos	Múltiplos Contentores Muito Heterogéneos
Itens heterogéneos pouco	<i>Single Stock-Size Cutting Stock Problem (SSCSP)</i>	<i>Multiple Stock-Size Cutting Stock Problem (MSSCSP)</i>	<i>Residual Cutting Stock Problem (RCSP)</i>
Itens heterogéneos muito	<i>Single Bin-Size Packing Problem (SBSBPP)</i>	<i>Multiple Bin-Size Bin Packing Problem (MBSBPP)</i>	<i>Residual Bin Packing Problem (RBPP)</i>

- No entanto, se o objetivo passar por maximizar os proveitos, alocando uma carga com um certo valor num determinado nº de contentores, o referido autor divide o problema em 7 casos distintos descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Problemas de Maximização de Proveitos

	Contentor único	Múltiplos Contentores Idênticos	Múltiplos Contentores Pouco Heterogéneos	Múltiplos Contentores Muito Heterogéneos
Itens Idênticos	<i>Identical Item Packing Problem (IIPP)</i>	-	-	-
Itens pouco heterogéneos	<i>Single Large Object Placement Problem (SLOPP)</i>	<i>Multiple Identical Large Object Placement Problem (MILOPP)</i>	<i>Multiple Heterogenous Large Object Placement Problem (MHLOPP)</i>	
Itens muito heterogéneos	<i>Single Knapsack Problem (SKP)</i>	<i>Multiple Identical Knapsack Problem (MIKP)</i>	<i>Multiple Heterogeneous Knapsack Problem (MHKP)</i>	

Junqueira et al. (2012) define os problemas de Knapsack como situações onde um contentor de dimensões fixas irá ser carregado com itens que têm associados um valor e uma dimensão, e assim o objetivo passa por maximizar o valor de itens carregados no contentor.

Este problema foi também estudado por outros autores como por exemplo Bischoff & Ratcliff (1995), Chien & Deng (2004), Davies & Bischoff (1999), Eley (2002), George & Robinson (1980), Huang & He (2009), Martello et al. (2000), Morabito & Arenalest (1994), Moura & Oliveira (2005) e Pisinger (2002), Wang et al. (2008) em que os mesmos

referem que o Knapsack, pode ainda ser visto como um problema de carregamento de paletes onde:

- *Manufacturer's Pallet Loading Problem* (MPLP) quando todos os itens têm as mesmas dimensões;
- *Distributor's Pallet Loading Problem* (DPLP) quando existem vários tipos de itens.

2.3.2 Restrições

Zhao et al., (2016) identifica à partida 3 premissas que devem ser cumpridas, seja qual for o tipo do problema, sendo elas:

- Os itens só podem ser posicionados com as suas extremidades paralelas às paredes do contentor;
- Todos os itens devem ser colocados dentro do contentor;
- Os itens não se podem sobrepor/intersestar.

Cumprindo estas regras, Bortfeldt & Wäscher (2013), dividem as restrições no CLP em 5 categorias, entre as quais:

- Restrições relacionadas com o contentor;
- Restrições relacionadas com o item;
- Restrições relacionadas com a carga (conjunto dos itens).
- Restrições relacionadas com o carregamento
- Restrições de posição

Uma vez que nesta última, assim como é referido pelos autores, se trata a posição relativa entre cargas tendo em conta a política *Last-In-First-Out* (LIFO), esta restrição não será abordada de forma tão aprofundada. Trata-se “apenas” da preocupação em carregar os itens (com diferentes destinos ao longo da mesma rota) por uma ordem que permita otimizar os tempos de carga e descarga dos contentores, segundo Bischoff & Ratcliff (1995), Lai et al. (1998) e Ren et al. (2011).

2.3.2.1 Restrições relacionadas com o contentor

Limites de Peso

Qualquer contentor tem um limite de peso associado, o qual deve ser respeitado. No entanto, apesar de algumas cargas não excederem o limite, por apresentarem uma densidade mais baixa, há casos em que os limites de peso se tornam mais restritivos do que o próprio espaço (Bortfeldt & Wäscher, 2013).

Os autores defendem que limitações de peso devem ser modeladas com restrições de *knapsack* lineares onde a soma de todas as cargas deve ser inferior ao peso máximo permitido pelo contentor.

Para Gehring (1997), Liu et al. (2011) e Terno et al. (2000), estas são *hard constraints*.

Restrições relacionadas com a distribuição do peso

Este tipo de restrição visa a distribuição uniforme do peso da carga pelo chão do contentor.

Bortfeldt & Wäscher (2013) e Zhao et al. (2016) afirmam que essa medida garante uma maior segurança no manuseamento dos equipamentos, reduzindo o risco de alterações dos centros de massa nos mesmos.

Bischoff & Ratcliff, (1995) fazem referência a este constrangimento e afirmando que em certos casos as cargas mal distribuídas podem impossibilitar algumas operações a que os contentores estão sujeitos no transporte.

De forma a garantir uma melhor distribuição do peso, Balakirsky et al. (2010), Davies & Bischoff (1999), Gehring et al. (1990), Techanitisawad & Tangwiwatwong (2004) afirmam que o centro de gravidade do mesmo deve estar junto do centro geométrico do chão do contentor, ou não exceder mais do que uma determinada distância do mesmo (Bortfeldt and Gehring (2001), Gehring (1997), Liu et al. (2011) e Sciomachen & Tanfani (2007)).

Para Bortfeldt and Wäscher (2013) esta é considerada uma *soft constraint*.

2.3.2.2 Restrições relacionadas com o item

Prioridade no Carregamento

Antes de mais é importante realçar que este tipo de restrição só é válida em problemas cujo objetivo é a maximização dos proveitos.

Bortfeldt and Wäscher (2013) referem que nos casos em que não é possível alocar todos os itens num contentor, o processo de carregamento passa por uma tomada de decisão entre quais os itens que devem ser transportados, e quais ficam de fora, uma vez que na realidade há cargas que, quer por prazos de entrega ou, validade dos produtos se tornam prioritárias.

Deste modo, o autor considera esta uma *hard constraint*.

Ainda Bischoff and Ratcliff (1995) abordam dividem esta condicionante em prioridades

- Absolutas - Onde nenhum item de “não prioritário” deve ser transportado se isso implicar deixar para trás uma carga prioritária;
- Relativas - Comparando as prioridades de um item em relação a outro para auxiliar na tomada de decisão.

Restrições na orientação

No que à orientação dos itens diz respeito, as opiniões dividem-se. Enquanto Egeblad and Pisinger (2009), Gehring (1997) e Wang et al. (2008) defendem uma rotação livre dos itens, para Chien and Deng (2004), Haessler and Brian Talbot (1990) fará mais sentido uma orientação vertical fixa, permitindo a rotação horizontal.

No entanto, autores como Morabito and Arenalest (1994); Scheithauer (1992) não permitem qualquer rotação entre as cargas.

Para Bortfeldt and Wäscher (2013), qualquer item tem 3 orientações verticais distintas. Definindo a orientação vertical, e tendo em conta que apenas estamos a considerar padrões de carregamento ortogonais, sobram 2 orientações horizontais relativamente às paredes do contentor.

Assim, o autor explica que são possíveis 6 orientações diferentes para um determinado item ($3 \times 2 = 6$) ainda que nem todas sejam válidas, uma vez que algumas caixas contêm limitações ao nível da orientação vertical com recurso a setas e mensagens que assim o sugiram, ou então porque algumas dimensões são tão reduzidas que não seria sensato usar essa mesma face para suportar a mercadoria de uma forma estável.

Restrições no empilhamento

Esta condicionante surge acima de tudo como forma de ao evitar danos nos itens,

proteger os bens transportados.

Em Bortfeldt and Wäscher (2013) e Zhao et al. (2016), este constrangimento faz referência à forma como as cargas são carregadas umas em cima das outras tendo em conta a forma como os itens irão resistir ao peso sobreposto sobre eles. Esta condicionante surge como forma de ao evitar danos nos itens, protegendo os bens transportados.

No entanto, para (Bischoff & Ratcliff, 1995) esta limitação é muito mais complexa do que apenas o peso máximo por unidade de área aplicado, referindo a importância das paredes laterais e a pressão exercida nas bordas como uma medida mais adequada, uma vez que, para o autor, esse é a zona do item mais importante para resistir às cargas do empilhamento.

2.3.2.3 Restrições relacionadas com a carga

Restrições em carregamentos completos

Os problemas de maximização dos proveitos exigem que a carga esteja bem-acondicionada, no entanto como já foi abordado anteriormente em 2.3.2.2, não havendo mais espaço disponível, alguns itens terão de ser deixados de parte.

É precisamente nessa tomada de decisão que entra esta condicionante abordada por Bischoff and Ratcliff (1995) e Bortfeldt and Wäscher (2013), onde os autores defendem que nos casos em que uma carga está por exemplo dividida em vários módulos e um desses módulos é carregado, então todos os restantes itens referentes a essa carga devem ser também alocados no mesmo envio (não necessariamente no mesmo contentor).

Restrições de alocação

Esta condicionante é apenas considerada em problemas com mais do que um contentor. Para (Liu et al., 2011), em parte é semelhante à restrição apresentada em 2.3.2.3, nos casos em que o cliente tem vários pedidos e deseja recebê-los em simultâneo (distribuídos por contentores despachados no mesmo envio).

Por outro lado, Eley (2003) faz referência às categorias de produtos que não devem ser misturados no mesmo contentor para garantir o estado de conservação de ambas as cargas (por exemplo: perfumes e alimentos)

2.3.2.4 Restrições relacionadas com o carregamento

Restrições de estabilidade

Considerada uma das restrições mais importantes, além das condicionantes da utilização do espaço, para Bischoff (1991), Eley (2002), Moura and Oliveira (2005) e Parreño et al. (2010).

Segundo Bortfeldt and Wäscher (2013), uma carga mal-acondicionada traduz-se frequentemente em danos para a mesma e acidentes pessoais, não só para quem a carrega/descarrega, como também para quem a transporte.

Zhao et al. (2016) faz referência ao uso de cintas e airbags entre caixas e até mesmo junto às paredes do contentor, o que apesar de não ser o desejável e se tornar dispendioso, é uma prática frequente na indústria.

Para garantir a estabilidade de uma carga, Gehring (1997) defende que se deve garantir um suporte total nas bases dos itens, enquanto (Parreño et al., 2008, 2010) admite apenas um suporte parcial, definindo uma saliência máxima entre caixas.

Restrições de complexidade

Com o avançar das tecnologias mecânicas e automáticas de carregamento, é possível gerar padrões cada vez mais elaborados e eficientes.

No entanto, Bortfeldt & Wäscher (2013) relembram que nem sempre é possível fazer uso desses mesmos avanços tecnológicos pelo que em muitas das soluções de carregamento mais complexas, não são de fácil compreensão para os trabalhadores responsáveis.

Assim, estes tipos de padrões revelam-se dispendiosos a nível de tempo e não tão bem-sucedidos nos carregamentos unicamente desempenhados pelo Homem.

2.4 Algoritmos e Heurísticas

2.4.1 Algoritmos exatos e aproximados

Bortfeldt & Wäscher (2013) afirma que problemas multidimensionais como o que abordamos para o carregamento de contentores são considerados do tipo *NP-hard*, o que conseqüentemente impede que se chegue a uma solução exata em tempo útil para as instâncias de maior dimensão.

Ainda assim, alguns autores conseguiram desenvolver algoritmos que permitiam a resolução de uma série de instâncias, como é o caso de Martello et al. (2000).

Nesse caso, através de um algoritmo *Branch and Bound* (usados para problemas de otimização combinatória) o autor elaborou uma solução adequada para problemas de SKP, assumindo que a orientação de todos os itens seria fixa, e não tendo em consideração qualquer restrição. Possibilitava a resolução de problemas até noventa itens, mas para uma solução exata com recurso a essa ferramenta, apenas deveria considerar um máximo de vinte caixas.

Já em algoritmos aproximados, ainda que possam não apresentar a solução ótima, conseguem devolver um resultado de qualidade em pouco tempo computacional.

Estes algoritmos inicialmente desenvolvidos por Miyazawa & Wakabayashi (2000, 2007, 2009) para problemas de SSSBPP em que consideravam uma orientação fixa. O algoritmo foi mais tarde melhorado, pelos mesmos autores, para permitir a rotação livre de itens.

No entanto Bortfeldt & Wäscher (2013) notam que ainda nenhum algoritmo aproximado inclui quaisquer restrições para além das relativas à orientação.

2.4.1.1 GRG Não Linear (*Gradiente Reduzido Generalizada*)

O método GRG, começou segundo P. Wolfe (1963) a ser utilizado para resolver problemas não lineares com restrições lineares, integrando um grupo de métodos numéricos que têm como objetivo resolver problemas de otimização (Carpentier, 1979; Rudd et al., 2017). É até considerado uma extensão dos métodos de programação linear (Sancibrian, 2011).

Neste método são gerados pontos sucessivos na direção do gradiente da função, sendo a operação interrompida aquando da chegada ao ponto onde o gradiente é nulo, ou seja, a diferença entre dois pontos sucessivos ser zero ou próxima desse valor.

Quanto menor for o valor do gradiente para o qual o método é interrompido, mais qualidade terá a solução obtida uma vez que terão sido postas à prova um maior número de combinações diferentes.

2.4.2 Heurísticas de carregamento

Apesar do já reconhecido desenvolvimento dos algoritmos exatos e aproximados, Bortfeldt & Wäscher (2013) não deixam de atribuir o destaque aos algoritmos heurísticos como os mais importantes na resolução de problemas de carregamento de contentores, uma vez que estes algoritmos são os únicos que combinam uma qualidade razoável, com tempos de computação aceitáveis, em problemas com características e restrições reais.

Y. H. Huang et al. (2016) refere que no desenvolvimento de uma heurística de carregamento são gerados, por intermédio de um processo iterativo, padrões que permitam a alocação de todas as caixas pretendidas no contentor.

Qualquer solução heurística tem por trás uma tomada de decisão para a colocação das caixas, quer seja esta parte da solução ou apenas uma solução inicial segundo Zhao et al. (2016).

Para o caso específico do carregamento em contentores as abordagens são distintas dependendo da heterogeneidade da carga, sendo que para uma mistura de caixas:

- Pouco heterogéneas- é possível utilizar uma construção em parede (*Wall Building*) ou em camada (*Layer Building*);
- Muito heterogéneas- cada caixa deve ser colocada individualmente.

Para além da decisão relativamente à forma como a carga é carregada, é ainda necessário decidir que caixa é carregada de seguida. No auxílio a esta tomada de decisão existem também as seguintes abordagens:

- *Predetermined ordering* – A ordem é estabelecida de acordo com parâmetros como o volume da caixa, nº de caixas ou uma dimensão específica;
- *Dynamic Sorting* – Tem em conta o espaço disponível após o carregamento de uma caixa (daí ser dinâmico), volume das restantes caixas do mesmo tipo e chão disponível.

2.4.2.1 *Wall Building*

Este tipo de esquemas consiste na construção de um certo nº de paredes ao longo do comprimento do contentor, onde à medida que o mesmo vai sendo preenchido, são consideradas restrições como por exemplo a distribuição do peso.

Na construção das ditas “paredes” Zhao et al. (2016) refere que é escolhida uma caixa que não seja nem exageradamente larga nem estreita respeitando o critério de escolha:

1. em primeiro lugar, da caixa cuja menor dimensão é a maior entre todas as restantes caixas;
2. Em caso de empate, é escolhida entre esses tipos de caixa, a que estiver em maior quantidade;
3. Caixa cuja maior dimensão, é também a maior dimensão perante as restantes;
4. Caso tenha sido carregada alguma caixa de um determinado tipo, é dada a preferência a esse tipo de caixas.

Se no final, o comprimento do contentor já não for “profundo” o suficiente para a carga restante, então deixam de existir as restrições impostas por este método procedendo-se para um carregamento livre das restantes caixas.

Os pioneiros deste método foram George & Robinson (1980), onde conseguiram resolver um problema baseado num exemplo real da indústria com oitocentas caixas de vinte tipos distintos.

2.4.2.2 *Layer Building*

Apesar de não ser tão recorrentemente utilizada entre os investigadores, o carregamento de caixas por camadas, desde o chão até ser atingido o limite imposto pela altura máxima do contentor, é considerada por Zhao et al. (2016) uma heurística de carregamento comum.

Os autores afirmam que cada camada não deve conter mais do que 2 tipos de caixa diferentes, sendo que a seleção desse mesmo tipo e a orientação atribuída ao mesmo deve ser escolhido mediante a superfície de carregamento em causa.

A intenção de Bischoff & Ratcliff (1995) com a criação desta nova abordagem, passava por colmatar algumas falhas ao nível da estabilidade criadas por grandes alturas ou até lacunas nas paredes criadas pela heurística estudada em 2.4.2.1.

2.4.2.3 Sequência de carregamento

A sequência pela qual a carga é colocada no contentor, pode em muitos casos desempenhar um papel crítico nas heurísticas de carregamento, estando ambas interligadas. Prova disso mesmo é o facto de segundo Zhao et al. (2016), se verificarem alterações nessas mesmas sequências aquando de modificações nas heurísticas de carregamento.

As sequências são assim categorizadas da seguinte forma:

- Estáticas - ordem fixa de caixas antes do início do carregamento
- Dinâmicas - critério ou conjuntos de critérios que define qual a próxima caixa a ser alocada durante o processo de carregamento

2.4.3 Técnicas de pesquisa

Ao contrário das heurísticas construtivas, que visam encontrar uma solução de qualidade razoável o mais rapidamente possível, ao ampliar a procura por espaço através técnicas de pesquisa, pode até trazer ganhos significativos, uma vez que o leque de soluções constituído por movimentações nas vizinhanças (das estruturas mais simples às mais complexas) é tido em consideração.

Como resultado, as técnicas de pesquisa “abrem” lugares sujeitos a aplicação da pesquisa local ou de meta-heurísticas para melhorarem a solução.

2.5 Modelo

Os problemas de carregamento de cargas já são estudados há vários anos, apesar de tomarem agora uma maior relevância com as subidas dos preços associados ao transporte.

Estes modelos podem ser divididos em 2 grupos diferentes:

- Carregamento bidimensional de paletes – desenvolvido por Hodgson (1982), cujo objetivo era através do uso de heurísticas e programação dinâmica utilizar o menor nº de paletes para uma determinada quantidade de caixas.
- Carregamento tridimensional de caixas num contentor de volume fixo – desenvolvido por George & Robinson (1980) com o objetivo de estudar de que forma as diferentes sequências e posições determinariam a quantidade de caixas alocadas.

Com o passar dos anos foram sendo concebidos variadíssimos modelos para este problema, selecionando até o nº de contentores necessário para uma determinada quantidade de caixas (C. S. Chen et al., 1995).

Tsai & Li (2006) partindo do modelo MILP (*Mixed Integer Linear Programming*) desenvolvido por C. S. Chen et al. (1995) para 3DCLP (*3D Container Loading Problems*) e adaptaram-no tornando-o num MINLP (*Mixed Integer Nonlinear Programming*) cujo objetivo era alocar uma determinada quantidade de caixas no menor volume possível.

Posteriormente, Tsai et al. (2015) converteu o MINLP original em um MILP com uma técnica de linearização por partes aprimorada usando menos variáveis e restrições binárias extra, para aumentar a eficiência na resolução.

Outras formulações para o problema em questão, com diferentes restrições e critérios de otimização, podem ser encontradas em Alvelos et al. (2009, 2014), Alves & Valério de Carvalho (2007), CHAN et al. (2011), Valério De Carvalho (1999), Valério de Carvalho (2002).

2.5.1 Modelo MILP

O modelo apresentado por Y. H. Huang et al. (2016) parte do princípio que n caixas retangulares não uniformes com um determinado comprimento, largura e altura serão alocadas num contentor cujo comprimento, largura e altura são respetivamente x, y e z .

Recorrendo à notação usada por C. S. Chen et al. (1995), Tsai et al. (2015), Tsai & Li (2006):

n – Número total de caixas a serem carregadas

$N - N = \{1, 2, \dots, n\}$

$M - M = \text{máximo}\{\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}\}$ sendo que \bar{x} , \bar{y} e \bar{z} são os limites de comprimento, largura e altura do contentor respetivamente

(p_i, q_i, r_i) – Indicam o comprimento, largura e altura da caixa i , respetivamente

(x_i, y_i, z_i) – Variáveis referentes às coordenadas do canto inferior esquerdo, da face frontal da caixa i

(l_{xi}, l_{yi}, l_{zi}) – Variável binária que indica qual dos eixos (x, y ou z) estabelece uma relação de paralelismo com o comprimento da caixa i

(w_{xi}, w_{yi}, w_{zi}) – Variável binária que indica qual dos eixos (x , y ou z) estabelece uma relação de paralelismo com a largura da caixa i

(h_{xi}, h_{yi}, h_{zi}) – Variável binária que indica qual dos eixos (x , y ou z) estabelece uma relação de paralelismo com a altura da caixa i

$(\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \delta_{ij})$ – Variável binária que estabelece a posição relativa entre as caixas i e j , como por exemplo

$(\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \delta_{ij}) = (0, 0, 1)$ se a caixa i está à esquerda da caixa j ;

$(\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \delta_{ij}) = (0, 1, 0)$ se a caixa i está à direita da caixa j ;

$(\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \delta_{ij}) = (1, 0, 0)$ se a caixa i está atrás da caixa j ;

$(\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \delta_{ij}) = (0, 1, 1)$ se a caixa i está à frente da caixa j ;

$(\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \delta_{ij}) = (1, 0, 1)$ se a caixa i está por baixo da caixa j ;

$(\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \delta_{ij}) = (1, 1, 0)$ se a caixa i está por cima da caixa j ;

A função objetivo passa por minimizar o comprimento do espaço necessário no contentor para o posicionamento de todas as caixas.

Min x

Equação 1

As restrições 2 a 8 garantem que as caixas são carregadas sem sobreposições entre as mesmas

$$x_i + p_i l_{xi} + q_i w_{xi} + r_i h_{xi} \leq x_j + M(1 + \alpha_{ij} + \beta_{ij} - \delta_{ij}), \forall i, j \in N, i < j$$

Equação 2

$$x_j + p_j l_{xj} + q_j w_{xj} + r_j h_{xj} \leq x_i + M(1 + \alpha_{ij} - \beta_{ij} + \delta_{ij}), \forall i, j \in N, i < j$$

Equação 3

$$y_i + p_i l_{yi} + q_i w_{yi} + r_i h_{yi} \leq y_j + M(1 - \alpha_{ij} + \beta_{ij} + \delta_{ij}), \forall i, j \in N, i < j$$

Equação 4

$$y_j + p_j l_{yj} + q_j w_{yj} + r_j h_{yj} \leq y_i + M(2 + \alpha_{ij} - \beta_{ij} - \delta_{ij}), \forall i, j \in N, i < j$$

Equação 5

$$z_i + p_i l_{zi} + q_i w_{zi} + r_i h_{zi} \leq z_j + M(2 - \alpha_{ij} + \beta_{ij} - \delta_{ij}), \forall i, j \in N, i < j$$

Equação 6

$$z_j + p_j l_{zj} + q_j w_{zj} + r_j h_{zj} \leq z_i + M(2 - \alpha_{ij} - \beta_{ij} + \delta_{ij}), \forall i, j \in N, i < j$$

Equação 7

$$1 \leq \alpha_{ij} + \beta_{ij} + \delta_{ij} \leq 2, \forall i, j \in N, i < j$$

Equação 8

As restrições 9 a 11 têm como papel principal limitar o posicionamento no interior do contentor

$$x_i + p_i l_{xi} + q_i w_{xi} + r_i h_{xi} \leq x, \forall i \in N$$

Equação 9

$$y_i + p_i l_{yi} + q_i w_{yi} + r_i h_{yi} \leq y, \forall i \in N$$

Equação 10

$$z_i + p_i l_{zi} + q_i w_{zi} + r_i h_{zi} \leq z, \forall i \in N$$

Equação 11

Já as equações 12, 13 e 14 que existe para cada comprimento, largura e altura de uma caixa i estabelece paralelismo com um dos eixos x , y e z . Da mesma forma que as equações 15, 16 e 17 fazem com que só haja uma, e apenas uma relação de paralelismo com os referidos eixos

$$l_{xi} + l_{yi} + l_{zi} = 1, \forall i \in N$$

Equação 12

$$w_{xi} + w_{yi} + w_{zi} = 1, \forall i \in N$$

Equação 13

$$h_{xi} + h_{yi} + h_{zi} = 1, \forall i \in N$$

Equação 14

$$l_{xi} + w_{xi} + h_{xi} = 1, \forall i \in N$$

Equação 15

$$l_{yi} + w_{yi} + h_{yi} = 1, \forall i \in N$$

Equação 16

$$l_{zi} + w_{zi} + h_{zi} = 1, \forall i \in N$$

Equação 17

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO

- 3.1 Desenvolvimento do Protótipo
- 3.2 Aplicação do Protótipo

3 DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO

3.1 Desenvolvimento do Protótipo

Na Justlog- Agentes Transitários Lda., empresa do ramo dos transitários tal como o próprio nome indica, tem integrados nas suas instalações 2 armazéns que totalizam 1600 metros quadrados de área disponível permitindo assim o descarregamento e consecutivo carregamento dos mais variados tipos de carga, dentro de portas.

Nos últimos anos, a Justlog tem vindo a dar preferência ao carregamento de contentores no formato FCL (contentores completos) ao invés dos serviços de grupagem (LCL), uma vez que os mesmos se revelavam demasiado complexos para o proveito monetário que a empresa retirava dos mesmos, já que os formatos das cargas dos diferentes clientes que são inseridas nestes contentores são muito heterogéneas entre si, sendo assim difícil chegar a uma solução ótima.

É de extrema importância o posicionamento de todas as unidades a alocar dentro do próprio contentor, uma vez que esta tomada de decisão por parte do Operacional de Armazém poderá ou não fazer com que a Justlog consiga inserir em contentores destinados a serviços de grupagem outros clientes, cujas cargas não sejam suficientes para um contentor completo e por isso requeiram um serviço de consolidação como o LCL.

Deste modo, e com o objetivo de maximizar os lucros por cada serviço, foi identificada esta necessidade de otimização com recurso a um modelo matemático que apoie as tomadas de decisão não só dos operacionais de armazém (que serão os beneficiários diretos), como também dos operacionais de exportação sendo estes responsáveis pela adjudicação de serviços por cada contentor.

3.1.1 Formulação Matemática

Como na Justlog se efetua o carregamento recorrendo a técnicas de *Wall Building* o protótipo desenvolvido fará a otimização da “parede” do contentor, onde as caixas serão posicionadas linha a linha (dentro da largura disponível) até não ser possível alocar uma nova linha devido ao limite imposto pela altura do contentor utilizado. A orientação atribuída a um contentor é a mesma da Figura 3.

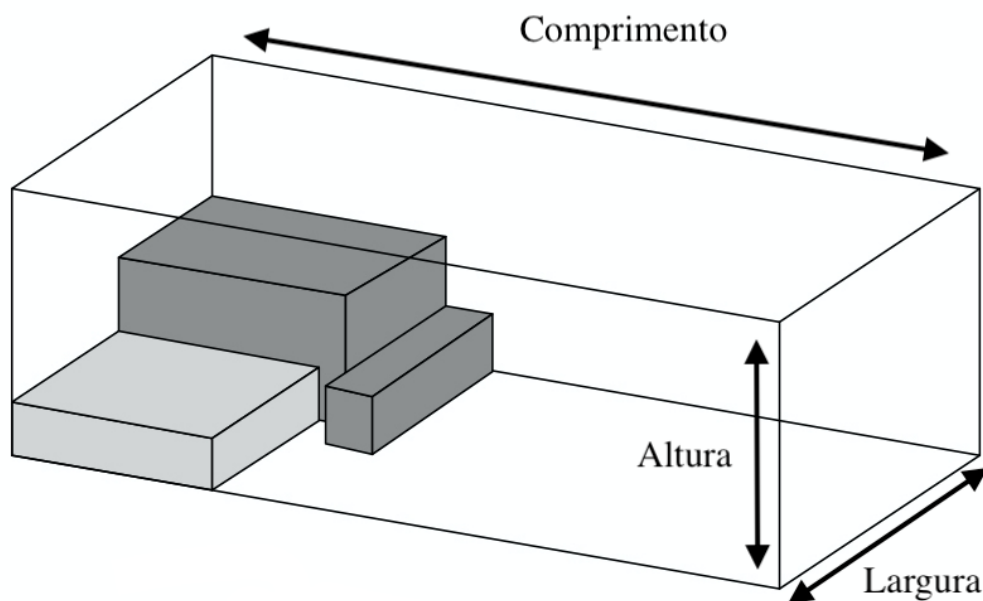


Figura 3 - Esquema de contentor

Como fatores influenciadores neste problema, fazem parte:

- Comprimento, largura e altura do contentor;
- S1, S2 e S3 – como dimensões da caixa a ser alocada, ainda sem tomar uma orientação final;
- X1, X2 e X3 – como variável que define em que face a caixa se irá apoiar;
- Comprimento, largura e altura da caixa – tendo em conta a orientação atribuída pelo modelo desenvolvido (através de X1, X2 e X3), considerando para essas mesmas dimensões, as orientações demonstradas na Figura 3;
- Altura da Linha – considera-se a maior altura registada numa caixa por cada linha;
- Área Ocupada – área ocupada por todas as caixas incluídas numa linha;
- Área Total – área total da linha cuja altura é definida pela maior altura presente;
- Área Desperdiçada – diferença entre a área da linha e a área ocupada;
- Altura Restante – diferença entre a altura do contentor e o somatório das linhas alocadas;
- Linhas por Parede – nº de linhas possíveis de alocar numa só parede;

- Paredes por Contentor – nº de paredes iguais possíveis de construir num só contentor;
- Caixas por Contentor – nº de caixas possíveis de carregar num só contentor;
- Área da Parede – total de área ocupada pelas linhas de uma parede;
- Altura Ocupada – percentagem de altura total ocupada pelas linhas de uma parede;
- Largura Ocupada – percentagem de largura total ocupada pelas linhas de uma parede;
- Ocupação Total – percentagem de área ocupada por uma parede.

Sendo que destes consideramos como variáveis de decisão (binárias):

- Incluir na linha
- X1, X2 e X3

Posto isto, estabeleceram-se as seguintes restrições:

$$\Sigma \text{Largura das caixas na linha} \leq \text{Largura do Contentor}$$

Equação 18

Deste modo, somando todas as larguras por linha de caixas, o limite físico do contentor será respeitado.

$$\Sigma \text{Altura das Linhas} \leq \text{Altura do Contentor}$$

Equação 19

À semelhança da Equação 18, esta restrição irá impedir que o limite físico do contentor seja desrespeitado, neste caso em altura.

$$\text{Comprimento Caixa} = X1 \times S1 + X2 \times S3 + X3 \times S1$$

Equação 20

$$\text{Largura Caixa} = X1 \times S1 + X2 \times S3 + X3 \times S1$$

Equação 21

$$\text{Altura Caixa} = X1 \times S1 + X2 \times S3 + X3 \times S1$$

Equação 22

Uma vez que X1, X2 e X3 são variáveis binárias, para cada caixa de dimensões S1, S2 e S3 farão com que o Comprimento, Largura ou Altura de cada Caixa seja o correto segundo a orientação atribuída pelo protótipo desenvolvido.

$$X1 + X2 + X3 = 1$$

Equação 23

Como complemento às equações Equação 20, Equação 21 e Equação 22, a Equação 23 define que cada caixa só poderá tomar uma única orientação, seja ela X1, X2 ou X3.

$$\text{Área Ocupada} = \Sigma(\text{Incluir} \times \text{Altura Caixa} \times \text{Largura Caixa})$$

Equação 24

$$\text{Área Total} = \text{Maior Altura de Caixa Incluída} \times \text{Largura Contentor}$$

Equação 25

$$\text{Função Objetivo: Min Área Desperdiçada} = \text{Área Total} - \text{Área Ocupada}$$

Equação 26

Como função objetivo, estabeleceu-se a minimização das diferenças de altura entre caixas dentro da mesma linha, como forma de homogeneizar o máximo possível a superfície da mesma, garantindo um menor desperdício e uma melhor base de apoio para as unidades acima.

$$\text{Altura Restante} = \text{Altura Contentor} - \Sigma \text{Altura das Linhas}$$

Equação 27

À medida que as linhas vão sendo alocadas, a altura restante será cada vez menor.

Para a análise das soluções obtidas utilizaram-se as seguintes equações:

$$\text{Linhas por Parede} = \text{Altura do Contentor} \div \text{Altura da Linha}$$

Equação 28

$$\text{Paredes por Contentor} = \frac{\text{Comprimento do Contentor}}{\text{Comprimento das caixas na linha}}$$

Equação 29

$$\begin{aligned} \text{Caixas por Contentor} \\ = N^{\circ} \text{ de Caixas na Linha} \times \text{Linhas por Parede} \\ \times \text{Paredes por Contentor} \end{aligned}$$

Equação 30

$$\text{Área da Parede} = \text{Área Ocupada} \times \text{Linhas por Parede}$$

Equação 31

$$\text{Altura Ocupada} = \frac{(\text{Altura da Linha} \times \text{Linhas por Parede})}{\text{Altura do Contentor}}$$

Equação 32

$$\text{Largura Ocupada} = \frac{\Sigma \text{Largura da caixas da Linha}}{\text{Largura do Contentor}}$$

Equação 33

$$Ocupação\ Total = \frac{Área\ da\ Parede}{Área\ do\ Contentor}$$

Equação 34

3.1.2 Método Resolutivo

Para a resolução deste problema, o utilizador começa por selecionar na folha de cálculo qual o tipo de contentor a ser carregado diante dos formatos disponíveis, passando assim a definir:

- Largura do Contentor
- Altura do Contentor

De seguida, deverá introduzir cada dimensão das caixas a alocar nas colunas S1, S2 e S3. Por defeito o protótipo estará a considerar que por esta ordem a dimensão S1 corresponde ao comprimento, S2 à largura e por exclusão S3 à altura, tal como indicado na Figura 4.

Posto isto, correndo o protótipo no VBA através do botão “Otimizar”, será tomada uma decisão relativamente à inclusão das caixas segunda a posição tomada pelas mesmas, dentro das seguintes possibilidades:

X1=1 – Caixa apoiada sobre a Base/Topo (faces azúis)

X2=1 – Caixa apoiada sobre a Frente/Traseira (faces amarelas)

X3=1 – Caixa apoiada sobre as Laterais Esquerda/Direita (faces vermelhas)

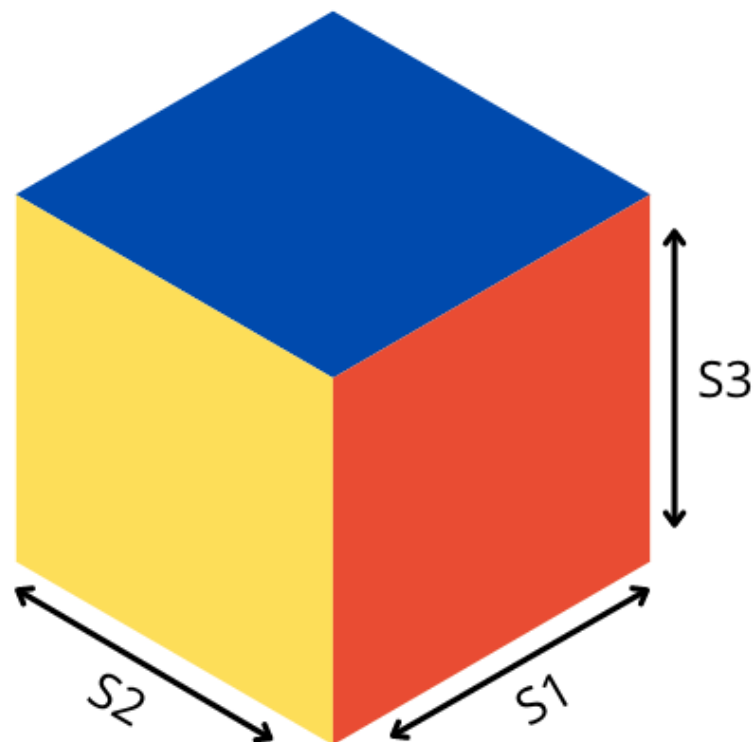


Figura 4 - Esquema de Cores das Caixas

De seguida as caixas alocadas serão transferidas, juntamente com a solução para as mesmas, para as linhas inferiores à tabela de entrada dos dados, onde é indicada a altura de cada linha de caixas (correspondente à altura da maior caixa).

O protótipo prosseguirá para uma nova tomada de decisão em busca de uma nova linha de caixas para alocar por cima das anteriores até que se verifiquem um dos seguintes cenários:

- Todas as caixas já se encontram alocadas, e por isso não é possível formar novas linhas;
- Não é possível formar uma linha cuja altura seja menor que a altura restante no contentor, tornando-se assim fisicamente impossível de incluir essa solução na parede.

Assim que se quebre este ciclo, considera-se a parede completa. Caso ainda se verifiquem caixas por alocar, basta carregar no botão “Otimizar” novamente, para começar a construir uma nova parede.

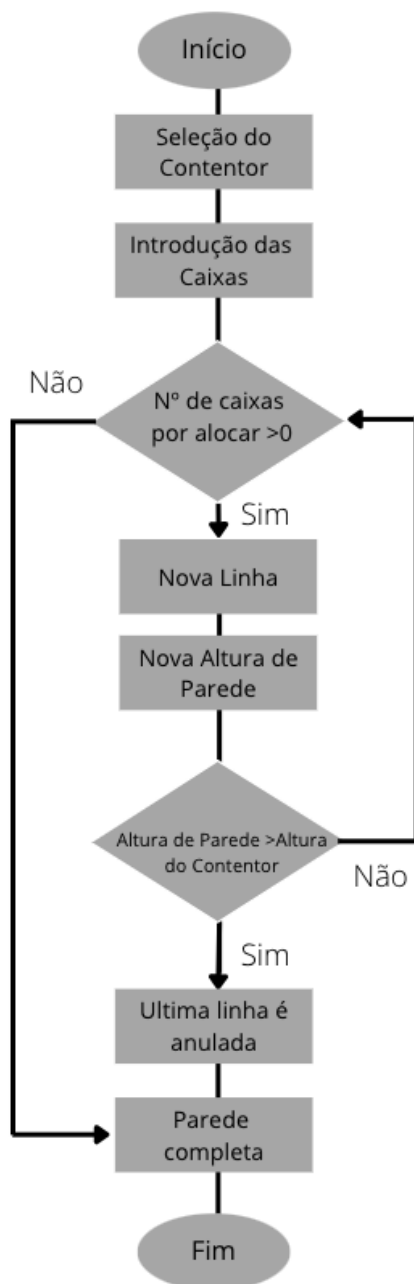


Figura 5 - Fluxograma do Protótipo

Uma vez que todas as caixas estão alocadas, antes de resolver um novo problema, o utilizador deverá carregar no botão “Reset” para apagar todas as soluções anteriores e fazer com que todas as variáveis retornem ao valor de 0.

3.2 Aplicação do Protótipo

Como forma de demonstrar as vantagens da aplicação do protótipo desenvolvido nos diferentes serviços de carregamento que a empresa oferece serão apresentados 3 problemas distintos:

- 1 serviço tipicamente LCL com caixas de dimensões diferentes, também diferentes entre si - Problema A
- 1 serviço de FCL com caixas com dimensões diferentes de comprimento, largura e altura, todas iguais entre si – Problema B
- 1 caso real de FCL com caixas todas iguais, mas com dimensões diferentes – Problema C

3.2.1 Problema A

No problema A gerou-se uma lista de 10 caixas diferentes entre si com dimensões aleatórias segundo uma distribuição uniforme (Tabela 3). Nessa mesma simulação, utilizou-se um Contentor de 40 pés *High Cube* (Tabela 4).

Tabela 3 - Caixas do Problema A

Caixa	S1 (m)	S2 (m)	S3 (m)
1	1,5	1,3	1,31
2	0,59	0,67	0,32
3	0,24	1,24	0,61
4	1,11	0,07	0,62
5	1,26	1,3	1,39
6	0,4	0,65	0,05
7	0,12	1,15	1,04
8	1,17	1,46	1,02
9	1,39	1,11	0,84
10	0,4	1,25	0,99

Tabela 4 - Contentor do Problema A

Contentor	Comprimento (m)	Largura (m)	Altura (m)
40' HC Dry	12,03	2,35	2,69

3.2.1.1 Resultados do Problema A

Após a aplicação do protótipo, este devolveu uma solução de 2 Paredes cuja constituição se encontra descrita nas tabelas Tabela 5 e Tabela 6.

Tabela 5 - Parede 1 (Problema A)

	Caixa	X1	X2	X3	Comprimento (m)	Largura (m)	Altura (m)
1ª Linha	5	0	1	0	1,39	1,3	1,26
	6	0	0	1	0,4	0,05	0,65
	10	0	0	1	0,4	0,99	1,25
2ª Linha	7	0	0	1	0,12	1,04	1,15

Tabela 6 - Parede 2 (Problema A)

	Caixa	X1	X2	X3	Comprimento (m)	Largura (m)	Altura (m)
1ª Linha	8	0	1	0	1,02	1,46	1,17
	9	0	0	1	1,39	0,84	1,11
2ª Linha	1	0	0	1	1,5	1,31	1,3

2	0	0	1	0,59	0,32	0,67
3	0	0	1	0,24	0,61	1,24
4	0	1	0	0,62	0,07	1,11

Tabela 7 - Análise de Resultados do Problema A

	Parede 1	Parede 2
Altura da Linha 1 (m)	1,26	1,17
Altura da Linha 2 (m)	1,15	1,30
Linhas por Parede	2	2
Altura Ocupada (%)	89,59%	91,82%
Largura Média (m)	1,69	2,3
Largura Ocupada (%)	71,91%	98,09%
Comprimento Médio (m)	0,58	0,89
Área da Parede (m^2)	4,104	5,39
Ocupação Total (%)	64,92%	85,30%
Paredes por Contentor	8	13

Para este problema em que se verifica uma grande heterogeneidade entre caixas, devemos olhar para a solução da “parede” como um todo, uma vez que as diferentes linhas estão dispostas para conjugarem da melhor maneira possível.

Como é lógico esta será o tipo de tarefas mais difícil em termos de combinação e por isso tanto podem existir resultados bastante satisfatórios, como outros não tão interessantes.

Na Tabela 7 é feita uma comparação entre as paredes 1 e 2, em que ambas foram compostas por 2 linhas de caixas cada uma. Apesar de nas duas paredes as percentagens de altura ocupada apresentarem valores excelentes a rondar os 90%, o mesmo já não se passa na largura ocupada. Nessa métrica, a parede 2 tem uma ocupação acima dos

98% enquanto a parede 1 não chega a ultrapassar os 72%. Em termos de ocupação de área, mais uma vez a parede 2 tem uma ocupação percentual de 85,30% o que já representa um valor bastante satisfatório, ao contrário da parede 1 com um valor não tão interessante de 64,92%.

3.2.2 Problema B

No problema B gerou-se uma lista de 20 unidades de caixas iguais entre si, cujas dimensões de S1, S2 e S3 não eram iguais tal como se pode observar na Tabela 8. O contentor utilizado para este caso foi o 40' Dry, cujas dimensões se encontram discriminadas na Tabela 9

Tabela 8 - Caixas do Problema B

Quantidade	S1 (m)	S2 (m)	S3 (m)
20 Unidades	0,6	0,4	0,2

Tabela 9 - Contentor do Problema B

Contentor	Comprimento (m)	Largura (m)	Altura (m)
40' Dry	12,035	2,35	2,393

3.2.2.1 Resultados do Problema B

Tabela 10 - Resultados Problema B

	X1	X2	X3	Comprimento (m)	Largura (m)	Altura (m)
1ª Linha	0	1	0	0,4	0,2	0,6
	0	1	0	0,4	0,2	0,6
	0	1	0	0,2	0,4	0,6
	0	1	0	0,4	0,2	0,6
	0	1	0	0,2	0,4	0,6

0	1	0	0,4	0,2	0,6	
0	1	0	0,4	0,2	0,6	
0	1	0	0,4	0,2	0,6	
2ª Linha	0	1	0,2	0,4	0,6	
0	1	0	0,2	0,4	0,6	
0	1	0	0,2	0,4	0,6	
0	1	0	0,2	0,4	0,6	
0	1	0	0,2	0,4	0,6	
0	1	0	0,2	0,4	0,6	
0	0	1	0,6	0,2	0,4	
3ª Linha	1	0	0	0,6	0,4	0,2
1	0	0	0,6	0,4	0,2	
1	0	0	0,6	0,4	0,2	
1	0	0	0,6	0,4	0,2	
1	0	0	0,6	0,4	0,2	
4ª Linha	1	0	0	0,4	0,6	0,2
1	0	0	0,4	0,6	0,2	
1	0	0	0,4	0,6	0,2	

Tabela 11 - Análise de Resultados do Problema B

	Solução 1 (1ª Linha)	Solução 2 (2ª Linha)	Solução 3 (3ª Linha)	Solução 4 (4ª Linha)
Altura da Linha (m)	0,6	0,6	0,2	0,2
Linhas por Parede	3	3	11	11

Altura Ocupada (%)	75,22%	75,22%	91,93%	91,93%
Largura da Linha (m)	2	2,2	2	1,8
Largura Ocupada (%)	85,11%	93,62%	85,11%	76,60%
Comprimento Médio (m)	0,35	0,27	0,6	0,4
Área da Parede (m ²)	3,6	3,84	4,4	3,96
Ocupação Total (%)	64,02%	68,28%	78,24%	70,42%
Paredes Contentor por	34	45	20	30
Caixas Contentor por	816	810	1100	990

Apesar do protótipo estar desenhado para otimizar uma parede em casos de LCL em que as dimensões das caixas diferem entre si, nada impede o utilizador de aplicar casos de FCL com caixas iguais. Estes problemas tornar-se-ão ainda mais válidos quando cada caixa tiver dimensões de comprimento, largura e altura diferentes, criando uma tomada de decisão importante relativamente ao padrão de carregamento.

Posto isto, no problema B surgiram 4 configurações de linha diferentes, cujas comparações estão presentes na Tabela 11.

Começando por analisar a quantidade de linhas por parede nas soluções 3 e 4 (11 linhas) face às restantes (3 linhas). Um maior nº de linhas influenciado por uma altura de linha menor, irá acabar por obter uma maior percentagem de altura ocupada (91,93% contra 75,22%).

Já na largura a configuração com maior ocupação é a 2ª (93,62%), seguida das soluções 1 e 3 (85,11%) e por fim a solução 4 (76,60%).

No que à área ocupada diz respeito, a única solução com valores acima dos 75% é a configuração 3 (78,24%), seguida da solução 4 (70,42%), 2ª linha (68,28%) e por último

a solução 1 (64,02%). Estes valores indicam que apesar de percentagens de ocupação em altura e largura bastante satisfatórias, as paredes não se encontram bem consolidadas, existindo ainda alguma área vazia entre as linhas.

Ainda assim são evidentes as diferenças no que diz respeito ao nº de caixas alocado em cada uma das configurações, mesmo quando as diferenças percentuais e análise visual da solução não faria esperar uma diferença de unidades tão avultada.

Fazendo as comparações em relação à 3ª Linha, com 1100 caixas alocadas, a 4ª solução enchia o contentor com menos 110 caixas, a 1ª configuração com menos 284 caixas e por último a 2ª solução com uma diferença de 290 unidades.

3.2.3 Problema C (Caso Real)

Neste problema, foi testado um caso real de um cliente que queria saber qual a quantidade máxima de caixas das dimensões descritas na Tabela 12, seria possível transportar num contentor de 40' *High Cube Dry*.

Tabela 12 - Caixas do Problema C

Quantidade	S1 (m)	S2 (m)	S3 (m)
?	0,61	0,61	0,16

Tabela 13 - Contentor do Problema C

Contentor	Comprimento (m)	Largura (m)	Altura (m)
40' HC Dry	12,03	2,35	2,69

3.2.3.1 Resultados do Problema C

Pela aplicação do protótipo, é possível identificar duas configurações de linhas muito distintas entre si.

Tabela 14 - Resultados Problema C

X1	X2	X3	Comprimento (m)	Largura (m)	Altura (m)
----	----	----	-----------------	-------------	------------

1ª Linha	1	0	0	0,61	0,61	0,16
	1	0	0	0,61	0,61	0,16
	1	0	0	0,61	0,61	0,16
2ª Linha	0	0	1	0,61	0,16	0,61
	0	0	1	0,61	0,16	0,61
	0	0	1	0,61	0,16	0,61
	0	0	1	0,61	0,16	0,61
	0	0	1	0,61	0,16	0,61
	0	0	1	0,61	0,16	0,61
	0	0	1	0,61	0,16	0,61
	0	1	0	0,16	0,61	0,61
	0	1	0	0,16	0,61	0,61

Tabela 15 - Comparação de Soluções (Problema C)

	Solução 1 (1ª Linha)	Solução 2 (2ª Linha)
Altura da Linha (m)	0,16	0,61
Linhas por Parede	16	4
Altura Ocupada (%)	95,17	90,71
Largura da Linha (m)	1,83	2,34
Largura Ocupada (%)	77,87	99,57
Comprimento Médio (m)	0,61	0,51
Área da Parede (m ²)	4,68	5,71
Ocupação Total (%)	74,11	90,32

Paredes por Contentor	19	23
Caixas por Contentor	912	828

No problema C, o protótipo devolveu duas soluções distintas perante o mesmo caso. Assim foi feita uma comparação entre ambas soluções de modo a encontrar a mais vantajosa para o cliente.

Através da análise, é possível observar que apesar da 2ª linha acabar por formar uma parede melhor consolidada, uma vez que apresenta uma maior percentagem de ocupação (90,32% contra 74,11%), podemos concluir que carregando as caixas com uma configuração semelhante à 1ª Linha da Tabela 14, o operador conseguiria carregar mais 84 caixas em relação aquelas que seriam alocadas pela 2ª configuração.

Esta otimização de espaço não só facilitou a tomada de decisão reduzindo os tempos improdutivos na empresa, como também aumentou a qualidade da resposta perante o cliente.

CONCLUSÕES E OPORTUNIDADES DE MELHORIA

- 4.1 Conclusões
- 4.2 Limitações e Oportunidades de Melhoria

4 CONCLUSÕES E OPORTUNIDADES DE MELHORIA

4.1 Conclusões

O avanço tecnológico aplicado às mais diferenciadas áreas veio não só elevar os padrões de qualidade dos produtos/serviços prestados, como também dar uma maior capacidade de resposta às empresas.

A Justlog no seu setor, depara-se diariamente com pedidos de cotação para os seus serviços por parte de clientes que desejam importar ou exportar itens dos mais variadíssimos tamanhos e feitios.

Antes de um serviço de exportação ser adjudicado a empresa deve informar o cliente da quantidade e tipo de contentores necessários para executar essa operação. O protótipo desenvolvido na presente dissertação pretende nessa fase uma comunicação com o cliente mais eficaz, procurando aumentar a qualidade do serviço ao ser possível simular diferentes padrões de carga em virtude de selecionar a mais vantajosa.

Todo o processo de modelação matemática e desenvolvimento do protótipo facilitará também o próprio carregamento para os operacionais do armazém ao fornecer as instruções de uma forma mais intuitiva, diminuindo a fator de erro humano e desperdícios.

Os resultados provenientes dos testes efetuados foram bastante satisfatórios, permitindo encontrar soluções com ocupação superior a 90% na área da parede num problema real, e ainda uma parede com ocupação de 85,30% composta por caixas altamente heterogéneas entre si.

Desta forma, é possível afirmar que há uma melhoria nos processos de exportação da Justlog uma vez que o trabalho desenvolvido é aplicado desde o primeiro contacto com o cliente até ao envio da mercadoria.

4.2 Limitações e Oportunidades de Melhoria

O objetivo do problema em questão é minimizar a diferença entre as alturas das diferentes caixas de uma linha, para de seguida se assumir que a maior altura corresponde à altura dessa mesma linha. No entanto, partindo da altura da linha anterior como a cota inicial de construção da nova linha, podem surgir espaços por preencher tanto maiores quanto a diferença de alturas na linha já alocada, aumentando o desperdício (Figura 6)

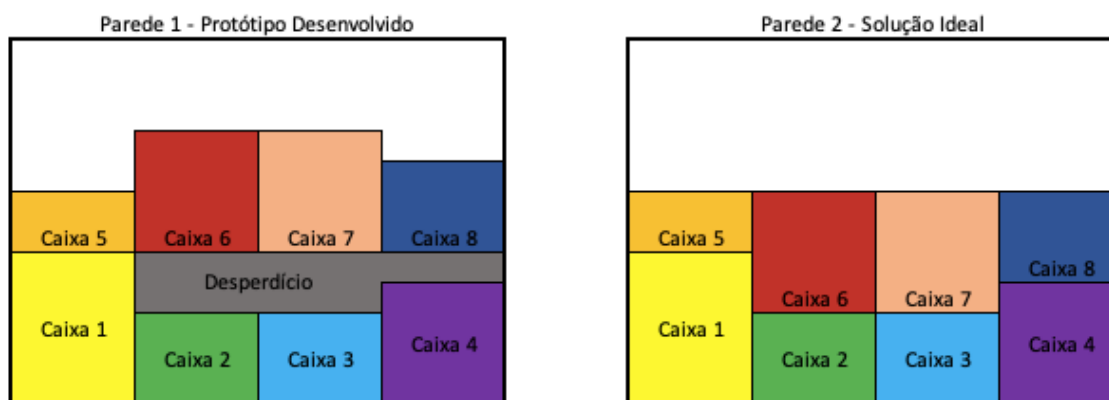


Figura 6 - Desperdício entre linhas

Outra das limitações que esta ferramenta apresenta são as rotações sobre a própria face, que estão dependentes da ordem pela qual o utilizador insere os valores de S1, S2 e S3. Supondo que os valores introduzidos são respetivamente 1, 2 e 3, podemos observar na Tabela 16 quais as combinações possíveis de Comprimento, Largura e Altura face às calculadas pelo protótipo.

Tabela 16 - Combinações (Comprimento; Largura; Altura)

Combinações Possíveis (Comprimento; Largura; Altura)		
Face de Apoio	Soluções Calculadas	Soluções Possíveis
Face Azul	(1;2;3)	(1;2;3) e (2;1;3)
Face Vermelha	(1;3;2)	(1;3;2) e (3;1;2)
Face Amarela	(3;2;1)	(3;2;1) e (2;3;1)

Por último, e como este protótipo se propõe a fazer uma otimização bidimensional (por parede), poderá haver casos em que se verifique uma disparidade entre os vários comprimentos de caixas de uma determinada parede.

Por conseguinte, e à semelhança do que se verifica no caso da Figura 6, as construções de novas paredes não terão em consideração os espaços deixados pelas anteriores, considerando assim esse espaço como desperdício. Na Figura 7 é possível comparar (numa vista superior) a diferença entre uma solução gerada pelo protótipo (Contentor 1) e outra considerada como ideal (Contentor 2) onde existe uma harmonia entre paredes.

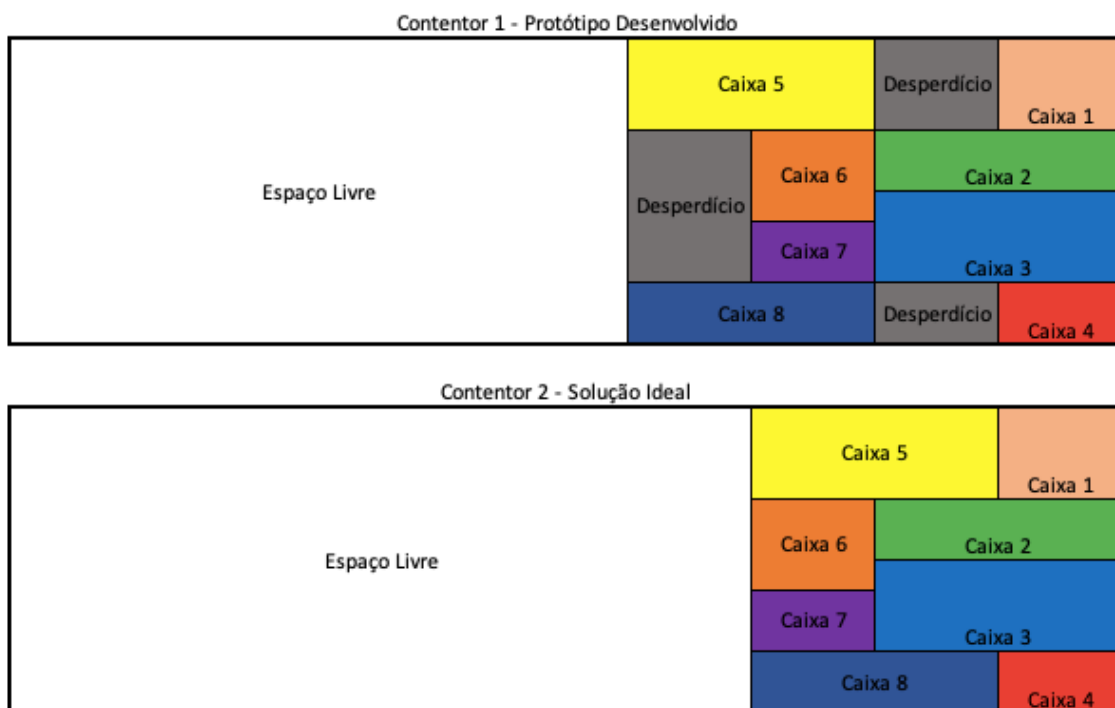


Figura 7 - Desperdício entre Paredes

Mesmo considerando as oportunidades de melhoria elencadas é possível dizer que o protótipo desenvolvido é de real utilidade para a Justlog.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- Alvelos, F., Chan, T. M., Vilaça, P., Gomes, T., Silva, E., & Valério de Carvalho, J. M. (2009). Sequence based heuristics for two-dimensional bin packing problems. *Engineering Optimization*, 41(8), 773–791. <https://doi.org/10.1080/03052150902835960>
- Alvelos, F., Silva, E., & de Carvalho, J. M. V. (2014). *A Hybrid Heuristic Based on Column Generation for Two- and Three- Stage Bin Packing Problems* (pp. 211–226). https://doi.org/10.1007/978-3-319-09129-7_16
- Alves, C., & Valério de Carvalho, J. M. (2007). Accelerating column generation for variable sized bin-packing problems. *European Journal of Operational Research*, 183(3), 1333–1352. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.07.033>
- Balakirsky, S., Proctor, F., Kramer, T., Kolhe, P., & Christensen, H. I. (2010). *Using Simulation to Assess the Effectiveness of Pallet Stacking Methods* (pp. 336–349). https://doi.org/10.1007/978-3-642-17319-6_32
- Bischoff, E. E. (1991). Stability aspects of pallet loading. *OR Spektrum*, 13(4), 189–197. <https://doi.org/10.1007/BF01719394>
- Bischoff, E. E., & Ratcliff, M. S. W. (1995). Issues in the development of approaches to container loading. *Omega*, 23(4), 377–390. [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(95\)00015-G](https://doi.org/10.1016/0305-0483(95)00015-G)
- Bortfeldt, A., & Gehring, H. (2001). A hybrid genetic algorithm for the container loading problem. *European Journal of Operational Research*, 131(1), 143–161. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00055-2](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00055-2)
- Bortfeldt, A., & Wäscher, G. (2013). Constraints in container loading-A state-of-the-art review. *European Journal of Operational Research*, 229(1), 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.12.006>
- Carpentier, J. (1979). Optimal power flows. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 1(1), 3–15. [https://doi.org/10.1016/0142-0615\(79\)90026-7](https://doi.org/10.1016/0142-0615(79)90026-7)
- CHAN, T. M., ALVELOS, F., SILVA, E., & de CARVALHO, J. M. V. (2011). HEURISTICS WITH STOCHASTIC NEIGHBORHOOD STRUCTURES FOR TWO-DIMENSIONAL BIN PACKING AND CUTTING STOCK PROBLEMS. *Asia-Pacific Journal of*

- Operational Research*, 28(02), 255–278.
<https://doi.org/10.1142/S0217595911003168>
- Chen, C. S., Lee, S. M., & Shen, Q. S. (1995). An analytical model for the container loading problem. *European Journal of Operational Research*, 80(1), 68–76.
[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)00002-T](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00002-T)
- Chen, J. H., D.J. Zeng, & J. Wang. (2012). Developing Trends and Strategies of International Container Shipping Industry During the Period of the Financial Crisis. *Logistics Engineering and Manage-Ment* 34 (8), 1–3.
- Chien, C.-F., & Deng, J.-F. (2004). A container packing support system for determining and visualizing container packing patterns. *Decision Support Systems*, 37(1), 23–34. [https://doi.org/10.1016/S0167-9236\(02\)00192-6](https://doi.org/10.1016/S0167-9236(02)00192-6)
- Davies, A. P., & Bischoff, E. E. (1999). Weight distribution considerations in container loading. *European Journal of Operational Research*, 114(3), 509–527. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00139-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00139-8)
- Egeblad, J., & Pisinger, D. (2009). Heuristic approaches for the two- and three-dimensional knapsack packing problem. *Computers & Operations Research*, 36(4), 1026–1049. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2007.12.004>
- Eley, M. (2002). Solving container loading problems by block arrangement. *European Journal of Operational Research*, 141(2), 393–409. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00133-9](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00133-9)
- Eley, M. (2003). A bottleneck assignment approach to the multiple container loading problem. *OR Spectrum*, 25(1), 45–60. <https://doi.org/10.1007/s002910200113>
- Fusillo, M. (2006). Some notes on structure and stability in liner shipping. *Maritime Policy and Management*, 33(5), 463–475. <https://doi.org/10.1080/03088830601020653>
- Fusillo, M., & Haralambides, H. (2020). Do carrier expectations indicate industry structure in container shipping? An econometric analysis. *Journal of Shipping and Trade*, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s41072-019-0057-2>
- Gehring, H. (1997). A genetic algorithm for solving the container loading problem. *International Transactions in Operational Research*, 4(5–6), 401–418. [https://doi.org/10.1016/S0969-6016\(97\)00033-6](https://doi.org/10.1016/S0969-6016(97)00033-6)
- Gehring, H., Menschner, K., & Meyer, M. (1990). A computer-based heuristic for packing pooled shipment containers. *European Journal of Operational Research*, 44(2), 277–288. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90363-G](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90363-G)

- George, J. A., & Robinson, D. F. (1980). A heuristic for packing boxes into a container. *Computers & Operations Research*, 7(3), 147–156. [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(80\)90001-5](https://doi.org/10.1016/0305-0548(80)90001-5)
- Gilmore, P. C., & Gomory, R. E. (1965). Multistage Cutting Stock Problems of Two and More Dimensions. *Operations Research*, 13(1), 94–120. <https://doi.org/10.1287/opre.13.1.94>
- Graham, M. G. (1998). Stability and competition in intermodal container shipping: Finding a balance. *Maritime Policy and Management*, 25(2), 129–147. <https://doi.org/10.1080/03088839800000024>
- Haessler, R. W., & Brian Talbot, F. (1990). Load planning for shipments of low density products. *European Journal of Operational Research*, 44(2), 289–299. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90364-H](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90364-H)
- Hege Høyer Leivestad; Elisabeth Schober. (2021). *Politics of Scale*. ANTHROPOLOGY TODAY .
- Hodgson, T. J. (1982). A Combined Approach to the Pallet Loading Problem. *A I I E Transactions*, 14(3), 175–182. <https://doi.org/10.1080/05695558208975057>
- Huang, W., & He, K. (2009). A caving degree approach for the single container loading problem. *European Journal of Operational Research*, 196(1), 93–101. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.02.024>
- Huang, Y. H., Hwang, F. J., & Lu, H. C. (2016). An effective placement method for the single container loading problem. *Computers and Industrial Engineering*, 97, 212–221. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.05.008>
- Junqueira, L., Morabito, R., & Sato Yamashita, D. (2012). Three-dimensional container loading models with cargo stability and load bearing constraints. *Computers and Operations Research*, 39(1), 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2010.07.017>
- Knowler, G. (2020). Extent of Chinese factory slump supports fears over inventory levels. *IHS Markit, Maritime & Trade*.
- Lai, K. K., Xue, J., & Xu, B. (1998). Container packing in a multi-customer delivering operation. *Computers & Industrial Engineering*, 35(1–2), 323–326. [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(98\)00085-0](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(98)00085-0)
- Levinson, M. (2016). *How the Shipping Container Made the World Smaller and the World Economy Bigger*. Princeton.
- Liu, J., Yue, Y., Dong, Z., Maple, C., & Keech, M. (2011). A novel hybrid tabu search approach to container loading. *Computers & Operations Research*, 38(4), 797–807. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2010.09.002>

- Luke, T. C., & Rodrigue, J. P. (2008). Protecting public health and global freight transportation systems during an influenza pandemic. *American Journal of Disaster Medicine*, 3(2), 99–107. <https://doi.org/10.5055/ajdm.2008.0013>
- Martello, S., Pisinger, D., & Vigo, D. (2000). The Three-Dimensional Bin Packing Problem. *Operations Research*, 48(2), 256–267. <https://doi.org/10.1287/opre.48.2.256.12386>
- Miyazawa, F. K., & Wakabayashi, Y. (2000). Approximation Algorithms for the Orthogonal Z -Oriented Three-Dimensional Packing Problem. *SIAM Journal on Computing*, 29(3), 1008–1029. <https://doi.org/10.1137/S009753979631391X>
- Miyazawa, F. K., & Wakabayashi, Y. (2007). Two- and three-dimensional parametric packing. *Computers & Operations Research*, 34(9), 2589–2603. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.10.001>
- Miyazawa, F. K., & Wakabayashi, Y. (2009). Three-dimensional packings with rotations. *Computers & Operations Research*, 36(10), 2801–2815. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2008.12.015>
- Morabito, R., & Arenalest, M. (1994). An AND/OR-graph Approach to the Container Loading Problem. *International Transactions in Operational Research*, 1(1), 59–73. <https://doi.org/10.1111/1475-3995.d01-8>
- Moura, A., & Oliveira, J. F. (2005). A GRASP Approach to the Container-Loading Problem. *IEEE Intelligent Systems*, 20(4), 50–57. <https://doi.org/10.1109/MIS.2005.57>
- Notteboom, T. (2012). Container Shipping. *The Blackwell Companion to Maritime Economics*, 230–261.
- Notteboom, T., G. De Monie, & J.-P. Rodrigue. (2010). The Organizational and Geographical Ramifications of the 2008-09 Financial Crisis on the Maritime Shipping and Port Industries. *Integrating Seaports and Trade Corridors*, 31–46.
- Notteboom, T., & J.S.L. Lam. (2014). Dealing with Uncertainty and Volatility in Shipping and Ports. In *Maritime Policy and Management* (pp. 611–614).
- Notteboom, T., Pallis, T., & Rodrigue, J. P. (2021). Disruptions and resilience in global container shipping and ports: the COVID-19 pandemic versus the 2008–2009 financial crisis. *Maritime Economics and Logistics*, 23(2), 179–210. <https://doi.org/10.1057/s41278-020-00180-5>
- P. Wolfe. (1963). Methods of nonlinear programming and. *Recent Advances in Mathematical Programming*.

- Parreño, F., Alvarez-Valdes, R., Oliveira, J. F., & Tamarit, J. M. (2010). Neighborhood structures for the container loading problem: a VNS implementation. *Journal of Heuristics*, *16*(1), 1–22. <https://doi.org/10.1007/s10732-008-9081-3>
- Parreño, F., Alvarez-Valdes, R., Tamarit, J. M., & Oliveira, J. F. (2008). A Maximal-Space Algorithm for the Container Loading Problem. *INFORMS Journal on Computing*, *20*(3), 412–422. <https://doi.org/10.1287/ijoc.1070.0254>
- Pisinger, D. (2002). Heuristics for the container loading problem. *European Journal of Operational Research*, *141*(2), 382–392. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00132-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00132-7)
- Ren, J., Tian, Y., & Sawaragi, T. (2011). A tree search method for the container loading problem with shipment priority. *European Journal of Operational Research*, *214*(3), 526–535. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.04.025>
- Rudd, K., Foderaro, G., Zhu, P., & Ferrari, S. (2017). A Generalized Reduced Gradient Method for the Optimal Control of Very-Large-Scale Robotic Systems. *IEEE Transactions on Robotics*, *33*(5), 1226–1232. <https://doi.org/10.1109/TRO.2017.2686439>
- Sancibrian, R. (2011). Improved GRG method for the optimal synthesis of linkages in function generation problems. *Mechanism and Machine Theory*, *46*(10), 1350–1375. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.05.011>
- Scheithauer, G. (1992). Algorithms for the Container Loading Problem. In *Operations Research Proceedings 1991* (pp. 445–452). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-46773-8_112
- Sciomachen, A., & Tanfani, E. (2007). A 3D-BPP approach for optimising stowage plans and terminal productivity. *European Journal of Operational Research*, *183*(3), 1433–1446. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.11.067>
- Techanitisawad, A., & Tangwiwatwong, P. (2004). A GA-based Heuristic for the Interrelated Container Selection Loading Problems. *Industrial Engineering and Management Systems*, *3*, 22–37.
- Terno, J., Scheithauer, G., Sommerweiß, U., & Riehme, J. (2000). An efficient approach for the multi-pallet loading problem. *European Journal of Operational Research*, *123*(2), 372–381. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00263-5](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00263-5)
- Tsai, J.-F., & Li, H.-L. (2006). A global optimization method for packing problems. *Engineering Optimization*, *38*(6), 687–700. <https://doi.org/10.1080/03052150600603264>
- Tsai, J.-F., Wang, P.-C., & Lin, M.-H. (2015). A global optimization approach for solving three-dimensional open dimension rectangular packing problems.

- Optimization*, 64(12), 2601–2618.
<https://doi.org/10.1080/02331934.2013.877906>
- Valério De Carvalho, J. M. (1999). Exact solution of bin-packing problems using column generation and branch-and-bound. *Annals of Operations Research*, 86, 629–659. <https://doi.org/10.1023/a:1018952112615>
- Valério de Carvalho, J. M. (2002). LP models for bin packing and cutting stock problems. *European Journal of Operational Research*, 141(2), 253–273. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00124-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00124-8)
- Wang, Z., Li, K. W., & Levy, J. K. (2008). A heuristic for the container loading problem: A tertiary-tree-based dynamic space decomposition approach. *European Journal of Operational Research*, 191(1), 86–99. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.08.017>
- Yang, D., L. Jiang, & T. Notteboom. (2019). Innovative Solutions for Shipping Market Turmoil: The Search for Profitability, Sustainability and Resilience. In *Transport Policy* (pp. 75–76).
- Zhao, X., Bennell, J. A., Bektaş, T., & Dowsland, K. (2016). A comparative review of 3D container loading algorithms. *International Transactions in Operational Research*, 23(1–2), 287–320. <https://doi.org/10.1111/itor.12094>