



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE CIÊNCIAS APLICADAS

GILBERTO MARASSI DE LOIOLA LEITE

**Abordagem multicritério para resolução
de problemas de carregamento de contêiner
com prioridades relativas de embarque**

**Limeira
2019**

GILBERTO MARASSI DE LOIOLA LEITE

**Abordagem multicritério para resolução
de problemas de carregamento de contêiner
com prioridades relativas de embarque**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Aplicadas da Universidade Estadual de Campinas (FCA - Unicamp) como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e de Manufatura, na área de Pesquisa Operacional e Gestão de Processos.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Torezzan

Coorientador: Prof. Dr. Washington Alves de Oliveira

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL
DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO
GILBERTO MARASSI DE LOIOLA LEITE, E ORIENTADA
PELO PROF. DR. CRISTIANO TOREZZAN.

**Limeira
2019**

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Faculdade de Ciências Aplicadas
Renata Eleuterio da Silva - CRB 8/9281

L536a Leite, Gilberto Marassi de Loiola, 1983-
Abordagem multicritério para resolução de problemas de carregamento de contêiner com prioridades relativas de embarque / Gilberto Marassi de Loiola Leite. – Limeira, SP : [s.n.], 2019.

Orientador: Cristiano Torezzan.
Coorientador: Washington Alves de Oliveira.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Ciências Aplicadas.

1. Processo decisório por critério múltiplo. 2. Transporte de mercadorias. 3. Transportes - Planejamento. 4. Transportes - Modelos matemáticos. I. Torezzan, Cristiano, 1976-. II. Oliveira, Washington Alves de, 1977-. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Ciências Aplicadas. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Multicriteria approach to solving container loading problems with shipment relative priorities

Palavras-chave em inglês:

Multiple criteria decision making

Shipment of goods

Transportation - Planning

Transportation - Mathematical models

Área de concentração: Pesquisa Operacional e Gestão de Processos

Titulação: Mestre em Engenharia de Produção e de Manufatura

Banca examinadora:

Cristiano Torezzan [Orientador]

Priscila Cristina Berbert Rampazzo

Maria Celia de Oliveira

Data de defesa: 16-04-2019

Programa de Pós-Graduação: Engenharia de Produção e de Manufatura

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-7467-5201>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/5948347672139970>



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE CIÊNCIAS APLICADAS

GILBERTO MARASSI DE LOIOLA LEITE

**Abordagem multicritério para resolução
de problemas de carregamento de contêiner
com prioridades relativas de embarque**

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Cristiano Torezzan
Universidade Estadual de Campinas

Profa. Dra. Maria Celia de Oliveira
Universidade Metodista de Piracicaba

Profa. Dra. Priscila Cristina Berbert Rampazzo
Universidade Estadual de Campinas

A ata da defesa, assinada pelos membros da Comissão Examinadora, consta no SIGA / Sistema de Fluxo de Dissertação / Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Limeira, 16 de abril de 2019

“[...] o conhecimento matemático consiste em inventar estruturas, em definir operações que façam aparecer uma ordem superior em um conjunto de fatos legados por um estado anterior da cultura científica. A razão evolui no sentido em que o ideal de ordem e o processo de construção dos conceitos novos variam no curso da história. Assim progride a razão matemática que, longe de ser um corpo fechado de princípios, é imaginação regrada, mas criadora”.

(Gilles-Gaston Granger, 1962)

AGRADECIMENTOS

É inútil tentar enumerar todas as pessoas responsáveis direta ou indiretamente pela execução deste trabalho que, como todo produto do intelecto, extrapola os limites do texto e do próprio curso. Porém, seria igualmente injusto não citar aqueles que colaboraram ativamente para a sua realização, sem os quais essa dissertação sequer seria possível.

Primeiramente, sou grato aos colegas gestores da transportadora em que atuo há 13 anos, sobretudo pelo conhecimento compartilhado que serviu não só de mote para este trabalho, como também de inspiração na elaboração de todo o estudo. A colaboração dos colegas de mestrado da Unicamp foi extremamente importante, pois ao trocarem experiências sobre suas pesquisas nos motivam a buscar a melhor forma para a nossa própria. A participação dos meus orientadores foi imprescindível, e a eles agradeço por toda a atenção dispensada ao longo deste período. Por fim, pela paciência e compreensão de meus familiares e amigos nos vários momentos em que me foi necessário dedicar horas de estudo em reclusão, deixo aqui o meu muito obrigado.

RESUMO

Problemas de carregamento de contêiner motivam uma linha de estudos profícua no campo da Pesquisa Operacional mas, apesar disso, um tipo de restrição de suma importância prática tem sido negligenciado em grande parte dos métodos de resolução até então propostos na literatura: as prioridades de embarque. A atenção a elas pode gerar uma série de vantagens financeiras que, apesar de mais difíceis de mensurar, por vezes superam, por exemplo, a economia de custos obtida por carregamentos que maximizam o espaço preenchido nos contêineres ou rotas otimizadas que reduzem distâncias percorridas (objetivos frequentemente relacionados ao problema). É nesta premissa que o presente trabalho se calca: diante de tal quadro e em virtude da carência de modelos matemáticos que levem em consideração, em um sentido forte, os aspectos ligados às prioridades de embarque (em geral) e seu reflexo nos serviços de entrega de encomendas (especificamente), o objetivo deste estudo é desenvolver uma abordagem multicritério, representada por um *framework*, que solucione o problema de carregamento de contêiner, em sua aplicação específica para veículos de entrega de mercadorias. A metodologia de pesquisa aqui utilizada é baseada na aplicação de um modelo quantitativo que, inicialmente, estabelece um índice de prioridade relativa de embarque – levando-se em conta características específicas (definidas pelo tomador de decisão) exigidas em determinado mercado – e, sequencialmente, o aplica na preparação dos dados a serem usados em um modelo matemático de resolução do problema. Tal *framework* foi implementado e testado em cenários sintéticos e os resultados evidenciam sua capacidade de atender aos mais variados interesses definidos por tomadores de decisão em relação aos critérios para a priorização de embarque.

Palavras-chave: Problema de carregamento de contêiner. Prioridade relativa de embarque. Método de auxílio à decisão multicritério.

ABSTRACT

Container Loading Problems motivate a profitable research line in the field of Operational Research. Nevertheless, a type of constraint of paramount importance has been largely neglected in the resolution methods proposed so far in the literature: shipment priorities. Attention to them can generate a number of financial advantages that, although more difficult to measure, sometimes outweigh, for example, the cost savings obtained by shipments that maximize the space filled in the containers or optimized routes that reduce the distances covered (objectives often related to the problem). It is on this premise that the present work is reasoned: face of such situation and due to the lack of mathematical models that take account, in a strong sense, the aspects related to shipment priorities (in general) and its effects on delivery services of goods (specifically), the objective of this study is to develop a multicriteria approach, represented by a framework, that solves the Container Loading Problem in its specific application for goods delivery vehicles. The research methodology used here is based on the application of a quantitative model that initially establishes a shipment relative priority index – taking into account specific aspects (defined by the decision maker) required in a particular market – and lastly apply this index in a data preparation step for use in a mathematical resolution model. This framework was implemented and tested in synthetic scenarios and the results evidenced its ability to meet the most varied interests defined by decision makers related to the criteria for shipment prioritization.

Keywords: Container loading problem. Shipment relative priority. Multiple criteria decision analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Estrutura hierárquica genérica do método AHP.....	33
Figura 2	Exemplo de posicionamento de uma caixa dentro do contêiner	39
Figura 3	<i>Framework</i> para resolução do CLP considerando prioridades relativas de embarque	47
Figura 4	Estabelecimento das prioridades (primeira parte do <i>framework</i>)	49
Figura 5	Algoritmo para resolução do CLP (segunda parte do <i>framework</i>).....	51
Figura 6	Padrão de carregamento obtido pelo programa de resolução do problema proposto.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Escala Fundamental de Saaty	34
Tabela 2	Índices randômicos para avaliação de consistência	35
Tabela 3	Exemplo de matriz de comparação par-a-par.....	55
Tabela 4	Pesos obtidos por meio do Método do Autovetor	55
Tabela 5	Valores de prioridade por tipo de mercadoria	56
Tabela 6	Entregas ordenadas por prioridade, limitadas pelo peso máximo do caminhão	57
Tabela 7	Entregas preteridas pela presente abordagem na aplicação proposta.....	63
Tabela 8	Matriz de comparação par-a-par alternativa	64
Tabela 9	Pesos obtidos para julgamentos distintos	64
Tabela 10	Entregas preteridas com o estabelecimento de pesos distintos.....	65

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
CIF	<i>Cost, Insurance and Freight</i>
CLP	<i>Container Loading Problem</i>
ELECTRE	<i>Elimination Et Choix Traduisant la Réalité</i>
FOB	<i>Free On Board</i>
GRASP	<i>Greedy Randomized Adaptive Search Procedure</i>
MACBETH	<i>Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique</i>
MAUT	<i>Multi-Attribute Utility Theory</i>
MAVT	<i>Multi-Attribute Value Theory</i>
MCDA	<i>Multiple Criteria Decision Analysis</i>
ORESTE	<i>Organization, Rangement Et Synthese De Donnes Relationnelles</i>
PROMETHEE	<i>Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations</i>
ROC	<i>Rank Order Centroid</i>
SA	<i>Simulated Annealing</i>
SMART	<i>Simple Multi-Attribute Rating Technique</i>
SMARTER	<i>SMART Exploiting Ranks</i>
SMARTS	<i>SMART using Swings</i>
TOPSIS	<i>Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Caracterização do problema	14
1.2 Justificativa e relevância	15
1.3 Objetivo geral	16
1.3.1 Objetivos específicos	16
1.4 Estruturação do trabalho	17
1.5 Terminologia	18
2. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	19
2.1 O problema de carregamento de contêiner	19
2.2 Métodos de auxílio à decisão multicritério	22
2.2.1 Métodos de agregação.....	24
2.2.2 Método MAVT	26
2.2.3 Normalização	27
2.2.4 Métodos de elicitación de pesos	29
2.2.5 Método AHP.....	32
2.3 Modelos de resolução do problema de carregamento	38
2.3.1 Modelos de otimização.....	38
2.3.2 Modelos heurísticos e meta-heurísticos.....	42
3. METODOLOGIA DE PESQUISA	45
3.1 Classificação do método de pesquisa	45
4. ABORDAGEM PROPOSTA	46
4.1 Framework	46
4.1.1 Estabelecimento das prioridades.....	48
4.1.2 Algoritmo para solução do CLP	50
4.2 Aplicação	51
4.2.1 Estabelecimento dos critérios de decisão	51
4.2.2 Elicitación dos pesos dos critérios.....	54
4.2.3 Elicitación / levantamento dos valores intracritérios.....	55
4.2.4 Processamento dos dados	56
4.2.5 Agregação dos valores (prioridades relativas e absolutas)	56
4.2.6 Aplicação do ordenamento ao CLP	59
5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	62
6. CONCLUSÃO	67
7. REFERÊNCIAS	68

1. INTRODUÇÃO

O problema de carregamento de contêiner ainda conserva, em sua essência, uma série de variações a serem exploradas e uma vasta gama de cenários que demandam soluções e carecem de atenção no campo da Pesquisa Operacional. Bischoff e Ratcliff (1995) já apontavam que as soluções até então propostas para este problema só eram úteis a uma fração das aplicações encontradas na prática, havendo um grande número de ocasiões em que ainda não se conheciam metodologias adequadas. Quando o problema envolve o carregamento de veículos para distribuição de mercadorias – onde também se deve levar em conta questões características de cada encomenda – a complexidade do problema aumenta consideravelmente e os modelos propostos parecem ainda menos adequados às aplicações práticas.

O balizador para a resolução deste tipo de problema na literatura especializada parece ser a redução de custos e, por essa razão, normalmente os modelos costumam apresentar soluções para um problema misto de carregamento e roteirização, onde é possível mensurar os ganhos financeiros com alto grau de precisão. Com isso, restrições de aproveitamento de espaço do veículo e rotas otimizadas se sobressaem às prioridades de embarque e entrega que, segundo o levantamento realizado por Bortfeldt e Wäscher (2013), compõem menos de 2% das publicações especializadas no assunto e, mesmo quando consideradas, são apresentadas como restrições fracas.

Na prática, manter um bom nível de serviço é imprescindível para a própria manutenção dos clientes em uma carteira comercial e a eficiência nas entregas é um indicador importante, sobretudo para empresas especializadas, como as transportadoras de encomendas. Parece haver relativo consenso entre os teóricos da logística no tocante aos fatores de análise da eficiência de um serviço de transporte por parte de quem o contrata e que, apesar das diferentes terminologias, referem-se aos mesmos indicadores: Pires (2009, p.15) afirma que “o desempenho das entregas costuma ser medido em termos da (i) confiabilidade dos prazos prometidos e (ii) duração desses prazos”; Ballou (2006) indica como característica importante na análise do transporte ideal para cada operação o tempo de trânsito e sua variabilidade; Harmon (1994, p. 32) lista como principais prioridades para os clientes “entregas pontuais e tempos de entrega reduzidos”; Bowersox e Closs (2001, p. 41)

pontuam que “a combinação entre velocidade e consistência forma a percepção sobre a qualidade do transporte por parte do usuário”.

Neste panorama é natural supor que, na prática, as vantagens financeiras obtidas com a satisfação de clientes, apesar de mais difíceis de prever ou mensurar, tendem a ser mais vantajosas do que a economia de custos gerada pelos carregamentos que minimizam áreas não preenchidas em caminhões e contêineres ou rotas que reduzem distâncias percorridas. É nesta premissa que o presente trabalho se calca, e diante de tal quadro que a proposta se desenvolve.

Para se compreender melhor o contexto, nas seções que compõem essa introdução são expostos, sequencialmente: o problema de pesquisa, a relevância teórica e prática deste trabalho, os objetivos a serem atingidos e as demais características formais da dissertação.

1.1 Caracterização do problema

Sob o prisma das características teóricas e práticas contidas no planejamento de transportes, Gomes e Mauricio (1995) afirmam que, uma vez que não se pode ignorar sem ônus a grande variedade de critérios que podem interferir nas decisões de produção e consumo do serviço de transporte, é bastante oportuno dispor de um método sistêmico que auxilie o tomador de decisão em sua atividade. Bischoff e Ratcliff (1995), por sua vez, apontam uma série de restrições de fundamental importância prática, mas que lhes pareciam ignoradas nas publicações sobre o problema de carregamento de contêiner até então e, dentre essas, ressaltam-se as prioridades de embarque. Dezoito anos depois, Bortfeldt e Wäscher (2013) notam que tais prioridades ainda eram preteridas nos modelos desenvolvidos para a resolução deste tipo de problema, o que é surpreendente, na visão dos autores. Em levantamento realizado nos anos que se seguiram até os dias atuais (detalhado na Seção 2 deste estudo, onde é feita a revisão sistemática da literatura), o quadro não parece ter mudado muito. Assim, o problema posto neste estudo é: como resolver o problema de carregamento de contêiner, em sua aplicação a veículos de entrega, considerando as prioridades características de cada encomenda em um sentido forte, diante desta exigência prática e da carência teórica?

1.2 Justificativa e relevância

Embora não pareça claro em uma análise superficial, a justificativa de maior importância para a consideração e o estabelecimento de prioridades de embarque, em relação às exigências de entrega, é, em última instância, financeira: vista mais detalhadamente, a atenção às prioridades evita uma série de custos “invisíveis” que podem representar um montante financeiro maior do que as próprias perdas por um roteiro não otimizado, por exemplo. Destacam-se como custos latentes:

- **Multas por atraso:** pela Lei nº 11.442/07 do Código Civil (BRASIL, 2007), que regulamenta a atividade de transporte rodoviário de cargas no Brasil, o atraso acarreta o direito ao ressarcimento de possíveis prejuízos sofridos pelo contratante. Nos Estados Unidos, Ballou (2006) aponta que a responsabilidade do transportador por atrasos também é juridicamente contemplada;
- **Indenizações por limite de eficiência:** grandes embarcadores costumam incluir em seus contratos de transporte penalizações percentuais nos pagamentos de fretes quando o índice de atrasos ultrapassar dado limite preestabelecido;
- **Perda de vendas e do próprio cliente pelo não cumprimento dos prazos de entrega:** dependendo da urgência e da disponibilidade de obtenção de determinado produto similar, o destinatário de determinada entrega pode cancelá-la devido ao atraso, causando o prejuízo da perda da venda e os custos de envio e retorno desta encomenda. Em casos extremos, tal cliente pode romper relações comerciais diante da insatisfação;
- **Indenização por perecibilidade:** se algum material perecível deixa de ser entregue no prazo e isso acarretar sua perda por extrapolar o vencimento, podem incorrer custos com indenizações ou, caso haja alguma cobertura externa, custos com prêmios pagos às seguradoras;
- **Aumento de custos com serviços de atendimento em virtude de atrasos:** a busca por informações sobre as entregas cresce proporcionalmente ao aumento dos atrasos, o que demanda investimentos em atendimento (seja telefônico, eletrônico ou presencial) para minimizar

os impactos desta não conformidade no serviço.

O segundo aspecto que destaca a relevância do presente trabalho é o fato já citado de que, mesmo diante desta lista de custos vinculados à baixa eficiência nas entregas, os modelos desenvolvidos para o problema de carregamento de contêiner parecem não considerar importante, em sua grande parte, a restrição de prioridade de embarque e seus possíveis desdobramentos: no levantamento aqui exposto, apenas cinco publicações de projeção consideram restrições de prioridade nos últimos 23 anos (e todas publicadas em um período relativamente recente): Ren, Tian e Sawaragi (2011a e 2011b), Wang, Lim e Zhu (2013), Tian *et al.* (2016), e Jamrus e Chien (2016).

Em suma, é esta dupla dimensão do problema – a ausência de soluções publicadas no âmbito acadêmico e a severa importância no âmbito prático – que justificam a realização deste trabalho e lhe conferem relevância.

1.3 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma abordagem multicritério, representada por um *framework*, que solucione o problema de carregamento de contêiner, em sua aplicação específica para veículos de entrega de mercadorias, visando estabelecer um índice de prioridade relativa de embarque – levando-se em conta características específicas (definidas pelo tomador de decisão) exigidas em determinado mercado – e, sequencialmente, aplicando o índice obtido na preparação dos dados a serem usados em um modelo matemático de resolução do problema.

1.3.1 Objetivos específicos

Do objetivo geral supracitado são derivados três objetivos específicos:

- Promover a aplicação de prioridades relativas ao problema de carregamento de contêiner, já que não há registro de tal uso na literatura especializada pesquisada;
- Desenvolver uma abordagem que possa estabelecer tal índice de prioridade, uma vez que os poucos modelos que lançam mão desta restrição não estabelecem a sua obtenção, tratando esta informação como um parâmetro conhecido, predeterminado;
- Atestar a aplicabilidade do *framework* proposto a um possível modelo matemático de resolução do problema de carregamento de contêiner que

comporte a utilização de índices de prioridade.

1.4 Estruturação do trabalho

Esta dissertação está estruturada em sete partes principais, a saber:

- **Introdução:** apresenta o trabalho em linhas gerais, caracterizando o problema de carregamento de contêiner aplicado a veículos de entrega, a relevância do mesmo nas perspectivas prática e teórica, os objetivos desta proposta ao desenvolver um *framework*, além de outras informações úteis ao entendimento do texto;
- **Revisão sistemática da literatura:** um levantamento amplo do histórico bibliográfico e documental do problema de carregamento de contêiner é realizado, fornecendo definições dos assuntos de interesse que este estudo aborda – tal como os métodos de auxílio à decisão multicritério, os métodos de agregação e elicitação de pesos, etc.;
- **Metodologia de pesquisa:** a metodologia é detalhada nesse momento, apresentando as bases teóricas que fundamentam esse tipo específico de abordagem e a justificativa de cada técnica escolhida para compô-la;
- **Abordagem proposta:** o *framework* sugerido para resolução do problema é apresentado em seus detalhes – o desenvolvimento dos critérios de decisão, a determinação do método de agregação multicritérios, o estabelecimento dos pesos de cada critério e a aplicação dos índices obtidos na resolução do problema de carregamento. Ainda nesta parte, um exemplo de aplicação do *framework* é apresentado, já com métodos multicritério estabelecidos e uma base de dados de teste determinada;
- **Análise e discussão dos resultados:** os resultados obtidos são analisados e discutidos à luz dos objetivos buscados;
- **Conclusão:** as considerações finais são estabelecidas, analisando em retrospecto o produto dessa dissertação;
- **Referências:** por fim, todas as referências bibliográficas citadas, utilizadas direta ou indiretamente, são elencadas.

1.5 Terminologia

Algumas considerações sobre a terminologia adotada neste trabalho precisam ser feitas para um melhor entendimento do assunto tratado:

- Opta-se por utilizar a expressão “problema de carregamento de contêiner” (como em BISCHOFF; RATCLIFF, 1995; BORTFELDT; GEHRING, 1999; PISINGER, 2002; REN; TIAN; SAWARAGI, 2011a; BORTFELDT; WÄSCHER, 2012; TIAN *et al.*, 2016) por ser mais comumente utilizada na literatura, entendendo o termo “contêiner” no sentido mais amplo de um espaço retangular (cúbico) tridimensional de capacidade limitada. É possível encontrar em algumas publicações a expressão “problema de carregamento de veículos” (como em DELGADO; LAGUNA; PACHECO, 2005; LIU; SMITH; QIAN, 2016), que aparentemente se adaptaria melhor ao tipo de cenário em que a abordagem aqui apresentada está inserida (já que se aplica especificamente a veículos de distribuição urbana de mercadorias, normalmente caminhões), mas a contrapartida pode ser a perda da generalidade e da ligação com a classe de problemas que o termo engloba, e por isso foi preterida;
- Utiliza-se, de maneira generalizada neste estudo, a expressão “prioridade de embarque” (como em BISCHOFF; RATCLIFF, 1995), mas é possível encontrar variações terminológicas na literatura, como “prioridade de carregamento” (BORTFELDT; WÄSCHER, 2013) ou “preferência” (TIAN *et al.*, 2016). Deve-se considerá-las como expressões sinônimas;
- “Volume”, “caixa” e “item” são termos utilizados para designar cada unidade tridimensional a ser carregada. Como indicado por Bortfeldt e Wäscher (2013), a imensa maioria dos modelos nesta seara não consideram itens de formato irregular, mas sim pequenos itens retangulares e, seguindo o uso linguístico mais recorrente, utiliza-se aqui o termo “caixa”;
- De maneira análoga, “pedido”, “encomenda”, “entrega”, “carga” e “lote” são termos usados pelo conjunto de uma ou mais caixas que são agrupadas para o atendimento a um único cliente. Convencionalmente, adota-se aqui o termo “entrega” quando o sentido for precisamente este, mas os demais termos são também utilizados amplamente no texto, em ocasiões em que seu emprego possui conotação distinta.

2. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Para uma compreensão ampla do contexto deste trabalho, uma revisão do que foi produzido na literatura é feita, abordando os principais conceitos que envolvem este problema, desde a própria definição de problema de carregamento de contêiner, até a exposição dos métodos de auxílio à decisão multicritério em geral, tal como as técnicas especificamente escolhidas para compor a abordagem na aplicação que é desenvolvida adiante. Além disso, os modelos típicos para a resolução deste problema são explorados, também com base nas contribuições de alguns autores.

2.1 O problema de carregamento de contêiner

Conforme destacam Martínez, Alvarez-Valdes e Parreño (2015), o problema de carregamento de contêiner é um dos mais desafiadores em seu campo de pesquisa: trata-se de um problema NP-difícil (REN; TIAN; SAWARAGI, 2011b) que possui uma série de interpretações: Bortfeldt e Wäscher (2013) ressaltam que tais desafios podem ser tomados como problemas de atribuição geométricos; para Pisinger (2002), a resolução destes problemas se relaciona diretamente com os problemas de corte e empacotamento, pois pode ser aplicada não somente no carregamento de veículos ou contêineres de carga, mas também no carregamento de paletes com mercadorias ou mesmo no corte de madeira ou borracha para otimização do espaço de transporte e armazenagem, porém Bortfeldt e Wäscher (2013) ressaltam que, obviamente, essa associação é mais adequada às aplicações tridimensionais de corte e empacotamento, e não em instâncias de uma ou duas dimensões; o problema de carregamento de contêiner também pode ser entendido como um problema de carregamento do tipo mochila, em algumas aplicações específicas (como em REN; TIAN; SAWARAGI, 2011a).

O problema também possui uma série de variações diante do grande número de adaptações à prática. Como apontam Bischoff e Ratcliff (1995), a expressão "carregamento de contêiner" é usada na literatura como se houvesse uma caracterização completa e autoexplicativa do problema em questão, mas basta um levantamento superficial nos estudos de caso para perceber que existem cenários bastante diferentes sob a égide desta linha de estudos: sua formulação pode contemplar um único contêiner ou múltiplos, e lotes homogêneos (com caixas de

tamanho padronizado) ou heterogêneos, por exemplo. Em adição, Bortfeldt e Wäscher (2013) apontam que os problemas também podem ser divididos de acordo com a disponibilidade de contêineres, objetivando a minimização desses recursos no caso de ampla disponibilidade, ou maximizando o valor daquilo que é carregado – entendendo “valor” em um sentido lato, podendo referir-se a volume, peso, ou mesmo sua prioridade, como aqui será tratado –, quando a disponibilidade de espaço é conhecida, restrita e previamente dada. Independentemente desta classificação, a descrição formal de uma solução para esse tipo de problema pode ser chamada de “padrão de carregamento”.

A variação utilizada no presente estudo assemelha-se à descrição de Pisinger (2002), onde cada caixa a ser carregada tem um valor associado, e o problema consiste em determinar o subconjunto das caixas que ocupará um contêiner com capacidade limitada, maximizando o valor associado total carregado, e caso o valor esteja diretamente ligado ao próprio volume das caixas, o objetivo pode ser minimizar os espaços vazios. Nas palavras de Bortfeldt e Wäscher (2013), o problema do tipo aqui lidado ocorre quando um único contêiner, com capacidade restrita, deve carregar uma variedade de caixas de formatos homogêneos ou heterogêneos a fim de que o valor total carregado seja maximizado.

Além do tipo de problema variar, as restrições que ele contempla podem ser muitas e, segundo Bischoff e Ratcliff (1995), a área de aplicabilidade das abordagens existentes é limitada em muitos aspectos pois, em seus parâmetros e restrições, essas abordagens se baseiam em dados espaciais, buscando otimizações na utilização do espaço disponível para carregamento, o que os torna inapropriados para muitos problemas encontrados na prática. Restrições de orientação das caixas, limites de empilhamento, de posicionamento das caixas de acordo com seu peso, de estabilidade, de indissociação de lotes, limite de peso do veículo e prioridades de embarque são normalmente preteridas nos modelos apresentados, o que impossibilita a sua aplicação efetiva em ocasiões reais. Somada a essas, Junqueira, Morabito e Yamashita (2012) ainda citam uma restrição importante em certas aplicações (como no problema relacionado ao presente trabalho), que é aquela relacionada à roteirização, já que as caixas que serão entregues primeiro, em uma distribuição de encomendas com várias paradas, devem ser mais acessíveis. Bortfeldt e Wäscher (2013), retomando o trabalho de Bischoff e Ratcliff (1995), classificam as restrições

para o problema em cinco grupos: aquelas relacionadas ao contêiner ou veículo; as relacionadas às caixas ou itens; as relacionadas ao lote ou carga; restrições de posicionamento e restrições de carregamento. Para os interesses deste estudo, a restrição de prioridade (enquadrada no segundo grupo, de características relativas às caixas ou itens) merece especial atenção, pois ela será o balizador para o carregamento na abordagem proposta.

Bischoff e Ratcliff (1995, p. 379, tradução livre) definem a importância das prioridades de embarque:

O carregamento de alguns itens pode ser mais importante que o de outros. Mais especificamente, cada item deve – ao menos conceitualmente – ter uma certa taxa de prioridade, derivada de, por exemplo, prazos de entrega ou validade dos produtos. Dependendo do contexto prático, esta taxa pode representar uma prioridade absoluta, de forma que nenhum item de uma classe de prioridade inferior deve ser carregado se isso representar que itens de taxas maiores sejam deixados para trás, ou deve haver um caráter relativo, refletindo apenas o valor dado na inclusão do carregamento sem impedir trade-offs entre as classes de prioridade.

Essa distinção entre prioridade absoluta e relativa é referência na tratativa deste tipo de problema e os autores são amplamente citados em diversos trabalhos que se seguiram à sua publicação. Infelizmente, a restrição de prioridade de embarque não foi muito explorada na literatura: considerando o levantamento feito por Bortfeldt e Wäscher (2013) em conjunto com uma pesquisa realizada em ferramenta de busca de trabalhos científicos indexados – *Web of Science* (acesso em: 07 mai. 2017), considerando as expressões “*shipment priority*” e “*loading priority*” –, apenas cinco trabalhos consideram a prioridade na resolução do problema de carregamento nos últimos 23 anos: Ren, Tian e Sawaragi (2011a e 2011b), Wang, Lim e Zhu (2013), Tian *et al.* (2016), Jamrus e Chien (2016). É importante destacar que Liu, Smith e Qian (2016) citam a prioridade como algo que pode ser feito manualmente para uso em seu modelo de carregamento, mas não a incorporam em seu modelo como uma restrição ou oferecem uma formulação para a sua obtenção, e por isso seu artigo não é contabilizado neste levantamento. Igualmente, o artigo de Bortfeldt e Gehring (1999), apesar de citado por Bortfeldt e Wäscher (2013) como um dos trabalhos que consideram a prioridade como restrição, não cumpre uma exigência estabelecida em seu próprio levantamento, que é a redação em língua inglesa, e também foi desconsiderado.

Além da escassez de estudos que consideram a prioridade de embarque como uma restrição, os que o fazem consideram em seus modelos apenas

prioridades absolutas, ou seja: de acordo com esse levantamento, não se encontra na literatura pesquisada modelos para a resolução do problema de carregamento de contêiner que levam em conta prioridades relativas de embarque, ou que oferecem uma formulação estruturada de como se obter o valor de prioridade (o que significa que nos cinco artigos supracitados a prioridade é um parâmetro previamente estabelecido para o correto funcionamento do modelo matemático), o que indica também que não se encontra a participação ativa do(s) tomador(es) de decisão no contexto desses modelos. É com inspiração neste aparente ineditismo que o presente trabalho busca desenvolver uma abordagem em MCDA (*Multiple Criteria Decision Analysis*) para a determinação de um índice de prioridade relativa de embarque para a resolução do problema de carregamento de contêiner nos termos apresentados.

2.2 Métodos de auxílio à decisão multicritério

Colson e Bruyn (1989) lançam um desafio que ilustra – e ao mesmo tempo define – a importância dos métodos de decisão multicritério: quem pode dizer que, em uma escolha aberta envolvendo diversas alternativas, é capaz de tomar uma decisão com base em um único critério? E em uma tomada de decisão coletiva, é normal a opinião de diversos “juízes” convergir para uma solução comum? É por isso – continuam os autores – que o reconhecimento da importância das múltiplas dimensões das tomadas de decisão tem gerado um movimento considerável em busca de formulações para a resolução estruturada desse tipo de problema.

Conforme a definição de Figueira, Greco e Ehrgott (2016), o MCDA engloba atividades de auxílio às tomadas de decisão principalmente em termos de escolha, ordenamento e classificação de ações. Contando com uma diversidade de abordagens, métodos e técnicas, o MCDA é composto de ingredientes muito simples: um conjunto finito ou infinito de ações (alternativas, soluções, etc.), ao menos dois critérios (fatores ou atributos) e, obviamente, pelo menos um tomador de decisão. Um critério, de acordo com Hobbs, Chankong e Hamadeh (1992), deve ser entendido como uma característica física, biológica, econômica ou de outra natureza, comum às alternativas em análise, que o tomador de decisão considera relevante para a sua seleção e/ou classificação.

Montis *et al.* (2005) apontam que o número de métodos existentes já é muito grande e continua crescendo, e por essa razão a escolha do método "certo" não

é uma tarefa fácil: para Gomes (2012), os métodos de auxílio à decisão não prometem apontar uma única e incontestada verdade, mas busca delinear, com base nas preferências do tomador de decisão, as ações recomendadas diante de cenários de indefinições, incertezas, multidisciplinidades e critérios relevantes porém não quantificáveis. A integração da qualidade da informação com o tratamento analítico desta informação é a materialização do MCDA.

Belton e Stewart (2002) apontam três mitos relacionados ao MCDA, oriundos do paradigma de otimização frequentemente adotado nas abordagens tradicionais em Pesquisa Operacional: (i) o MCDA fornece a resposta “correta”; (ii) o MCDA oferece uma análise objetiva que isenta o tomador de decisão da responsabilidade de realizar julgamentos complexos; (iii) o MCDA elimina as consequências indesejadas da tomada de decisão. Para o autor, o MCDA se presta a **auxiliar** nas tomadas de decisão, objetivando: (i) integrar mensurações objetivas e julgamentos de valor; (ii) tornar a subjetividade explícita e administrável.

Choo, Schoner e Wedley (1999) afirmam que os métodos multicritérios podem ser divididos em três abordagens operativas: (i) métodos baseados no uso de um único critério de agregação sem contemplar a incomparabilidade; (ii) métodos baseados na agregação por sobreclassificação, contemplando a incomparabilidade; (iii) métodos baseados em julgamentos locais interativos, com iterações por tentativa e erro. Enquanto os dois primeiros englobam uma estrutura matemática clara, o último não utiliza nenhum procedimento formal ou automático. Outra divisão possível – completam os autores – é a divisão em dois grupos, discretos e contínuos, dependendo se o conjunto de alternativas é finito ou infinito.

Pela natureza do problema aqui abordado, o presente estudo lança mão, para estabelecer índices de prioridade relativa para entregas, de dois métodos que se enquadram na abordagem (i) supracitada, tal como também se adequam ao primeiro grupo pela segunda divisão proposta, por se tratar de métodos calcados em preferências e indiferenças, em um cenário onde há um conjunto finito de alternativas: o método MAVT (*Multi-Attribute Value Theory*), exposto na Seção 2.2.2, a ser usado como ferramenta de agregação dos valores; e o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*), com a finalidade de obtenção dos pesos dos critérios (detalhado na Seção 2.2.5).

2.2.1 Métodos de agregação

Um método ou modelo de agregação em MCDA permite, de acordo com Belton e Stewart (2002), a comparação intercritérios ao combinar as preferências contidas nesses critérios. Figueira, Greco e Ehrgott (2016) lembram que tal procedimento já era utilizado, mesmo de forma implícita, muito tempo antes dos métodos de auxílio a decisão multicritérios serem formalizados, e citam o trabalho de Jeremy Bentham, filósofo e jurista do século XVIII, que estabelece em seu cálculo utilitarista que o interesse de uma comunidade é precisamente a soma dos interesses de cada um dos seus membros (BENTHAM, 2000).

Colson e Bruyn (1989) oferecem uma importante classificação dos métodos de agregação, identificando três abordagens dominantes: (i) **agregação dos critérios visando formar um único metacritério**, abordagem mais popular e que envolve o desenvolvimento de uma função de valor ou utilidade – classificação em que se encontram os métodos MAVT e AHP, utilizados neste estudo, e também outros como SMART, TOPSIS, MACBETH, segundo Figueira, Greco e Ehrgott (2016); (ii) **relações de sobreclassificação**, que se valem de relações binárias de preferência, porém abrangendo possíveis condições de indiferença em suas comparações; (iii) **deteção progressiva das preferências**, obtida por meio de sucessivos passos interativos, que se valem de modelos avançados, como funções contínuas e não-lineares.

Decidir qual método de agregação é ideal para um determinado problema em MCDA não é uma ação simples ou óbvia. Roy (2016) pontua que essa escolha deve considerar: (i) os vários **parâmetros intercritérios** como pesos, constantes de escalas, vetores, níveis de aspiração e rejeição, etc., que permitem definir o papel específico que cada critério desempenha em relação aos demais, e (ii) a **lógica de agregação**, que leva em conta os tipos de dependência que um critério pode ter em relação a outro, e as condições nas quais se pode aceitar ou recusar compensações entre desempenhos “bons” ou “ruins” de cada critério. Tal compensação é definida por Colson e Bruyn (1989) como a aceitação da hipótese de que desempenhos elevados de determinado critério pode balancear o baixo desempenho de outros e, por extensão, diferentes perfis (entendidos como o conjunto de níveis de desempenho em um critério) podem estar dispostos de tal forma que, mesmo com sua consideração, a preferência global permaneça inalterada. Em outros termos, Almeida (2015) define que para uma relação de preferência P ser compensatória, não é suficiente conhecer

apenas se o nível de desempenho ($v_i(a_j)$) de uma alternativa é maior ou menor que outro para o critério j , sendo relevante também saber qual é o seu valor e sua respectiva proporcionalidade.

Como o objetivo aqui é o estabelecimento de um *framework* que aceite a utilização de mais de um tipo de método, o construto deste trabalho não está vinculado necessariamente a uma classificação mas, para fins de demonstração de sua aplicabilidade, foi escolhido um método de agregação associado a uma função de valor e que possui caráter compensatório, como será descrito na sequência. Porém, há de se ressaltar que, em consonância com a afirmação de Belton e Stewart (2002), outras formas de agregação em modelos de estabelecimento de preferências, mesmo relacionados a funções de valor, são certamente possíveis: um exemplo que se adequaria ao ambiente em que o presente problema está inserido é o método TOPSIS. Criado por Hwang e Yoon em 1981, o TOPSIS define um índice chamado similaridade (ou proximidade relativa) da solução ideal, combinando a proximidade da solução ideal positiva e a distância da solução ideal negativa, e assim o método seleciona a alternativa com a máxima similaridade da solução ideal. O TOPSIS assume que cada atributo apresenta incrementos ou reduções monotonicamente, isso é, quanto maior o resultado do atributo, maior a preferência por atributos de benefício e menor a preferência por atributos de custo (YOON; HWANG, 1995).

Esse é apenas um exemplo de método que se enquadraria ao *framework* proposto, mas é possível que outros possam ser utilizados, e a escolha do mesmo deve ser balizada por questões particulares de cada ambiente em que o problema está inserido e, sobretudo, às aspirações de cada tomador de decisão. Hobbs, Chankong e Hamadeh (1992) concluem em sua pesquisa sobre a importância da escolha do método multicritério que cada um dos muitos existentes possui diferenciais, mas que o norteador da escolha acaba por envolver aspectos de cunho subjetivo, já que planejadores experientes se afeiçoam a métodos mais simples e transparentes: o dobro dos participantes consultados na pesquisa expressou maior confiança em funções de valor aditivas do que em funções de utilidade ou no método ELECTRE, por exemplo.

2.2.2 Método MAVT

O método de agregação a ser utilizado neste estudo para a obtenção de um índice de prioridade relativa para as entregas é o MAVT. Figueira, Greco e Ehrgott (2016) apontam que se trata de uma abordagem muito simples à primeira vista, o que a faz ser frequentemente aplicada na vida real, pois sempre que se agregam alguns índices somando-se pesos, este método está sendo implicitamente aplicado. Segundo Belton e Stewart (2002), o MAVT é um dos métodos multicritério mais difundidos, e os profissionais e pesquisadores especialistas neste assunto parecem ter experiência sobre construções de modelos e implementações em MCDA na prática: desde sua origem, no final da década de 1960, a preocupação com as aplicações práticas do MAVT influencia bastante o seu uso em campo, inclusive motivando o desenvolvimento de outros métodos em MCDA.

Para Montis *et al.* (2005), o MAVT é uma submetodologia do MAUT (*Multi-Attribute Utility Theory*) que lida com o risco de forma diferente: enquanto o MAUT depende de uma função de utilidade que permite a comparação dos riscos resultantes por meio da computação da utilidade esperada, o MAVT não leva o risco em consideração, usando uma função de valor que representa o resultado das alternativas. Funções de valor preservam a ordenação determinística, enquanto as funções de utilidade preservam a hipótese da utilidade esperada. Dyer (2016) sintetiza a ideia ao afirmar que devemos nos referir à representação da função de preferência sob certeza como uma função de valor, e à representação da função de preferência sob risco como uma função de utilidade e, apesar de ambas apresentarem medidas que conservam a cardinalidade e, portanto, aptas a uma transformação linear positiva, a primeira é baseada em axiomas ligados às diferenças de preferência e questões concernentes à ideia de intensidade de preferência, enquanto a segunda baseia-se nos axiomas da teoria das loterias e suas comparações.

Como explicam Choo, Schoner e Wedley (1999), o MAVT é calcado em algumas suposições-chave, das quais destacam-se: (i) deve preexistir um sistema completo de preferências, que é uma representação adequada dos axiomas na mente do tomador de decisão; (ii) a relação de preferência do tomador de decisão deve respeitar uma ordem fraca, o que significa que todos os estados são comparáveis, e a transitividade das preferências e a intransitividade das indiferenças são conhecidas.

Dyer (2016) aponta que a abordagem mais comum do MAVT (que será

adotada no presente estudo) lança mão da representação aditiva. Belton e Stewart (2002) descrevem sua forma mais usual conforme a Equação 1:

$$V(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^m w_i v_i(\mathbf{a}); \quad (1)$$

onde $V(\mathbf{a})$ é o valor global da alternativa \mathbf{a} ; $v_i(\mathbf{a})$ é o valor da alternativa \mathbf{a} especificamente dentro do critério i , para $i = 1, \dots, m$; e w_i é o peso que reflete a importância do critério i e que, conforme Roy e Mousseau (1996), atua como uma constante de escala. Para Choo, Schoner e Wedley (1999), os valores globais no MAVT estão em uma escala intervalar, e os valores de cada alternativa normalmente se apresentam no intervalo entre 0 e 1 – mediante processo de normalização, como sugere Dyer (2016), que será melhor explicitado na Seção 2.2.3 –, e o peso dos critérios representa a importância do critério em poder discriminatório, que é proporcional ao balanço do pior para o melhor em cada critério. A noção de escala intervalar é importante no contexto do trabalho aqui proposto, já que o índice de prioridade relativa que se busca obter possui a mesma característica, o que reforça a adequação do MAVT à abordagem apresentada. Por fim, o MAVT também se enquadra no grupo de métodos de racionalidade compensatória, nos moldes expostos na Seção 2.2.1. e conforme classificado por Almeida (2015).

Como o MAVT é um método cujo ajuste de escala dos valores intracritérios pode ser importante, são exibidos a seguir alguns métodos de normalização, com destaque ao que é aqui utilizado para a preparação dos dados a serem agregados.

2.2.3 Normalização

A normalização dos valores dos atributos não é sempre necessária, mas pode ser relevante em alguns métodos de MCDA por facilitar os cálculos computacionais diante da presença de diferentes escalas em uma matriz de decisão, procurando obter comparabilidade (HWANG; YOON, 1981). Segundo Saranya e Manikandan (2013), a normalização de dados é um procedimento que se propõe a mapear dados numéricos em uma escala específica. Já para Patro e Sahu (2015), a normalização pode ser vista tanto como uma técnica de escala quanto como uma técnica de mapeamento, ou ainda como uma etapa de pré-processamento de dados.

Existem vários métodos de normalização e, por isso, é vital conhecê-los

para utilizar o procedimento adequado a cada aplicação: Attig e Perner (2011) apontam que há estudos indicando que a normalização pode representar um grande impacto no resultado final de algumas análises. Os autores ainda afirmam que a normalização é uma etapa necessária em muitas aplicações justamente por permitir comparar diferentes experimentos baseados em um mesmo referencial, independentemente da escala de cada atributo ou critério. Três técnicas de normalização são resumidamente apresentadas a seguir, a título de exemplo: a normalização **min-max**, a normalização **z-score** e a normalização por **escala decimal**.

A normalização **min-max** utiliza os limites mínimo e máximo dos dados originais e os converte, por meio de uma transformação linear, para uma outra escala com limites mínimo e máximo preestabelecidos, por meio da equação abaixo:

$$v' = \left(\frac{v - \mathit{min}_A}{\mathit{max}_A - \mathit{min}_A} \right) (\mathit{max}'_A - \mathit{min}'_A) + \mathit{min}'_A; \quad (2)$$

onde v' é o valor normalizado, v o valor original, min_A o mínimo original no atributo A , max_A o máximo original, min'_A o mínimo na nova escala e max'_A o máximo na nova escala. Importante salientar que, caso a nova escala seja um valor entre 0 e 1, só é necessário calcular o conteúdo da fração nos primeiros parênteses, já que este resultado será multiplicado por 1.

A normalização **z-score** se vale da média e do desvio padrão do atributo para a obtenção dos valores normalizados, conforme a seguinte equação:

$$v' = \frac{v - \bar{A}}{\sigma_A}; \quad (3)$$

onde \bar{A} é a média dos valores de A e σ_A o seu desvio padrão.

A normalização por **escala decimal** fornece valores em uma escala entre -1 e 1 movendo o separador decimal de acordo com o valor absoluto máximo contido nos dados, da forma que se segue:

$$v' = \frac{v}{10^m}; \quad (4)$$

onde m é o menor inteiro tal que $\mathit{max}(|v'|) < 1$.

O procedimento de normalização utilizado para preparar os dados para a agregação no presente estudo é o **min-max**, por se tratar do método mais difundido, conforme afirmam Attig e Perner (2011), e por possibilitar a obtenção de valores em

uma escala de 0 a 1 (útil para o caso específico, por poder evidenciar uma relação percentual dos valores intracritérios) por meio de uma transformação linear nos dados originais, como destacam Patro e Sahu (2015).

2.2.4 Métodos de elicitación de pesos

Desenvolver métodos para que tomadores de decisão – não necessariamente familiarizados com a lógica de um modelo matemático típico – estabeleçam pesos para os critérios de determinada estrutura em MCDA é um desafio a ser transposto. São poucos os métodos de destaque e crescem as críticas em relação à sua aplicabilidade. Choo, Schoner e Wedley (1999) afirmam que compreender a verdadeira validade dos pesos dos critérios é crucial para evitar o uso incorreto dos modelos de decisão multicritério, mas infelizmente os pesos são frequentemente mal compreendidos e mal utilizados, sem haver consenso sobre o seu significado. Belton e Stewart (2002) destacam que a elicitación de pesos é foco de intenso debate, pois parece questionável a capacidade do tomador de decisão em ordenar critérios de naturezas distintas, tal como estabelecer escalas de importância relativa dos mesmos.

Apesar disso, essas dificuldades tendem a ser reduzidas se o método de elicitación de pesos for compreendido em suas características próprias e, principalmente, em sua relação com o método de agregación em que está inserido. Roy e Mousseau (1996) listam o comportamento distinto dos pesos dos critérios em sete métodos de agregación: constantes de escala (métodos MAUT / MAVT), ordem fraca ou pré-ordem completa (método ORESTE - *Organization, Rangement Et Synthese De Donnes Relationnelles*), pesos intrínsecos (método PROMETHEE - *Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations*), pesos intrínsecos combinados com limiar de veto (método ELECTRE - *Elimination Et Choix Traduisant la Réalité*), *trade-offs* ou taxas de substituição (“procedimentos de Zionts e Wallenius”, como são conhecidos), níveis de aspiración (métodos interativos), e autovetores de matrizes de comparação par-a-par (método AHP). Choo, Schoner e Wedley (1999) também identificaram diversas interpretações para os pesos: contribuição marginal, compensación, gradiente da função de utilidade, fator de escala, coeficiente linear, valor parcial, valor parcial total, valor parcial típico, poder discriminatório, valor binário de voto, parâmetro de busca e importância do critério.

Além da importância de se ter em mente o comportamento do peso em cada método de agregação, Riabacke, Danielson e Ekenberg (2012) apontam que a elicitación de pesos é uma tarefa que demanda cognição, e apesar de estar sujeita a preconceitos, os números elicitados são fortemente dependentes do método utilizado para a sua obtenção. Belton e Stewart (2002) completam que um dos erros mais comuns é considerar que os pesos dos critérios são independentes das escalas de mensuração utilizadas.

Portanto, é necessário ater-se às três considerações encontradas na literatura para uma elicitación adequada dos pesos dos critérios: o **método de obtenção dos pesos**, a **relação com o método de agregação**, e a **escala de mensuração intracritério**. Neste intento, um breve levantamento das principais técnicas de obtenção de pesos é realizado, buscando aquele mais adequado ao método de agregação aqui utilizado – MAVT –, e que se mostre eficiente na geração de constantes de escala coerentes aos valores próprios atribuídos à cada alternativa em cada critério da abordagem desenvolvida neste trabalho, buscando captar, com algum grau de precisão, as preferências do tomador de decisão.

Segundo Riabacke, Danielson e Ekenberg (2012), os métodos de elicitación de peso diferem quanto ao tipo de informação que preservam dos julgamentos do tomador de decisão, tanto na extração quanto na interpretação. Os autores completam que, na prática, os métodos de elicitación mais utilizados são determinados por aspectos processuais e, portanto, métodos de elicitación com a extração de informações mais simples são mais comuns nas aplicações.

Srivastava, Connolly e Beach (1995) dividem os métodos de estabelecimento de peso em dois grupos: “*policy capturing*”, que parte dos valores intracritério previamente elicitados pelo(s) tomador(es) de decisão e, por meio de análise estatística, obtém as importâncias relativas de cada critério, considerando que o tomador de decisão tem capacidade de prover informações sobre as alternativas em cada critério, mas não consegue associar esses julgamentos à importância diferenciada dos critérios entre si; e “*value elicitation*”, quando o tomador de decisão expressa diretamente a importância que ele atribui a cada critério, neste caso assumindo, em contraste ao primeiro, que o tomador de decisão é capaz de comparar os critérios mas é inapto a relacionar com aceitável grau de confiança esses valores às características intracritério. Como no problema de carregamento de contêiner

tratado no presente trabalho alguns dos critérios de estabelecimento de prioridade podem não ser oriundos de julgamentos individuais, os métodos do primeiro grupo não foram considerados para a aplicação, e por esta razão a pesquisa se pauta especificamente no segundo.

Como exemplo de *value elicitation*, há o grupo de métodos SMART / SMARTS / SMARTER, um dos mais difundidos em aplicações de MCDA. Ele foi desenvolvido por Ward Edwards com o intento de obter dos tomadores de decisão pesos para critérios em modelos multicritério, mas o próprio autor reconheceu um erro na primeira abordagem, SMART (*Simple Multi-Attribute Rating Technique*), publicada em 1977, e por essa razão publicou suas versões aprimoradas 17 anos depois (EDWARDS; BARRON, 1994). O método SMARTS (*SMART using Swings*) foi a junção do método SMART ao método SWING, explicitamente para incluir propagação no modo de extração, enquanto o método SMARTER (*SMART Exploiting Ranks*) procura extrair informações ordinais de importância dos critérios para convertê-las em escala cardinal usando o método ROC (*Rank Order Centroid*) de ordenação centroide (RIABACKE; DANIELSON; EKENBERG, 2012). Ambos envolvem a elaboração de uma hierarquia de objetivos ou estrutura de valor que precede o cálculo dos números associados às importâncias relativas (EDWARDS; BARRON, 1994) e, por essa razão, foram também preteridos neste estudo: como aponta Saaty (2006) ao analisar o que ele chama de mensuração absoluta (classificação de alternativas com base em um modelo ideal) e mensuração relativa (a classificação por julgamentos par-a-par), a simples comparação é inerente à biologia humana e por essa razão os julgamentos calcados em comparações simples são mais eficientes que o estabelecimento de um modelo ideal que sirva de base para diversas comparações, pois isso demanda profundo conhecimento do assunto para o estabelecimento desta referência de mensuração, e leva a equívocos pelo fato de nem sempre essas comparações seguirem a mesma unidade, por serem condicionais.

Assim, o método adotado para a elicitação dos pesos na aplicação do *framework* sugerido no presente estudo é o AHP que, por meio de comparações par-a-par, fornece valores numéricos a partir de uma escala semântica, mais amigável à extração de julgamentos dos tomadores de decisão.

2.2.5 Método AHP

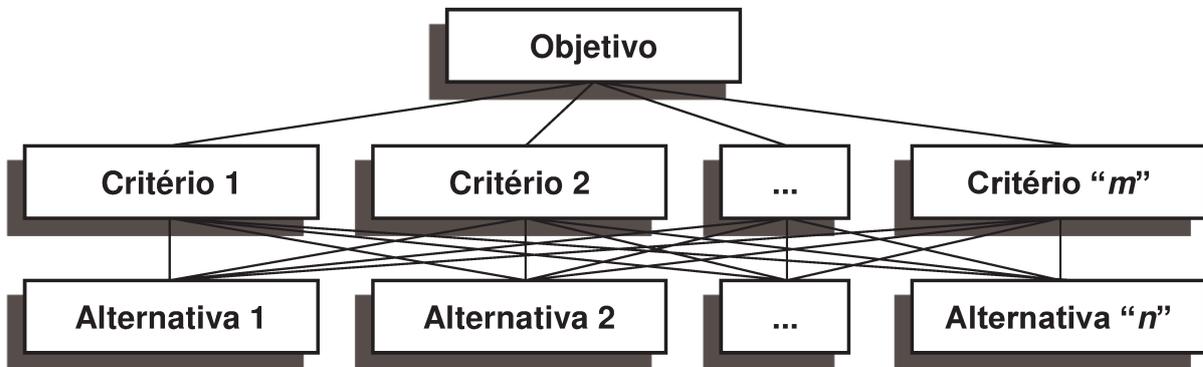
Um dos métodos mais difundidos em MCDA é o processo hierárquico analítico (AHP) que, segundo Belfiore e Fávero (2012), foi proposto pelo Prof. Thomas L. Saaty em 1980 com o intuito de auxiliar processos de tomada de decisão ao dividir um problema multicritério típico em níveis hierarquicamente dispostos, baseando-se na experiência e no conhecimento dos tomadores de decisão envolvidos. Segundo o próprio autor do método, o AHP obtém escalas de razão discretas e contínuas de comparações par-a-par, baseando-se tanto em medidas reais ou – como indicado pelo autor e mais comumente encontrado na literatura – de uma escala fundamental que reflita a intensidade relativa das preferências na comparação interna entre os elementos estruturados em cada grupo, contemplando, em sua amplitude, tanto critérios tangíveis quanto intangíveis (SAATY, 2006).

O objetivo do método, então, é restringir a complexidade de dado problema pela decomposição em fatores que, por sua vez, serão novamente decompostos em subfatores, até que se chegue ao nível mais evidente – onde se encontram as alternativas para o problema. Costa (2002) analisa o método ao apresentá-lo como um raciocínio analítico estruturado nas seguintes etapas, distintas e sequenciais:

- **Estabelecimento de hierarquias:** para uma melhor avaliação do problema envolvido e buscando facilitar sua compreensão, o passo inicial é desenvolver uma estruturação em níveis, visando estabelecer uma representação gráfica, da forma mais completa possível, que considere: o ambiente no qual o problema está inserido; as questões que podem eventualmente contribuir para a sua solução; os elementos participantes, que se relacionam com este problema. Assim, segundo Kengpol (2004), o **nível zero** desta hierarquia deve apresentar o objetivo principal, que seria o ponto de partida para os demais elementos constituintes da análise. O **nível um** engloba os critérios de avaliação, que devem representar os principais aspectos a se considerar no julgamento das alternativas. O **nível dois** cumpre a função de detalhar os critérios do nível um para a obtenção dos seus pesos na tomada de decisão, para converter, de forma estruturada porém não categórica, atributos qualitativos em quantitativos. Assim, obtêm-se um panorama completo das relações que compõem o problema, tornando viável ao tomador de decisão uma avaliação mais

precisa em relação a ordem de grandeza de cada elemento em seu respectivo nível. A Figura 1 exibe a estrutura genérica do método:

Figura 1 – Estrutura hierárquica genérica do método AHP



Fonte: MARINS; SOUZA; BARROS, 2009.

É preciso pontuar que, considerando objetivamente o seu funcionamento, não há limite na quantidade de critérios e alternativas que podem compor o método, porém, como ressalta Colin (2015), é recomendado que esse número não seja superior a 9, salvo haja motivo importante para tal, pois isso multiplicaria o montante de comparações a serem feitas, o que aumentaria a complexidade da tarefa do tomador de decisão e, por consequência, as chances de ocorrer julgamentos inconsistentes.

- **Produção de dados / coleta de julgamentos de valor:** neste estágio, o tomador de decisão deve perceber a relação existente entre os critérios e assim realizar julgamentos par-a-par, comparando elementos que se encontram no mesmo nível hierárquico, para compor uma matriz de julgamentos A que lança mão de uma escala de avaliação que contém 5 pontos precisamente estabelecidos em seu significado e 4 pontos que os intermedeiam. Essa escala é denominada Escala Fundamental de Saaty, e é descrita pela Tabela 1:

Tabela 1 – Escala Fundamental de Saaty

Intensidade da importância em escala absoluta	Definição	Explicação
1	Igual importância	Os dois elementos contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância moderada de um sobre o outro	Experiência e opinião favorecem moderadamente um elemento sobre o outro
5	Importância forte ou essencial	Experiência e opinião favorecem fortemente um elemento sobre o outro
7	Importância muito forte	Um elemento é fortemente favorecido e sua dominância é demonstrada na prática
9	Extrema importância	A evidência que favorece um elemento sobre o outro é da mais alta ordem de afirmação possível
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre dois julgamentos adjacentes	Quando é necessário estabelecer um acordo

Fonte: Adaptado de Saaty (1990, tradução livre).

A construção da matriz de decisão, estabelecida como uma matriz $A = [a_{ij}]$ de ordem $n \times n$ (portanto, trata-se de uma matriz quadrada de dimensão n), obedece às quatro regras seguintes:

$$a_{ij} > 0; \quad (5)$$

$$a_{ij} = 1, \text{ se } i = j; \quad (6)$$

$$a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}; \quad (7)$$

$$a_{ik} = a_{ij} \cdot a_{jk}. \quad (8)$$

para $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, n$ e $k = 1, \dots, n$. A regra exposta na Equação 5 indica que todas as entradas da matriz devem ser positivas; a Equação 6 garante que a diagonal principal da matriz tenha todas as suas entradas iguais a 1; a regra que corresponde à Equação 7 indica que A é uma matriz recíproca; por fim, a Equação 8 garante que A seja uma matriz consistente. Assim, a quantidade de comparações que o tomador de decisão necessitará realizar para compor a matriz é dada por:

$$\frac{n(n-1)}{2}; \quad (9)$$

já que a comparação de cada elemento com ele mesmo já é dada pela

propriedade descrita na Equação 6 e a comparação de um elemento com outro já fornece o valor da comparação oposta, por se tratar de uma matriz recíproca.

- **Análise da consistência lógica:** Saaty (1994) destaca que, apesar da habilidade do ser humano em estabelecer relações coerentes entre objetos ou ideias, o complexo resultante da agregação destas opiniões pode apresentar inconsistências. Por este motivo, se faz necessário calcular a Razão de Consistência dos julgamentos (**RC**), que obedece a Equação 10:

$$RC = \frac{IC}{IR}; \quad (10)$$

na qual **IC** é o índice de consistência, definido pela Equação 11:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}; \quad (11)$$

e **IR** é o índice de consistência randômico, obtido por meio do seguinte procedimento (SAATY, 2016): milhares de matrizes de ordem **n** foram geradas preenchendo-se cada entrada acima da diagonal principal (formada exclusivamente com valores 1) aleatoriamente com os 17 valores possíveis na Escala Fundamental $\left\{\frac{1}{9}, \frac{1}{8}, \dots, \frac{1}{2}, 1, 2, \dots, 8, 9\right\}$ e as entradas abaixo desta diagonal com os recíprocos respectivos (conforme a regra exposta na Equação 7), calculando-se, por fim, o **IC** de cada uma dessas matrizes. De posse dessas simulações, obteve-se a média de todos os **ICs**, estabelecendo-se assim os valores de **IR** conforme expressos na Tabela 2:

Tabela 2 – Índices randômicos para avaliação de consistência

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IR	0,00	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

Fonte: Adaptada de Saaty (2016).

Convencionou-se como aceitável para fins de análise de consistência uma razão de até 10% entre o **IC** e o **IR**, isto é, o valor de **RC** deve ser menor que 0,1. Para valores maiores, é aconselhado ao tomador de decisão rever e/ou reconsiderar sua avaliação, pois a presença de julgamentos inconsistentes pode prejudicar o resultado.

- **Construção do vetor de prioridades:** Saaty (2016) afirma que o AHP fornece um modo de classificar as alternativas para a realização de um julgamento absoluto, isto é, estabelece um índice de prioridade para a escolha da melhor alternativa na consideração de todos os requisitos, ou simplesmente para a aquisição de uma escala de ordenamento. Para tanto, os critérios são inicialmente priorizados por comparações e, em seguida, extrai-se de cada critério uma escala de intensidade relativa que permite estabelecer as prioridades. O mesmo é feito com cada alternativa em seu nível e por fim os pesos de cada etapa são concatenados para a obtenção de um vetor geral de prioridades. O autor sugere um método que utiliza o maior autovetor da matriz para a obtenção do vetor de prioridades, por meio de um sistema de equações lineares dado por $A\mathbf{p} = \lambda_{max}\mathbf{p}$, onde \mathbf{p} é o vetor de prioridades (portanto as variáveis do sistema), e λ_{max} o maior autovalor da matriz de decisão A (as justificativas e comprovações que levam a este sistema é amplamente fornecida por Saaty, mas não cabe aqui entrar nesses meandros). Saaty (2016) também ressalta que, para tornar o vetor \mathbf{p} único, deve-se normalizar os dados de entrada, dividindo-os pela soma total das entradas de \mathbf{p} . Brunelli (2015) destaca que outros métodos de obtenção podem ser encontrados na literatura, mas o método do autovetor é o mais popular, e por esse motivo o mesmo é utilizado neste trabalho, porém com uma pequena variação exposta por Brunelli (2015), que ao invés de normalizar os dados de entrada como sugerido por Saaty (2016), insere no sistema de equações $\mathbf{p}^T \mathbf{1} = 1$, onde $\mathbf{1} = (1, \dots, 1)^T$.

Kengpol (2004) destaca também que o funcionamento coerente do método ainda deve respeitar alguns axiomas, dos quais se destacam:

- **Comparabilidade:** só faz sentido realizar comparações de elementos que são essencialmente comparáveis;
- **Dependência:** há uma dependência direta dos elementos de um nível inferior em relação ao seu respectivo nível superior;
- **Expectativas:** se houver alguma mudança na estrutura hierárquica, é necessário realizar novas avaliações de preferência, pois as relações estabelecidas podem mudar de forma imprevisível.

Em suma, o AHP utiliza comparações pareadas, convertendo em uma

escala de razão as ponderações estabelecidas pelos tomadores de decisão, e validando o processo pelo cálculo da razão de consistência. Sua execução se inicia com o detalhamento da hierarquia da decisão, representando uma visão geral; em seguida, os critérios que devem ser considerados são identificados, assim como as alternativas possíveis para o processo de decisão; na sequência, as comparações são realizadas e geram matrizes cujos elementos respeitam uma escala de comparação de 1 a 9 (que se refere, respectivamente, a “igual importância” e “extrema importância”), para o cálculo dos pesos dos fatores e posterior avaliação dos resultados. Este processo busca retirar – dentro do possível – a subjetividade e gerar maior confiança no estabelecimento de pesos e na decisão (RENDER *et al.*, 2010).

Apesar do AHP ser um método completo desenvolvido para, por si só, auxiliar tomadores de decisão em problemas multicritério, ele tem sido muito utilizado para a eliciação de pesos de critérios para o uso de outros métodos de agregação, como aponta Riabacke, Danielson e Ekenberg (2012). Para Dyer (2016), julgamentos podem ser capturados e analisados usando as ferramentas do AHP, e seus resultados podem fornecer uma ligação entre funções de valor e julgamentos subjetivos, o que já vem sendo realizado em numerosos estudos. No presente trabalho, ele será utilizado para a obtenção dos pesos que serão utilizados pelo método MAVT.

Belton e Stewart (2002) apontam que o MAVT e o AHP são similares em diversos aspectos, são amplamente aplicados e possuem uma quantidade substancial de seguidores. Pela estrutura algébrica do modelo aditivo usado tanto no MAVT quanto no AHP, os parâmetros de peso w_i definem o nível desejado de compensação entre o desempenho dos diferentes critérios, enquanto as medidas de desempenho são dadas pelos valores intracritério $v_i(\alpha)$. Porém, eles diferem em termos de suas premissas fundamentais sobre mensuração de preferências, nos métodos usados para eliciar julgamentos de preferência dos tomadores de decisão, e na maneira de transformar esses julgamentos em valores quantitativos.

Como os valores intracritério aqui utilizados são primordialmente escalas preestabelecidas pela própria natureza do critério (e não exatamente por julgamentos de tomadores de decisão, mas isso não é uma regra), o método de agregação MAVT se adequa satisfatoriamente; os pesos, ao contrário, demandam julgamentos que envolvem certo grau de subjetividade, e por essa razão o método AHP se justifica para a sua eliciação.

2.3 Modelos de resolução do problema de carregamento

Considerando em retrospecto os estudos dedicados ao problema de carregamento de contêiner, inúmeros e variados modelos foram propostos para a sua resolução. Para Bortfeldt e Wäscher (2013), como se trata de uma classe de problemas particularmente difíceis de resolver, pouquíssimos algoritmos exatos existem para se chegar a uma solução. Dois modelos cujos padrões de carregamento podem ser obtidos por meio de algoritmos exatos são sucintamente expostos na próxima seção e, na sequência, heurísticas e meta-heurísticas são abordadas. É importante lembrar que todos os modelos apresentados se prestam à resolução da variação do problema que é foco do presente estudo, a saber, o problema de carregamento tridimensional de um único contêiner ou veículo, de capacidade limitada e inferior à quantidade de caixas a serem embarcadas, visando maximizar o valor ou volume embarcado, ou minimizar os espaços vazios.

2.3.1 Modelos de otimização

O primeiro exemplo de modelo de otimização é apresentado por Junqueira, Morabito e Yamashita (2012): é apresentado como um modelo de programação inteira binária (composto exclusivamente por variáveis 0–1). Assume-se que há m caixas do tipo i – segundo Bortfeldt e Gehring (2001), duas caixas são do mesmo tipo se, dada uma orientação espacial adequada, elas coincidem em todas as três dimensões laterais – de comprimento l_i , largura w_i , altura h_i , valor v_i (valor este que comumente está associado ao próprio volume da caixa, ou seja, $v_i = l_i \cdot w_i \cdot h_i$, mas não necessariamente), e quantidade total b_i , para $i = 1, \dots, m$, que podem ser carregadas no contêiner ou veículo de comprimento L , largura W e altura H , visando maximizar o valor (ou volume) embarcado. Neste modelo, as medidas das caixas, por simplificação, devem ser inteiras e as caixas devem ser alocadas ortogonalmente no contêiner, ou seja, as arestas de cada caixa devem estar paralelas ou perpendiculares aos eixos do contêiner. Igualmente por uma questão de simplificação, a orientação das caixas é fixa (mas é possível também adaptar o modelo para circunstâncias nas quais as caixas possam ser giradas).

O primeiro grupo de parâmetros para o modelo é obtido adotando um sistema de coordenadas cartesianas originado em um dos cantos inferiores do

contêiner, e que indicará todas as possíveis posições das caixas embarcadas, indicando igualmente o canto inferior esquerdo dianteiro de cada uma delas. Assim, com o intuito de tornar o espaço disponível discreto, sem perda de generalidade, determina-se todas as possíveis posições para as coordenadas (x, y, z) ao longo dos eixos L, W, H do contêiner, por meio dos três seguintes conjuntos (um para cada dimensão):

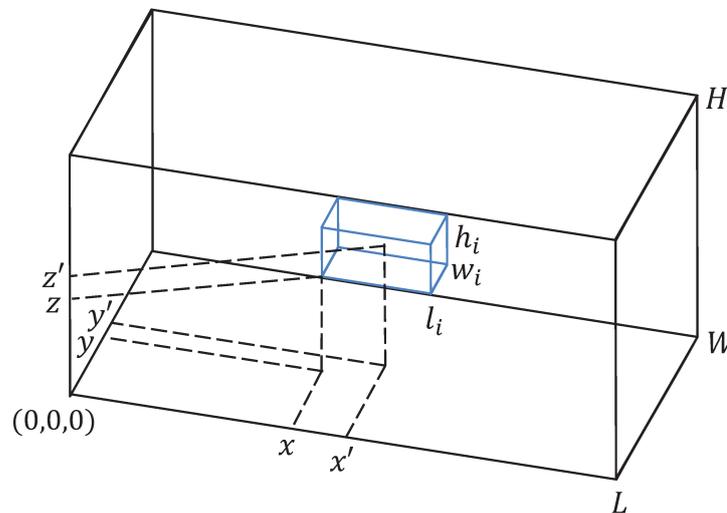
$$X = \{x | x = \sum_{i=1}^m \varepsilon_i l_i, 0 \leq x \leq L - \min_i(l_i), 0 \leq \varepsilon_i \leq b_i, \text{inteiro}, i = 1, \dots, m\} \quad (12)$$

$$Y = \{y | y = \sum_{i=1}^m \varepsilon_i w_i, 0 \leq y \leq W - \min_i(w_i), 0 \leq \varepsilon_i \leq b_i, \text{inteiro}, i = 1, \dots, m\} \quad (13)$$

$$Z = \{z | z = \sum_{i=1}^m \varepsilon_i h_i, 0 \leq z \leq H - \min_i(h_i), 0 \leq \varepsilon_i \leq b_i, \text{inteiro}, i = 1, \dots, m\} \quad (14)$$

Um exemplo de um possível posicionamento de uma caixa dentro do contêiner nas condições supracitadas é ilustrado na Figura 2:

Figura 2 – Exemplo de posicionamento de uma caixa dentro do contêiner



Fonte: Adaptado de Junqueira, Morabito e Yamashita (2012).

Também é necessário garantir que as caixas não sejam sobrepostas, e para isso uma matriz binária deve ser desenvolvida para apontar as posições impeditivas, ou seja: qual coordenada (x', y', z') determinada caixa não deve ocupar caso uma outra caixa estiver em uma coordenada específica (x, y, z) que causaria a sobreposição. Trata-se igualmente de um parâmetro, e não uma variável, e deve ser

computado *a priori*. Então, para $c_{ixyzz'y'z'}$, sendo $i = 1, \dots, m$ e $x, x' \in X, y, y' \in Y, z, z' \in Z$, têm-se:

$$c_{ixyzz'y'z'} \begin{cases} 1 & \text{se } 0 \leq x \leq x' \leq x + l_i - 1 \leq L - 1; \\ & 0 \leq y \leq y' \leq y + w_i - 1 \leq W - 1; \\ & 0 \leq z \leq z' \leq z + h_i - 1 \leq H - 1; \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (15)$$

As variáveis de decisão, como já dito, são binárias e representam a decisão de carregar ou não a caixa no contêiner, dado que $X_i = \{x \in X | 0 \leq x \leq L - l_i\}$, $Y_i = \{y \in Y | 0 \leq y \leq W - w_i\}$, $Z_i = \{z \in Z | 0 \leq z \leq H - h_i\}$, respeitando a relação abaixo:

$$a_{ixyz} \begin{cases} 1 & \text{se uma caixa do tipo } i \text{ é embarcada com} \\ & \text{o canto inferior esquerdo dianteiro} \\ & \text{posicionado na coordenada } (x, y, z) \\ & \text{de tal forma que } 0 \leq x \leq L - l_i, \\ & 0 \leq y \leq W - w_i \text{ e } 0 \leq z \leq H - h_i; \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (16)$$

Desta forma, sem considerar mais nenhuma restrição, o modelo pode ser escrito conforme se segue:

$$\max \sum_{i=1}^m \sum_{x \in X_i} \sum_{y \in Y_i} \sum_{z \in Z_i} v_i a_{ixyz}, \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{x \in X_i} \sum_{y \in Y_i} \sum_{z \in Z_i} c_{ixyzz'y'z'} a_{ixyz} \leq 1, \quad x' \in X, y' \in Y, z' \in Z, \quad (18)$$

$$\sum_{x \in X_i} \sum_{y \in Y_i} \sum_{z \in Z_i} a_{ixyz} \leq b_i, \quad i = 1, \dots, m, \quad (19)$$

$$a_{ixyz} \in \{0, 1\}, \quad i = 1, \dots, m, \quad x \in X_i, y \in Y_i, z \in Z_i. \quad (20)$$

Portanto, a função objetivo exibida na Equação 17 representa a maximização do valor ou volume embarcado, restrita às coordenadas onde é possível posicionar as caixas e à impossibilidade de sobrepô-las. Junqueira, Morabito e Yamashita (2012) destacam que alguns *softwares* são capazes de compilar o modelo sem a necessidade de pré-computar a matriz $c_{ixyzz'y'z'}$ exposta na Equação 18, com uma pequena alteração nesta restrição. Os autores também afirmam que seu modelo pode ser facilmente adaptado para receber restrições de prioridade.

Um segundo modelo com aspiração às soluções exatas é proposto por Egeblad e Pisinger (2009), sendo este um modelo de programação inteira mista. Ele

apresenta algumas semelhanças com o modelo anterior, mas a principal diferença encontra-se na forma de computar as posições: as coordenadas, antes estabelecidas como parâmetros de acordo com os conjuntos que estabeleciam todas as posições possíveis, discretizando o espaço, agora são variáveis contínuas, e a posição das caixas são estabelecidas pela relação entre uma e outra (embaixo, acima, à esquerda, à direita, à frente ou atrás). Assim, as variáveis de decisão são: a_i , variável binária que indica quando uma caixa i é embarcada no contêiner, e (x_i, y_i, z_i) são as variáveis contínuas que representam as coordenadas, nas mesmas condições do modelo já apresentado. Importante destacar que, caso a caixa não seja embarcada, assume-se que $(x_i, y_i, z_i) = (0, 0, 0)$, e esse posicionamento está obviamente sujeito às restrições relativas ao tamanho do contêiner, de forma similar ao modelo anterior:

$$0 \leq x_i \leq W - w_i, 0 \leq y_i \leq H - h_i, 0 \leq z_i \leq D - d_i.$$

Também são introduzidas variáveis binárias l_{ij} (esquerda), r_{ij} (direita), u_{ij} (abaixo), o_{ij} (acima), b_{ij} (atrás) e f_{ij} (à frente), para a indicação do posicionamento relativo das caixas i e j , onde $i < j$. Para evitar a sobreposição, é preciso considerar a restrição $l_{ij} + r_{ij} + u_{ij} + o_{ij} + b_{ij} + f_{ij} = 1$ sempre que $a_i = a_j = 1$. Dependendo desta posição relativa, as coordenadas devem satisfazer as seguintes equações:

$$\begin{aligned} l_{ij} = 1 &\rightarrow x_i + w_i \leq x_j, & r_{ij} = 1 &\rightarrow x_j + w_j \leq x_i, \\ u_{ij} = 1 &\rightarrow y_i + h_i \leq y_j, & o_{ij} = 1 &\rightarrow y_j + h_j \leq y_i, \\ b_{ij} = 1 &\rightarrow z_i + d_i \leq z_j, & f_{ij} = 1 &\rightarrow z_j + d_j \leq z_i. \end{aligned} \quad (21)$$

Portanto, o problema pode ser formulado da seguinte maneira:

$$\max \sum_{i=1}^m v_i a_i, \quad (22)$$

$$l_{ij} + r_{ij} + u_{ij} + o_{ij} + b_{ij} + f_{ij} = a_i + a_j - 1 \quad i, j = 1, \dots, m, \quad (23)$$

$$\begin{aligned} x_i - x_j + W l_{ij} &\leq W - w_i, & i, j &= 1, \dots, m, \\ x_j - x_i + W r_{ij} &\leq W - w_j, & i, j &= 1, \dots, m, \\ y_i - y_j + H u_{ij} &\leq H - h_i, & i, j &= 1, \dots, m, \\ y_j - y_i + H o_{ij} &\leq H - h_j, & i, j &= 1, \dots, m, \\ z_i - z_j + D b_{ij} &\leq D - d_i, & i, j &= 1, \dots, m, \\ z_j - z_i + D f_{ij} &\leq D - d_j, & i, j &= 1, \dots, m, \end{aligned} \quad (24)$$

$$0 \leq x_i \leq W - w_i, 0 \leq y_i \leq H - h_i, 0 \leq z_i \leq D - d_i \quad i = 1, \dots, m, \quad (25)$$

$$\begin{aligned}
l_{ij}, r_{ij}, u_{ij}, o_{ij}, b_{ij}, f_{ij} &\in \{0, 1\}, & i, j = 1, \dots, m, \\
a_i &\in \{0, 1\}, & i = 1, \dots, m, \\
x_i, y_i, z_i &\geq 0, & i = 1, \dots, m.
\end{aligned} \tag{26}$$

A função objetivo (Equação 22) maximiza o valor ou volume embarcado, a restrição que se segue (Equação 23) garante que as caixas i e j serão embarcadas, as seis restrições seguintes (Equações 24) são equivalentes às Equações 21 e as três equações na sequência (Equações 25) são as restrições ao tamanho do contêiner, já citadas. Por fim, as últimas restrições são fornecidas (Equações 26), indicando os limites das variáveis envolvidas.

2.3.2 Modelos heurísticos e meta-heurísticos

Uma quantidade crescente de modelos heurísticos e meta-heurísticos tem sido apresentada para resolver o problema de carregamento de contêiner. Isso porque, como apontam Bortfeldt e Wäscher (2013), apesar de haver progressos significativos no desenvolvimento recente de algoritmos exatos e de aproximação, as heurísticas, e as meta-heurísticas em particular, se mostram como as classes de algoritmos mais importantes na solução dos problemas de carregamento em um futuro próximo, pois somente estas são capazes, até o momento, de prover soluções com qualidade razoável e em tempo computacional aceitável para instâncias do problema de tamanho realista, sobretudo se muitas restrições estão presentes.

As abordagens heurísticas para tais problemas, segundo Zhao *et al.* (2016), são mecanismos para decidir como inserir as caixas no contêiner, buscando obter uma solução inicial que possa integrar uma abordagem mais ampla, comumente meta-heurística. Quando a variedade de caixas – continuam os autores – é fracamente heterogênea (no tocante às suas dimensões) costuma-se optar por carregamento por camadas ou por paredes, enquanto para um carregamento fortemente heterogêneo as caixas são posicionadas uma a uma. Egeblad (2008) igualmente cita como estratégias heurísticas normalmente utilizadas o carregamento por níveis – similar ao carregamento de posicionamento “uma a uma” – e o carregamento por pilhas, camadas e paredes, que para ele são generalizações da primeira estratégia. Hifi (2002) complementa o grupo de heurísticas mais utilizadas citando uma abordagem derivada do problema de corte e empacotamento, que é a utilização de cortes guilhotinados, que também guarda relações com as heurísticas

anteriormente citadas. Os três tipos de abordagem são sucintamente expostos a seguir:

- **Carregamento por níveis (“uma a uma”):** linhas de caixas são construídas a partir do posicionamento de uma caixa no canto inferior esquerdo no fundo do contêiner, dispondo as demais caixas em níveis, da esquerda para a direita e, após a linha completa, de baixo para cima (EGEBLAD, 2008);
- **Carregamento por pilhas, camadas e paredes:** a construção básica de paredes envolve a criação sequencial de fileiras de caixas ao longo do contêiner (considerando sua profundidade); as camadas seguem a mesma lógica, porém tomando a largura do mesmo, enquanto as pilhas se baseiam em sua altura. Para as três variações é importante se levar em conta restrições de estabilidade e normalmente o procedimento agrupa caixas de características semelhantes (ZHAO *et al.*, 2016);
- **Cortes guilhotinados:** como definem Christofides e Whitlock (1977) para os problemas bidimensionais, os cortes são guilhotinados quando seguem de um lado do retângulo até o seu lado oposto. Hifi (2002) explica que as heurísticas para soluções de corte e empacotamento 3D usando cortes guilhotinados são, em geral, compostas por espaços cortados paralelamente à altura, largura e/ou comprimento do próprio contêiner ou nos subcontêineres resultantes de cortes anteriormente feitos neste. São obtidas soluções ótimas em cada uma dessas instâncias – com custo computacional reduzido, por serem menores – e estes padrões de carregamento também podem ser chamados de pilhas, paredes ou camadas. Então, soluções aproximadas do problema completo são obtidas pela combinação dessas partes, formando um padrão de carregamento para todo o contêiner.

Como dito, as heurísticas se prestam a estabelecer soluções iniciais que podem ser aprimoradas por métodos meta-heurísticos. Zhao *et al.* (2016) explica que, apesar das heurísticas oferecerem uma solução rápida e, em muitos casos, de qualidade razoável, ampliar o espaço de busca com a utilização de meta-heurísticas usualmente fornece um ganho significativo. Normalmente, as meta-heurísticas trabalham com uma ou mais soluções completas e realizam movimentos de

vizinhança para encontrar soluções melhores: elas variam em sofisticação, seja aceitando apenas movimentos de aprimoramento ou mesmo trabalhando com os diversos ótimos locais encontrados. Os métodos mais utilizados para este fim, dado o tipo de problema, são: Algoritmos Genéticos (como em BORTFELDT; GEHRING, 2001; JAMRUS; CHIEN, 2016), Busca Tabu (BORTFELDT; GEHRING; MACK, 2003; LIU *et al.*, 2011), GRASP – *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (MARTÍNEZ; ALVAREZ-VALDES; PARREÑO, 2015), e SA – *Simulated Annealing* (FAINA, 2000). Alguns outros métodos também podem ser encontrados na literatura, assim como soluções híbridas, e não cabe no escopo deste trabalho o levantamento de todos mas, de uma forma geral, os métodos supracitados parecem ser os mais difundidos.

3. METODOLOGIA DE PESQUISA

A metodologia de pesquisa utilizada no presente estudo é baseada na aplicação de modelos quantitativos que, conforme definido por Morabito e Pureza (2012), são modelos abstratos descritos em linguagem matemática e/ou computacional, que se valem de técnicas analíticas para calcular valores numéricos que representem propriedades de um dado sistema, permitindo assim vislumbrar resultados de possíveis ações no mesmo. Para isso, um levantamento do referencial teórico é feito logo a seguir, com a finalidade de classificar o método aqui utilizado.

3.1 Classificação do método de pesquisa

Craighead e Meredith (2008), em referência à máxima atribuída a Kurt Lewin de que “não há nada tão prático quanto uma boa teoria”, sustentam que tomadores de decisão também utilizam teorias, porém as empregando como um modelo conceitual que indica o que fazer, quando fazer, como fazer e o que fazer caso o modelo não funcionar. Logo, como ressalta Meredith *et al.* (1989), uma pesquisa baseada em modelos quantitativos parte da premissa de que é possível construir modelos que expliquem pelo menos em parte o comportamento de processos reais, ou que é possível capturar ao menos parte dos problemas de tomada de decisão encontrados nas aplicações práticas. Por essa razão, mesmo a pesquisa baseada em métodos quantitativos – que representa o cerne deste estudo – requer, como aludem Morabito e Pureza (2012), que uma análise qualitativa preceda a análise quantitativa, já que a validação do modelo proposto depende que sua solução tenha coerência com objetivos e restrições do problema real a ser tratado.

Essas duas dimensões são postas em escala por Meredith *et al.* (1989), atribuindo ao papel do pesquisador (aspecto subjetivo) uma caracterização que pode ir do racional (altamente dedutiva, axiomática) ao existencial (indutiva, interpretativa), e para a fonte de dados da pesquisa (aspecto objetivo) uma caracterização do natural (empírica, diretamente observada) ao artificial (uma reconstrução sintética). Então, nos termos da teoria de Meredith, o presente estudo apresenta um caráter **racional**, por lançar mão de modelos de programação matemática, e **artificial**, pois a instância de dados utilizada a título de exemplo é uma base sintética de informações que se presta apenas a testar a aplicabilidade da abordagem.

Já pela classificação proposta por Bertrand e Fransoo (2002), o presente estudo se enquadra na categoria de uma **pesquisa axiomática normativa**. Esse tipo de pesquisa é caracterizado por desenvolver normas, políticas, estratégias e ações, com o intuito de melhorar resultados disponíveis na literatura, encontrar uma solução ótima para um problema novo ou comparar o desempenho de estratégias que tratam de um mesmo problema; em outros termos, é uma pesquisa que se baseia em modelos que prescrevem uma decisão para o problema – em geral, modelos de programação matemática, como é o caso aqui. Na pesquisa axiomática normativa, tanto novos modelos de otimização como variações de modelos existentes podem ser propostos, assim como estudar modelos de otimização conhecidos, mas que propõem novos métodos de resolução ou variações de técnicas de solução já existentes, mas que produzem melhores resultados. A abordagem aqui proposta se adequa bem a esta descrição, pois busca a resolução de um problema clássico, porém com o enfoque em uma restrição de considerável importância prática (aparentemente negligenciada pela literatura em geral no período de alcance da pesquisa), por meio do uso de um *framework* que, em sua composição, permite a combinação de alguns métodos e modelos matemáticos já consagrados. O conceito de *framework* é bastante caro à ciência da computação, no geral, e à engenharia de *software*, em particular, e costuma apresentar variadas definições: segundo Johnson (1997), é uma técnica de reuso de todo ou de parte de um sistema que é representada por um conjunto de classes abstratas de forma que suas instâncias interajam; o mesmo autor o define também como o esqueleto de uma aplicação que pode ser customizada por um desenvolvedor; para Govoni (1999), é uma coleção abstrata de classes, interfaces e padrões dedicados a resolver uma classe de problemas por meio de uma arquitetura extensiva e flexível.

4. ABORDAGEM PROPOSTA

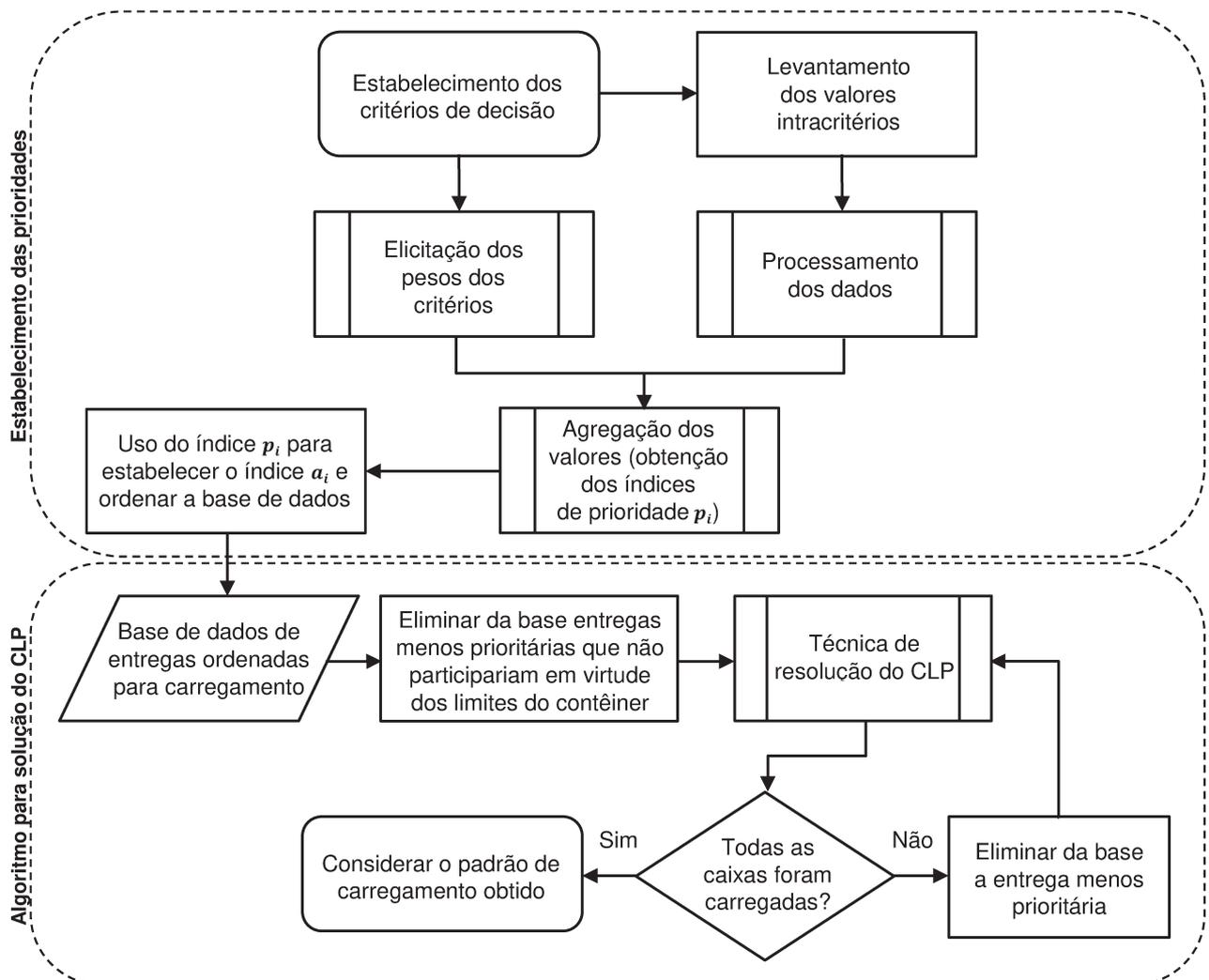
Na sequência a abordagem sugerida neste trabalho é exposta, inicialmente em seus aspectos estruturais e, para verificar sua aplicabilidade, seu uso é demonstrado em uma base de dados sintética.

4.1 *Framework*

O *framework* aqui desenvolvido pode ser mais bem compreendido

considerando sua operação em duas etapas (separadas na Figura 3 pelos processos delimitados pela linha tracejada): inicialmente, ele apresenta um procedimento que visa estabelecer um índice de prioridade relativa que determinará o ordenamento necessário para o carregamento das caixas no contêiner; em seguida, ele exibe um algoritmo que utiliza um determinado método de resolução do CLP (*Container Loading Problem*) para obter um padrão de carregamento que abarque satisfatoriamente as prioridades pré-estabelecidas. Essas duas etapas que o compõem serão detalhadas nas duas seções seguintes. A árvore de decisão que o representa está exposta na Figura 3:

Figura 3 – *Framework* para resolução do CLP considerando prioridades relativas de embarque



Fonte: Desenvolvimento próprio.

O *framework* intenta permitir a combinação de métodos distintos para a obtenção dos índices de prioridade e também para a solução do CLP com ênfase no

ordenamento oriundo desses índices. Além do estabelecimento dos critérios e o levantamento ou produção dos valores das alternativas para cada um desses critérios serem próprios de cada aplicação específica, as técnicas de elicitação dos pesos dos critérios, de normalização de dados, de agregação desses valores e de solução do problema de carregamento podem ser escolhidas de acordo com a adequação ao cenário e/ou a própria afinidade do tomador de decisão, o que busca garantir certo grau de generalidade ao *framework*.

4.1.1 Estabelecimento das prioridades

A primeira etapa do *framework* é composta de um procedimento formado por métodos de auxílio à decisão multicritério, que permite a obtenção de um índice de prioridade relativa p_i para cada entrega i a ser carregada. Ao ordenar as entregas por esse índice de forma decrescente, obtêm-se um índice de prioridade absoluta a_i , também para cada entrega i , que estabelece um ordenamento para o carregamento com base nos critérios relevantes para o tomador de decisão.

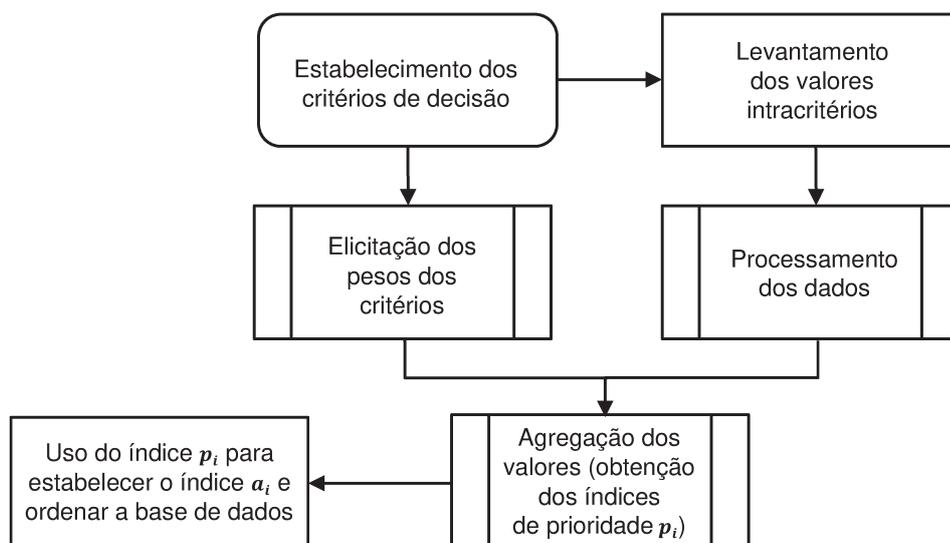
Bischoff e Ratcliff (1995, p.380, tradução livre) sugerem como proposta de utilização – porém sem apresentar nenhum algoritmo de implementação, como notaram Bortfeldt e Wäscher (2013) – que um índice de prioridade relativa como o aqui sugerido poderia ser considerado como o **custo** de um problema clássico da mochila: “prioridades relativas de carregamento, por exemplo, podem ser vistas simplesmente como coeficientes da função objetivo de um modelo de mochila, que define ou ajusta os valores dos itens”. No entanto, o *framework* proposto neste trabalho utiliza o índice p_i como norteador para a obtenção do índice a_i , que será o parâmetro de entrada do método de carregamento para a resolução do CLP. Assim, por uma questão de opção, o ordenamento resultante do método aqui empregado deve ser estritamente seguido, de modo que não se permita o carregamento de caixas de índice a_i em posição inferior (portanto menos prioritárias) em detrimento de outras de índice a_i em posição superior (de maior prioridade). Logo, no nível de obtenção do índice, a lógica multicritério estabelece prioridades relativas, mas assim que o modelo ascende ao nível do carregamento, a prioridade passa a ser absoluta, nos próprios termos definidos por Bischoff e Ratcliff (1995).

Essa escolha pode se justificar pelo fato do índice p_i , na forma como é obtido, obedecer a uma escala intervalar e, por isso, não conservar relações de

cardinalidade. É possível também apontar uma vantagem nesse procedimento, pois as restrições específicas do contêiner (como limites máximos de peso, volume ou valor monetário) podem ser suprimidas do método de resolução do CLP e usadas em uma etapa anterior – de preparação de dados –, de uma maneira mais simples, do ponto de vista da complexidade computacional, pois, como o ordenamento já está disponível, é possível delimitar previamente a região onde a combinação das restrições de contêiner com as restrições de prioridade delimita a factibilidade de determinadas soluções.

Assim, a primeira etapa do *framework* proposto é dada pelas seguintes ações: estabelecimento de critérios relevantes à determinação das prioridades; levantamento (ou produção, dependendo da natureza do critério) dos valores de cada alternativa para cada critério; normalização desses valores e, em paralelo, eliciação dos pesos – ou constantes de escala – dos critérios; ponderação dos valores pelo peso e agregação pelo método multicritério para o estabelecimento dos índices de prioridade relativa p_i ; e a indução a um ordenamento decrescente de prioridade das entregas a serem carregadas, pelos valores globais resultantes do método multicritério (os próprios índices p_i), e associação de cada uma dessas entregas a um índice de prioridade absoluta a_i , definido pela posição da entrega no *ranking* de prioridade. O recorte específico dessa parte do *framework* encontra-se na Figura 4, logo abaixo:

Figura 4 – Estabelecimento das prioridades (primeira parte do *framework*)



Fonte: Desenvolvimento próprio.

Os índices α_i , portanto, norteiam a segunda etapa do *framework*, conforme exposto na sequência.

4.1.2 Algoritmo para solução do CLP

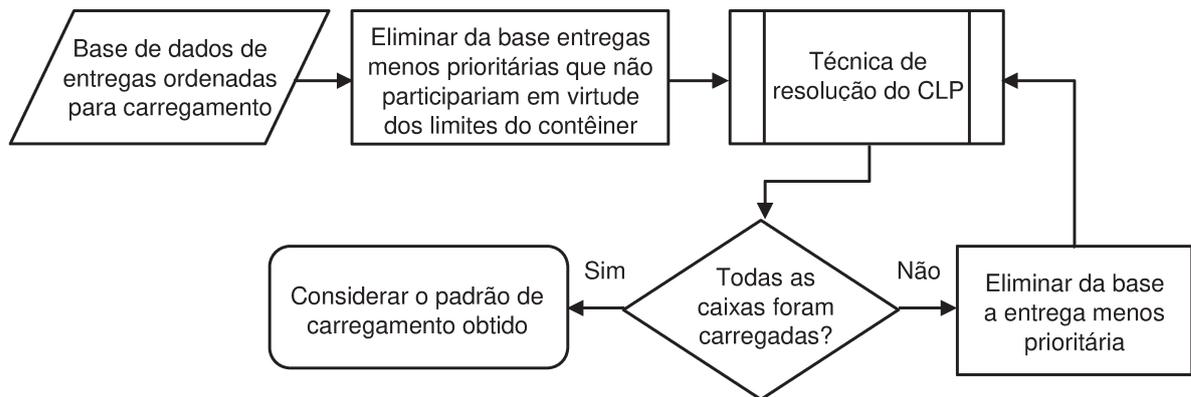
Uma vez obtido o índice de prioridade absoluta α_i , é necessário utilizar um método que efetive o carregamento: o *framework* aqui exposto busca permitir a aplicação de variadas técnicas de resolução do CLP.

Tipicamente, tal método tem como objetivo maximizar a taxa de ocupação do contêiner (ou minimizar espaços ociosos, o que leva ao mesmo resultado) e pode, inclusive, considerar outras variáveis de ordem prática, como exposto na Seção 2.1: a sequência de entregas (roteirização), empilhamento e orientação das caixas, limites físicos do contêiner (peso e volume máximos) ou financeiros (valor mercantil embarcado, para cobertura securitária), entre outros.

Alguns métodos utilizam conceitos de otimização combinatória, que podem tornar a solução computacionalmente inviável para instâncias com um número grande de caixas ou com muitas restrições. Por isso, também é comum nesta etapa a aplicação de heurísticas que procurem captar as necessidades práticas do problema e reduzir a complexidade computacional do método.

A alternativa proposta neste trabalho é que a base de dados das entregas a serem embarcadas seja truncada, *a priori*, com base no ordenamento e nas limitações do contêiner. Ainda assim, é possível que alguns métodos de resolução do CLP obtenham um padrão de carregamento que não garanta o embarque total dessa nova lista de entregas mais prioritárias, ao considerar as outras restrições que o norteiam. Para fazer valer essa condição, uma pequena rotina é sugerida, para que a entrega menos prioritária seja retirada do processo de carregamento caso o mesmo não seja completo, e uma nova tentativa de solução se realize, repetindo-se o processo até que o carregamento seja completo e, portanto, essa condição também é a regra de parada do algoritmo. A representação desta pequena rotina encontra-se logo a seguir, na Figura 5:

Figura 5 – Algoritmo para resolução do CLP (segunda parte do *framework*)



Fonte: Desenvolvimento próprio.

Com o intuito de exemplificar o uso do *framework* proposto neste estudo, apresenta-se na próxima seção uma aplicação do mesmo, que lança mão de métodos específicos e de uma base de dados sintética.

4.2 Aplicação

Um exemplo de aplicação é desenvolvido na sequência, cujos critérios e alternativas são baseados em situação hipotética, norteadas por observações assistemáticas oriundas de experiências próprias do autor – a saber, 13 anos de atuação na gestão de transporte de encomendas em nível nacional, tendo como parte das atribuições o acompanhamento diário do carregamento de caminhões de entrega –, com o intento de demonstrar a aplicabilidade do *framework* sugerido. A sequência de ações segue abaixo, respeitando os passos que compõem esse *framework*.

4.2.1 Estabelecimento dos critérios de decisão

Sete critérios de decisão norteiam o ordenamento das prioridades de entrega no presente estudo, dos quais três apresentam uma relação de dependência com a posição relativa ao prazo (a condição da entrega em relação ao prazo no momento da decisão), representada pela variável inteira x nas funções abaixo especificadas:

- **Posição relativa ao prazo:** na prática dos serviços de entrega, muitas vezes as encomendas disponíveis para embarque possuem prazos que podem estar adiantados ou atrasados. Isso pode ser acarretado por não conformidades na produção, má previsão do *lead time*, problemas de

transbordo, etc. A condição efetiva de cada entrega está diretamente ligada à sensibilidade do cliente e, por essa razão, ela mesma é disposta em um critério, com sugestão de peso elevado. Seu valor é estabelecido subtraindo a data de entrega prometida da data atual, o que expressará em quantos dias a entrega está adiantada ou atrasada, ou se está no prazo exato. Assim, o adiantamento é dado em números inteiros negativos, a entrega na data prevista retorna o valor zero, e o atraso é dado em números inteiros positivos. Por exemplo, se a previsão de entrega é para o dia 20/04 e a mercadoria está disponível para carregamento dia 18/04, então a posição de entrega é -2 (que é o resultado de $18 - 20$). Trata-se da própria variável x supracitada, porém seus valores devem ser normalizados para melhor adequação ao método de auxílio à decisão multicritério utilizado;

- **Valor do frete:** cada entrega possui um valor de frete associado, e parte das punições legalmente associadas a um atraso de entrega, como multas e indenizações, estão vinculadas a este valor. Por esse motivo, ele será levado em consideração no modelo proposto, cuja importância deve ser ponderada conforme o grau de dispersão entre eles, ou seja: se os valores são relativamente parecidos, este critério não deve representar grande diferença entre as alternativas, por óbvio, e o tomador de decisão deve ter isso em conta ao estabelecer o peso deste critério;
- **Tipo de mercadoria:** há produtos que, pela sua própria característica, devem ser entregues o quanto antes, havendo níveis de percepção desta eficiência. Autopeças e equipamentos de informática, por exemplo, normalmente envolvem a solicitação da mercadoria após o aceite da manutenção de algum veículo ou computador, e por isso a velocidade é imprescindível. Para vestuários e calçados que seguem para o varejo, normalmente o tempo de exposição na vitrine aumenta o giro de vendas, mas como as lojas possuem cada vez menos estoques (por uma questão de custo), sua percepção é mais voltada para a programação feita, o que pode fazer de uma entrega antecipada um problema. O atraso é quase sempre inconveniente, mas é possível apurar em qual segmento é mais crítico: um medicamento ou material para cirurgia, uma peça de reposição diante de uma produção parada em uma indústria, ou alguma entrega

atrelada à multa contratual (no caso de algumas licitações do governo) são exemplos. A ordem de prioridade pode ser dada pela indicação de um especialista ou por reunião de consenso de um grupo de tomadores de decisão, em uma escala de 0 a 1, onde 0 representa uma mercadoria sem prioridade, 0,25 uma prioridade baixa, 0,50 prioridade média, 0,75 para alta prioridade e 1 para um produto de urgência absoluta. Sugere-se que, por sua natureza, o peso deste critério seja elevado, para que mercadorias emergenciais sejam embarcadas com alto grau de probabilidade;

- **Perecibilidade:** alguns produtos possuem prazos de entrega críticos por características físicas (como materiais biológicos de alguns tipos) ou de programação (materiais promocionais e brindes personalizados para um evento, que não terão uso após a data do mesmo). Assim, tais produtos “perecíveis” devem ser priorizados, e também são classificados de forma binária, sendo 0 para os materiais não perecíveis e 1 para os materiais perecíveis, com sugestão de um peso mais elevado em virtude da urgência;
- **Sensibilidade específica do remetente:** o cliente contratante de entregas específicas pode ter exigências próprias, como contratos com multa vinculada a um determinado percentual de assertividade. Pelo provável risco financeiro, sugere-se ter peso elevado. É expresso de forma binária, condicionado ao prazo de entrega conforme função abaixo, forçando o carregamento se estiver no prazo exato ou atrasado:

$$f_1(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \geq 0 \\ 0, & \text{se } x < 0 \end{cases}, \quad x \in \mathbb{Z}; \quad (27)$$

- **Pagante do frete:** existe um componente psicológico que faz com que entregas com frete a pagar tenham uma expectativa maior de eficiência por parte do destinatário do que uma entrega com frete pago pelo remetente. Normalmente, remetentes são grandes indústrias ou distribuidores que trabalham com indicadores de *performance* e, de sua perspectiva, um atraso apenas comporá um índice mensal. De perspectiva distinta, o destinatário que contrata o transporte é usualmente um varejo, escritório ou cliente final, e caso sua encomenda atrase, este único evento pode representar até 100% de seu recebimento mensal, pela quantidade

demandada. Assim, fretes a pagar tendem a ter maior expectativa de eficiência por parte do destinatário já que sua percepção do custo deste transporte é mais representativa por ser menos frequente. Desta forma, deve-se realizar uma classificação binária, sendo 0 para o frete CIF (*Cost, Insurance and Freight* – pago pelo remetente) e 1 para o frete FOB (*Free On Board* – pago pelo destinatário), com o estabelecimento sugerido de um peso médio;

- **Prazo do concorrente:** se há alguma encomenda antecipadamente disponível para entrega, porém dentro do prazo prometido por algum concorrente, pode ser importante antecipá-la para apresentar uma *performance* competitiva. Pode ser uma restrição fraca – pois nem sempre tal tipo de comparação é acessível ao cliente –, mas há cenários em que pode ser um critério relevante (como em uma das aplicações aqui expostas): então, por uma questão de competitividade, os prazos do concorrente também podem influenciar a priorização, diante da possível comparação. Eles seguem a função abaixo, onde y_1 é o prazo nominal da empresa focal e y_2 o prazo nominal da empresa concorrente:

$$f_2(x) = x + (y_1 - y_2), \quad x \in \mathbb{Z}, \quad y_1 \in \mathbb{Z}, \quad y_2 \in \mathbb{Z}; \quad (28)$$

Importante destacar que é possível usar quaisquer outros critérios que melhor se adaptarem às necessidades específicas de cada problema: tanto os critérios quanto as sugestões de peso se prestam a apresentar a aplicabilidade desta abordagem, demonstrando o uso em um caso particular, e foram elaborados de forma assistemática, com base na experiência profissional do autor. A ressalva a ser feita é que os valores, sejam eles quais forem, devem ser normalizados, já que este é o procedimento mais adequado ao método de agregação utilizado.

4.2.2 Elicitação dos pesos dos critérios

Para a obtenção de uma matriz de comparação par-a-par que permita a elicitação dos pesos dos critérios a simples título de aplicabilidade, foram simulados valores de forma assistemática, cumprindo os requisitos da formulação do método AHP exposta na Seção 2.2.5 e considerando os critérios da Seção 3.3.1. Os resultados são apresentados na Tabela 3:

Tabela 3 – Exemplo de matriz de comparação par-a-par

	Prazo	Frete	Mercad.	Pereciv.	Sensib.	Pagante	Concor.
Prazo	1	3	3	2	7	3	1/2
Frete	1/3	1	4	1/3	4	4	1/2
Mercad.	1/3	1/4	1	1/4	3	2	1/7
Pereciv.	1/2	3	4	1	4	2	1/4
Sensib.	1/7	1/4	1/3	1/4	1	2	1/8
Pagante	1/3	1/4	1/2	1/2	1/2	1	1/9
Concor.	2	2	7	4	8	9	1

Fonte: Desenvolvimento próprio.

Portanto, a título de exemplo de interpretação das comparações realizadas, o prazo de entrega apresenta uma importância moderadamente maior em comparação ao valor do frete (valor 3) e uma forte importância em relação à sensibilidade do cliente ao prazo de entrega (valor 7).

A Razão de Consistência (**RC**) para os valores da Tabela 3 é de **0,0798**, que torna os dados adequados para a elicitação dos pesos por ser inferior a 0,1, conforme convencionado por Saaty (2016). Os pesos obtidos a partir do Método do Autovetor para agregação das prioridades são exibidos na Tabela 4:

Tabela 4 – Pesos obtidos por meio do Método do Autovetor

	Prazo	Frete	Mercad.	Pereciv.	Sensib.	Pagante	Concor.
Peso	0,2167	0,1282	0,0585	0,1577	0,0374	0,0408	0,3606

Fonte: Desenvolvimento próprio.

Tanto a Razão de Consistência quanto os pesos dos critérios foram calculados por meio do *software* Matlab, versão R2016a, e os códigos que compõem a função desenvolvida para tal fim constam no Apêndice A deste trabalho. Esta função oferece também, como alternativa, o Método de Normalização e Médias para apuração dos pesos, porém o Método do Autovetor foi escolhido para esse exemplo por se tratar daquele sugerido pelo próprio autor do AHP (SAATY, 2016), e com o intuito de conferir proximidade com a forma original de aplicação.

4.2.3 Elicitação / levantamento dos valores intracritérios

A elicitação dos dados intracritérios, ou seja, os valores que cada alternativa apresenta em cada critério estabelecido, respeita as regras sugeridas na Seção 3.3.1, e os valores de prioridade atribuídos por tipo de mercadoria também foram estimados de acordo com experiências do autor, buscando estabelecer uma

classificação verossímil, que permita a aplicabilidade da abordagem assim como faria algum tomador de decisão. Os valores para este critério em específico seguem a Tabela 5, descrita na sequência:

Tabela 5 – Valores de prioridade por tipo de mercadoria

	Autopeças	Brindes	Calçados	CDs e DVDs	Informática	Livros	Medicam.	Vestuários
Valor	0,75	0,50	0,50	0,50	0,75	0,00	1,00	0,25

Fonte: Desenvolvimento próprio.

O conjunto completo dos dados produzidos, em seu estado bruto, pode ser encontrado no Apêndice B do presente trabalho. Lá é possível identificar – por entrega e_i , sendo $i = 1, \dots, n$, e $n = 103$ (número total de entregas disponíveis para esse carregamento) – as seguintes informações: a data estabelecida como prazo de entrega, o valor do frete em reais, o segmento de mercado ao qual pertence a mercadoria, a indicação se o material é perecível, se há sensibilidade específica do cliente ao prazo de entrega, qual a modalidade de pagamento de frete (CIF ou FOB), a data do prazo de entrega nominal oferecido pelo concorrente, as dimensões da caixa em centímetros (largura, altura e profundidade), o volume da caixa em metros cúbicos e o peso em quilos.

4.2.4 Processamento dos dados

A base de dados numérica resultante, obtida pela conversão dos valores brutos conforme as funções apresentadas na Seção 3.3.1 e na Tabela 5, encontra-se no Apêndice C. Os dados obtidos na etapa anterior tiveram seus valores devidamente normalizados por meio do método min-max, exibido na Seção 2.2.3, para que a agregação possa ser aplicada dentro de uma escala comum. Esta conversão foi feita com o auxílio do *software* Microsoft Excel 2016.

4.2.5 Agregação dos valores (prioridades relativas e absolutas)

O próximo passo é a utilização dos pesos obtidos e dos valores intracritérios normalizados no processo de agregação pela forma clássica do método MAVT descrita na Seção 2.2.2. O resultado da aplicação do método também é exposto no Apêndice C, e obtido igualmente pela utilização do *software* Microsoft Excel 2016. O veículo designado para tanto possui capacidade máxima de 1.700 kg

de carga e 12,54 m³ de volume (considerando um baú de medidas 3,00 x 1,90 x 2,20 m). O espaço ocupado pela soma do volume das caixas não ultrapassa o espaço disponível para carregamento, porém o limite de peso estabelece o carregamento máximo das 97 entregas mais prioritárias (identificadas após a ordenação fornecida pela etapa de estabelecimento das prioridades): como eram 103 entregas ao total, 6 delas foram excluídas da base de dados nessa etapa. A Tabela 6 exhibe os resultados:

Tabela 6 – Entregas ordenadas por prioridade, limitadas pelo peso máximo do caminhão

Entrega	Volume (m ³)	Volume (Soma Acum.)	Peso (kg)	Peso (Soma Acum.)	Índice de Prioridade Relativa (p _i)	Índice de Prioridade Absoluta (a _i)
e ₁	0,1146	0,1146	12,075	12,075	0,629471927	1
e ₄	0,1189	0,2335	12,121	24,196	0,627208792	2
e ₂	0,1195	0,3530	12,098	36,294	0,612755935	3
e ₄₇	0,1163	0,4693	20,079	56,373	0,600158836	4
e ₆	0,1166	0,5859	12,098	68,471	0,58095657	5
e ₇₆	0,1215	0,7074	28,359	96,830	0,578220109	6
e ₁₇	0,1121	0,8196	18,239	115,069	0,577589629	7
e ₁₄	0,1142	0,9338	12,052	127,121	0,567054547	8
e ₅₇	0,1121	1,0459	12,121	139,242	0,550125133	9
e ₁₈	0,1241	1,1700	12,121	151,363	0,544024712	10
e ₃	0,1146	1,2846	12,098	163,461	0,539956726	11
e ₁₁	0,1097	1,3943	12,075	175,536	0,53833157	12
e ₇	0,1195	1,5138	12,098	187,634	0,526383404	13
e ₁₆	0,1193	1,6330	16,399	204,033	0,502458182	14
e ₁₉	0,1193	1,7523	12,075	216,108	0,501146332	15
e ₆₀	0,1269	1,8792	12,075	228,183	0,488016696	16
e ₃₀	0,1121	1,9913	9,200	237,383	0,485616463	17
e ₃₂	0,1265	2,1178	21,942	259,325	0,4756	18
e ₇₃	0,1240	2,2418	12,512	271,837	0,467250133	19
e ₁₅	0,1167	2,3585	16,353	288,190	0,464682771	20
e ₄₀	0,1193	2,4778	9,200	297,390	0,456525577	21
e ₈₂	0,1167	2,5946	28,267	325,657	0,452625133	22
e ₉	0,1118	2,7063	12,052	337,709	0,45205657	23
e ₈₃	0,1267	2,8330	28,428	366,137	0,451684058	24
e ₅	0,1167	2,9498	12,075	378,212	0,451058182	25
e ₉₄	0,1163	3,0661	26,036	404,248	0,447883393	26
e ₄₁	0,1118	3,1779	21,965	426,213	0,44485857	27
e ₁₂	0,1146	3,2924	12,052	438,265	0,439894876	28
e ₇₇	0,1215	3,4139	28,267	466,532	0,43235308	29
e ₆₄	0,1121	3,5261	22,977	489,509	0,43044184	30
e ₇₀	0,1145	3,6406	9,200	498,709	0,428483614	31
e ₄₆	0,1246	3,7651	20,102	518,811	0,422434058	32
e ₂₀	0,1142	3,8793	12,121	530,932	0,420343264	33
e ₆₂	0,1192	3,9986	12,098	543,030	0,420016264	34
e ₂₂	0,1189	4,1175	12,075	555,105	0,41685	35
e ₇₈	0,1221	4,2395	28,290	583,395	0,411657993	36
e ₇₄	0,1293	4,3688	28,336	611,731	0,40623984	37
e ₈	0,1192	4,4880	12,075	623,806	0,396883182	38
e ₄₉	0,1293	4,6173	28,451	652,257	0,395767207	39
e ₂₄	0,1189	4,7362	18,285	670,542	0,385874712	40
e ₇₅	0,1170	4,8532	28,382	698,924	0,384035027	41
e ₇₂	0,1097	4,9629	21,827	720,751	0,383991741	42
e ₃₄	0,1146	5,0775	9,177	729,928	0,381967032	43
e ₂₇	0,1166	5,1941	9,154	739,082	0,380549933	44

Entrega	Volume (m³)	Volume (Soma Acum.)	Peso (kg)	Peso (Soma Acum.)	Índice de Prioridade Relativa (p _i)	Índice de Prioridade Absoluta (a _i)
e ₁₀	0,1215	5,3156	12,052	751,134	0,379949712	45
e ₅₃	0,1121	5,4277	12,098	763,232	0,378097665	46
e ₆₁	0,1164	5,5441	12,052	775,284	0,376325044	47
e ₂₆	0,1267	5,6708	9,177	784,461	0,372266619	48
e ₂₅	0,1215	5,7923	18,998	803,459	0,369100355	49
e ₆₈	0,1189	5,9112	10,120	813,579	0,364359581	50
e ₇₁	0,1097	6,0209	13,409	826,988	0,362391874	51
e ₅₁	0,1242	6,1451	28,336	855,324	0,357816741	52
e ₃₈	0,1242	6,2693	9,177	864,501	0,355991829	53
e ₆₉	0,1215	6,3908	14,858	879,359	0,355683393	54
e ₈₁	0,1169	6,5076	28,359	907,718	0,3531998	55
e ₅₄	0,1121	6,6197	12,098	919,816	0,351725133	56
e ₃₁	0,1193	6,7390	9,200	929,016	0,351543264	57
e ₅₂	0,1238	6,8627	12,098	941,114	0,351330069	58
e ₃₇	0,1145	6,9772	21,942	963,056	0,347766874	59
e ₅₈	0,1241	7,1013	12,075	975,131	0,347367572	60
e ₂₉	0,1142	7,2155	8,878	984,009	0,347008637	61
e ₄₈	0,1166	7,3322	23,138	1007,147	0,343500178	62
e ₄₂	0,1218	7,4540	21,942	1029,089	0,341058393	63
e ₃₅	0,1164	7,5704	9,200	1038,289	0,337601578	64
e ₈₀	0,1244	7,6947	28,336	1066,625	0,337100133	65
e ₄₅	0,1238	7,8185	16,307	1082,932	0,333544553	66
e ₁₃	0,1191	7,9375	12,075	1095,007	0,332011406	67
e ₇₉	0,1142	8,0517	28,244	1123,251	0,330854925	68
e ₆₃	0,1146	8,1663	10,212	1133,463	0,330623288	69
e ₈₇	0,1217	8,2881	21,436	1154,899	0,329816741	70
e ₆₇	0,1191	8,4071	10,189	1165,088	0,329633415	71
e ₂₈	0,1097	8,5168	9,200	1174,288	0,328370098	72
e ₉₃	0,1146	8,6314	26,036	1200,324	0,326583204	73
e ₂₃	0,1164	8,7478	18,239	1218,563	0,325619876	74
e ₉₅	0,1167	8,8645	26,059	1244,622	0,325074778	75
e ₃₃	0,1121	8,9767	9,177	1253,799	0,324124922	76
e ₅₉	0,1166	9,0933	12,144	1265,943	0,320033348	77
e ₃₆	0,1188	9,2121	9,200	1275,143	0,319275111	78
e ₆₅	0,1163	9,3285	10,166	1285,309	0,312650178	79
e ₉₂	0,1240	9,4524	26,220	1311,529	0,311991718	80
e ₅₀	0,1097	9,5621	28,382	1339,911	0,311808393	81
e ₂₁	0,1097	9,6718	12,098	1352,009	0,3062231	82
e ₈₉	0,1238	9,7956	26,105	1378,114	0,305775089	83
e ₉₉	0,1163	9,9119	26,082	1404,196	0,304258614	84
e ₈₈	0,1097	10,0216	17,894	1422,090	0,295962261	85
e ₄₃	0,1167	10,1384	21,896	1443,986	0,29398337	86
e ₈₆	0,1213	10,2597	21,137	1465,123	0,293283437	87
e ₅₅	0,1193	10,3789	12,098	1477,221	0,290783348	88
e ₁₀₀	0,1145	10,4934	28,359	1505,580	0,288974933	89
e ₈₅	0,1244	10,6177	24,150	1529,730	0,282925133	90
e ₈₄	0,1171	10,7348	23,713	1553,443	0,274391741	91
e ₉₁	0,1118	10,8466	26,220	1579,663	0,272258393	92
e ₅₆	0,1143	10,9609	12,075	1591,738	0,270600089	93
e ₉₀	0,1241	11,0849	26,036	1617,774	0,269516763	94
e ₃₉	0,1142	11,1992	9,223	1626,997	0,266333393	95
e ₁₀₂	0,1189	11,3181	28,244	1655,241	0,256698976	96
e ₄₄	0,1214	11,4395	21,896	1677,137	0,252858614	97

Fonte: Desenvolvimento próprio.

É possível que, nesta etapa, uma grande quantidade de entregas fique de fora do roteiro, o que pode sugerir ser necessário redimensionar o caminhão ou mesmo a frota, já que a demanda comportaria mais veículos. Este *trade-off* entre o custo da utilização de um caminhão de maior porte ou a ampliação da frota e a absorção dos atrasos nas entregas e suas consequências econômicas deve ser ponderado pelo tomador de decisão, e o ordenamento, mesmo nesse passo anterior ao carregamento, já pode apresentar informação relevante para tal intento.

4.2.6 Aplicação do ordenamento ao CLP

Pelo porte do exemplo aqui utilizado – trata-se de um veículo para distribuição urbana de encomendas, que apresenta uma quantidade reduzida de entregas em virtude da própria característica dos centros urbanos onde se localizam os destinos –, será utilizado um modelo de resolução próprio para versões genéricas do problema de carregamento de contêiner, cujo programa, escrito em linguagem C e livre para uso acadêmico, está disponível online (PISINGER, 2007) e contém mecanismos exatos em sua formulação, sendo indicado para instâncias cujo número de caixas é inferior a 100. Ele funciona conforme o segundo exemplo exposto na Seção 2.3.1, mas sua referência direta encontra-se no artigo de Martello *et al.* (2007): em linhas gerais, o programa busca realizar um carregamento ortogonal de dado conjunto de caixas retangulares em um número mínimo de contêineres tridimensionais de tamanho preestabelecido.

Como já dito, a utilização do ordenamento para a eliminação, pelas limitações do caminhão, de entregas que participariam do processo de decisão em um típico problema de carregamento de contêiner, além de permitir vislumbrar de antemão a relação entre a demanda de entregas e a capacidade produzida disponível para atendê-la, reduz a complexidade computacional por limitar a base de dados utilizada pelas abordagens de resolução – sejam de otimização ou heurísticas –, o que conseqüentemente pode ampliar o leque de soluções disponíveis por reduzir o conjunto de soluções factíveis porém impraticáveis do ponto de vista estratégico, além de diminuir os tempos de processamento, o que também viabiliza aplicações práticas que teriam esse fator como impedor.

Na aplicação aqui apresentada, o programa utilizado para a solução do problema (PISINGER, 2007) lança mão das entregas pré-selecionadas pela

Com esse padrão de carregamento, há um aproveitamento de 97,37% do peso disponível e 96,09% do espaço do contêiner. Como a base de dados foi obtida artificialmente, optou-se por estabelecer uma variedade de caixas levemente heterogênea no que tange as suas dimensões, que variam aleatoriamente para baixo em relação a um divisor exato das medidas do contêiner. Desta forma, as caixas possuem largura entre 46 e 50 cm, altura de 45 a 47 cm e profundidade de 53 a 55 cm. Tal procedimento – de adaptar embalagens às medidas de paletes, baús ou espaços no estoque – está em consonância com a prática em muitos segmentos de mercado, o que torna a base de dados, apesar de aleatória, verossímil.

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

À primeira vista, o *framework* funcionou de forma bastante satisfatória em relação ao resultado obtido, uma vez que o índice de ocupação é bastante expressivo (97,37% do peso, 96,09% do espaço), e apenas 7 caixas não participaram do carregamento, o que representa apenas 6,8% do total. Porém, é prudente identificar quais características desta aplicação contribuíram para esse sucesso, uma vez que possíveis variações podem não atingir o mesmo patamar:

- **Método de resolução do CLP:** como o *framework* comporta métodos de resolução diversos, é razoável supor que cada um deve ter um desempenho próprio em determinado cenário, e verificar qual deles se enquadra melhor ao problema que se busca solucionar é requerido. Como na aplicação aqui exposta o método escolhido (o algoritmo proposto por Martello *et al.* (2007) para resolução de versões genéricas do CLP) demonstrou alta sinergia com o tipo de carregamento a se produzir, os resultados acompanharam essa compatibilidade. Um exemplo disso é o fato do algoritmo ser indicado para instâncias de dados de até 100 caixas, e a aplicação aqui sugerida possuir 97 caixas candidatas ao carregamento em sua base;
- **Homogeneidade das caixas:** quanto mais distintos forem os formatos das caixas, mais complexa é a geração de um padrão de carregamento e, por conseguinte, maior chance de ocorrência de espaços ociosos considerando o uso de algumas soluções. A baixa heterogeneidade da base de dados aqui utilizada contribuiu para um melhor resultado, e para testar essa afirmação, foram promovidas alterações na medida das caixas na base de dados em que o carregamento completo foi obtido, com aumentos e reduções de 1 a 2 cm, porém mantendo o mesmo volume total de 11,318 m³ (essa nova base encontra-se detalhada no Apêndice G): mesmo com o mesmo volume, o carregamento completo só foi obtido com 88 caixas, ou seja, 8 caixas a menos que o resultado da aplicação original e com quase 1 m³ a mais de ociosidade;
- **Entregas de lote unitário:** na base de dados gerada nessa aplicação, todas as entregas possuem apenas uma caixa, mas na prática é comum encontrar lotes com múltiplos volumes vinculados a uma única entrega.

Essa condição também pode ter contribuído para um bom desempenho da aplicação, visto que a associação de caixas para carregamento demandaria a consideração de outro tipo de restrição, o que alteraria o procedimento interno do modelo de resolução do CLP. Tal fato não compromete a aplicabilidade da abordagem aqui proposta, pois as alterações permanecem no âmbito do método de resolução, e não de algum passo específico do algoritmo;

- **Outras restrições:** o exemplo empregado não leva em consideração outras restrições comuns que podem reduzir o índice geral de ocupação e que podem ser encontradas em problemas similares, como limites de empilhamento, posição da caixa no contêiner (em virtude da roteirização das entregas), entre muitas outras.

Como já dito, o objetivo ao se estabelecer prioridades relativas é justamente promover o carregamento das entregas mais importantes do ponto de vista estratégico (na visão do tomador de decisão). Por esse motivo, é necessário estender a análise para além dos percentuais de aproveitamento, que podem ser considerados secundários diante do objetivo a se atingir. Desta forma, mais do que analisar o **quanto** foi carregado, é preciso avaliar o **que** foi carregado e, por extensão, o que foi preterido por esse procedimento. A Tabela 7 elenca as entregas que não participaram da solução, em ordem decrescente de preferência:

Tabela 7 – Entregas preteridas pela presente abordagem na aplicação proposta

Entrega	Prazo de Entrega	Frete	Tipo de mercadoria	Pereciv.	Sensib.	Pagante do Frete	Prazo do Concor.
e ₄₄	01/09/2018	R\$108,00	Informática	Não	Não	CIF	03/09/2018
e ₁₀₁	03/09/2018	R\$143,35	Vestuários	Não	Não	CIF	01/09/2018
e ₉₇	02/09/2018	R\$40,50	Informática	Não	Não	CIF	02/09/2018
e ₆₆	01/09/2018	R\$54,00	Autopeças	Não	Não	CIF	03/09/2018
e ₉₈	02/09/2018	R\$54,00	CDs e DVDs	Não	Sim	CIF	03/09/2018
e ₉₆	02/09/2018	R\$54,00	Livros	Não	Não	CIF	02/09/2018
e ₁₀₃	03/09/2018	R\$268,06	Informática	Não	Não	CIF	04/09/2018

Fonte: Desenvolvimento próprio.

Nenhuma das entregas que deixaram de ser carregadas estava atrasada, e apenas duas delas passarão a estar no dia seguinte (lembrando que a data vigente do roteiro na aplicação é 01/09/2018), mas ambas estão dois dias adiantadas em relação ao prazo da concorrência; nenhum medicamento, cuja prioridade é a mais alta entre os tipos de mercadoria, deixou de ser embarcado; nenhum material perecível ficou

para trás, tal como nenhum frete a pagar (FOB). Isso reforça a ideia de que o ordenamento realizado pela abordagem está coerente com as prioridades estabelecidas pelo tomador de decisão hipotético, considerando todos os critérios e os seus pesos.

Outra maneira de testar se o *framework* está realmente privilegiando as decisões previamente estabelecidas é replicando todo o processo com outros pesos, isto é, com constantes de escala distintas para os critérios considerados pelo tomador de decisão – mantendo todas as demais variáveis constantes –, para observar o comportamento da abordagem à luz dos resultados obtidos. Com esse intuito, uma nova matriz de decisão foi produzida, conforme a Tabela 8, que por sua vez produziu novas constantes de escala, de acordo com a Tabela 9:

Tabela 8 – Matriz de comparação par-a-par alternativa

	Prazo	Frete	Mercad.	Pereciv.	Sensib.	Pagante	Concor.
Prazo	1	7	1/4	1/5	5	7	7
Frete	1/7	1	1/9	1/9	1/3	3	3
Mercad.	4	9	1	1/2	4	7	7
Pereciv.	5	9	2	1	7	9	9
Sensib.	1/5	3	1/4	1/7	1	5	5
Pagante	1/7	1/3	1/7	1/9	1/5	1	2
Concor.	1/7	1/3	1/7	1/9	1/5	1/2	1

Fonte: Desenvolvimento próprio.

Tabela 9 – Pesos obtidos para julgamentos distintos

	Prazo	Frete	Mercad.	Pereciv.	Sensib.	Pagante	Concor.
Peso	0,1672	0,0393	0,2732	0,3964	0,0759	0,0263	0,0218

Fonte: Desenvolvimento próprio.

Trata-se igualmente de uma matriz consistente ($RC = 0,1$), porém, desta vez, os critérios preponderantes (em relação à importância estabelecida pelo tomador de decisão) são a perecividade do produto e o tipo de mercadoria, que juntos representam 66,96% da importância total dos critérios. Com essa nova configuração, 7 entregas foram retiradas da base em virtude do limite do contêiner (uma a mais em relação ao mesmo procedimento na aplicação originalmente proposta). O padrão de carregamento completo não foi obtido com 96 caixas como na primeira aplicação, então foi necessário retirar mais uma. As entregas preteridas com os novos pesos estão expostas na Tabela 10:

Tabela 10 – Entregas preteridas com o estabelecimento de pesos distintos

Entrega	Prazo de Entrega	Frete	Tipo de mercadoria	Pereciv.	Sensib.	Pagante do Frete	Prazo do Concor.
e ₂₁	01/09/2018	R\$49,88	Livros	Não	Não	CIF	01/09/2018
e ₃₁	01/09/2018	R\$12,47	Livros	Não	Não	CIF	31/08/2018
e ₄₃	01/09/2018	R\$20,80	Livros	Não	Não	CIF	01/09/2018
e ₁₀₁	03/09/2018	R\$143,35	Vestuários	Não	Não	CIF	01/09/2018
e ₅₅	01/09/2018	R\$10,80	Livros	Não	Não	CIF	01/09/2018
e ₁₀₀	02/09/2018	R\$143,35	Livros	Não	Não	CIF	01/09/2018
e ₉₆	02/09/2018	R\$54,00	Livros	Não	Não	CIF	02/09/2018
e ₂₈	01/09/2018	R\$105,94	Livros	Não	Não	CIF	01/09/2018

Fonte: Desenvolvimento próprio.

É possível notar que o tipo de mercadoria foi um fator crítico nesta nova decisão, uma vez que 7 das 11 entregas de livros (o tipo de mercadoria estabelecido como o de menor prioridade) foram suprimidas. Apesar da perecividade ter o maior peso, apenas 5 das 103 entregas da base de dados original possuem essa característica (que é elicitada de forma binária), e por isso não é tão visivelmente preponderante. Na comparação dos dois resultados, evidencia-se a diferença na decisão, já que apenas duas entregas se repetiram entre as caixas não consideradas para carregamento.

Assim como alguns fatores contribuíram para um resultado positivo, algumas ressalvas precisam ser feitas já que, ao longo do desenvolvimento deste estudo, certas características da aplicação foram observadas e são dignas de nota, no intento de refinar a análise e delimitar o alcance do *framework*:

- **Generalidade:** apesar de observada a adequação para o problema de carregamento específico de veículos de entrega, em um exame mental mais amplo e levando-se em conta a abrangência de situações que se enquadram no CLP, é possível que o *framework* proposto não seja eficiente em cenários distintos deste, sendo delegado a futuros estudos adaptações e aprimoramentos, ou mesmo o reconhecimento de sua impropriedade em determinado contexto: um problema de carregamento de múltiplos contêineres, por exemplo, que vise minimizar o número de contêineres utilizados, tem pouca ou nenhuma aderência ao tipo de abordagem apresentada;
- **Trade-off:** não se pode perder de vista o *trade-off* próprio do algoritmo proposto, uma vez que certa ociosidade, no que diz respeito ao

aproveitamento do espaço do contêiner, é aceita sob a justificativa da soberania do ordenamento, o que significa que nenhuma caixa será carregada se alguma outra de prioridade maior não o for, mesmo havendo espaço para tanto. Em problemas como o exposto aqui, que em sua aplicação real envolve questões de roteirização e de tempo útil para o cumprimento de todas as entregas, esse afrouxamento se torna justificável. É possível adaptar a parte do processo de carregamento para maximizar as prioridades e também o aproveitamento do espaço, mas isso acarretaria, como já dito, na perda da noção de escala intervalar produzida pela abordagem multicritério, o que por sua vez colocaria à prova sua concepção, já que seu produto não conserva as relações cardinais necessárias para isso. Em outras palavras, assim como no *ranking* dos jogos olímpicos cem medalhas de prata não sobrepujam uma única medalha de ouro, ou nas prioridades de um hospital, onde o atendimento a um paciente em estado gravíssimo não pode ser preterido em razão do atendimento de três casos graves, esse método não apontaria relações que não sejam estritamente de prioridade entre uma entrega e outra;

- **Adaptabilidade:** é preciso reforçar o caráter estrutural, próprio de todo *framework*, que faz dessa proposta uma ferramenta flexível e adaptável às diversas situações em que o Problema de Carregamento de Contêiner se apresenta: sua personalização a cada necessidade específica não é somente aconselhável, mas também estimulada. Como na aplicação apresentada diversos *softwares* foram utilizados e uma mescla de métodos foi necessária para a sua completa execução, o uso do *framework* pode necessitar do acompanhamento de um especialista ou da implementação em aplicativo de interface amigável e intuitiva, para que o tomador de decisão consiga extrair os resultados apropriadamente.

6. CONCLUSÃO

A utilização de um *framework* que leve em conta a natureza multicriterial do estabelecimento de prioridades relativas de carregamento – sobretudo no universo das entregas de encomendas, onde o exemplo aqui explorado se insere – se mostrou adequada e profícua, sendo possível vislumbrar variadas aplicações. Logo, o objetivo geral deste trabalho foi atingido, tal como os objetivos específicos oriundos desse. É importante, porém, que as limitações discutidas na Seção 5 sejam levadas em conta na eventualidade do uso desta abordagem em outros ambientes e cenários.

Desdobramentos futuros da abordagem aqui oferecida são possíveis de se vislumbrar, e como sugestão para esse fim pode-se considerar:

- O uso de outros métodos multicritério, sejam de agregação, elicitação de pesos ou processamento dos dados;
- A utilização de outros métodos de resolução do CLP;
- O uso dos índices de prioridade relativa, obtidos na primeira parte do *framework*, como coeficientes em um problema da mochila tridimensional, conforme sugerido por Bischoff e Ratcliff (1995);
- A aplicação da abordagem em instâncias de dados distintas, variando em forma, peso, etc.;
- A consideração de outras restrições de ordem prática e possíveis adaptações do *framework* a estas.

Por fim, espera-se que o raciocínio esquemático aqui proposto seja funcional em alguma situação de natureza similar a aqui apresentada, e se isso ocorrer, sobretudo extrapolando sua utilidade para a ordem prática, a expectativa que motivou esse estudo será atingida.

7. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. T. *et al.* **Multicriteria and multiobjective models for risk, reliability and maintenance decision analysis**. v. 231. Springer International Publishing, 2015.
- ATTIG, A.; PERNER, P. The problem of normalization and a normalized similarity measure by online data. **Transactions on Case-Based Reasoning**, v. 4, n. 1, p. 3-17, 2011.
- BALLOU, R. H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos / logística empresarial**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- BELFIORE, P.; FÁVERO, L. P. **Pesquisa operacional para cursos de Administração, Contabilidade e Economia**. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2012.
- BELTON, V.; STEWART, T.J. **Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- BENTHAM, J. **An introduction to the principles of morals and legislation**. Kitchener: Batoche Books, 2000.
- BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Modelling and simulation – operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 3, p. 241-264, 2002.
- BISCHOFF, E. E.; RATCLIFF, M. S. W. Issues in the development of approaches to container loading. **Omega**, v. 23, n. 4, p. 377-390, 1995.
- BORTFELDT, A.; GEHRING, H. Zur Behandlung von Restriktionen bei der Stauraumoptimierung am Beispiel eines genetischen Algorithmus für das Containerbeladeproblem. In: KOPFER, H.; BIERWIRTH, C. (eds.). **Logistik Management - Intelligente I+K Technologien**. Berlin: Springer, 1999.
- BORTFELDT, A.; GEHRING, H. A hybrid genetic algorithm for the container loading problem. **European Journal of Operational Research**, n. 131, p. 143-161, 2001.
- BORTFELDT, A.; GEHRING, H.; MACK, D. A parallel tabu search algorithm for solving the container loading problem. **Parallel Computing**, v. 29, n. 5, p. 641-662, 2003.
- BORTFELDT, A.; WÄSCHER, G. **Container Loading Problems: a State-of-the-Art Review**. n. 120007, FEMM Working Papers. Magdeburg: Otto-von-Guericke University, 2012.
- BORTFELDT, A.; WÄSCHER, G. Constraints in Container Loading: a State-of-the-Art Review. **European Journal of Operational Research**, n. 229, p. 1-20, 2013.
- BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J. **Logística empresarial: o processo de integração da cadeia de suprimento**. São Paulo: Atlas, 2001.
- BRASIL. Casa Civil. **Lei Nº 11.442**, de 5 de janeiro de 2007. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2007/Lei/L11442.htm>. Acesso

em: 07 mai. 2017.

BRUNELLI, M. **Introduction to the Analytic Hierarchy Process**. SpringerBriefs in Operations Research. Springer, 2015. Cap. 2, p. 17-26.

CHOO, U.; SCHONER, B.; WEDLEY, W. C. Interpretation of criteria weights in multicriteria decision making. **Computers & Industrial Engineering**, n. 37, p. 527-541, 1999.

CHRISTOFIDES, N.; WHITLOCK, C. An Algorithm for Two-Dimensional Cutting Problems. **Operations Research**, v. 25, n. 1, p. 30-44, 1977.

COLIN, E. C. **Pesquisa operacional: 170 aplicações em estratégia, finanças, logística, produção, marketing e vendas**. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

COLSON, G.; BRUYN, C. Foreword. In: RODIN, E. Y. (ed.) **Models and methods in Multiple Criteria Decision Making**. Great Britain: Pergamon Press, 1989.

COSTA, H. G. **Introdução ao método de análise hierárquica: análise multicritério no auxílio à decisão**. Niterói: H.G.C., 2002.

CRAIGHEAD, C.W.; MEREDITH, J. Operations management research: evolution and alternative future paths. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 28, n. 8, p. 710-726, 2008.

DELGADO, C.; LAGUNA, M.; PACHECO, J. Minimizing Labor Requirements in a Periodic Vehicle Loading Problem. **Computational Optimization and Applications**, n. 32, p. 299-320, 2005.

DYER, J. S. MAUT - Multiattribute Utility Theory. In: FIGUEIRA, J. R.; GRECO, S.; EHRGOTT, M. (eds.). **Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys**. International Series in Operations Research and Management Science. New York: Springer, 2016. Cap. 7, p. 265-295.

EDWARDS, W.; BARRON, F. H. SMARTS and SMARTER: Improved Simple Methods for Multiattribute Utility Measurement. **Organizational Behavior and Human Decision Processes**, n. 60, p. 306-325, 1994.

EGEBLAD, J. **Heuristics for Multidimensional Packing Problems**. 2008. 238 f. Tese (Doutorado) – Department of Computer Science, University of Copenhagen, Copenhagen, 2008.

EGEBLAD, J.; PISINGER, D. Heuristic approaches for the two- and three-dimensional knapsack packing problem. **Computers & Operations Research**, n. 36, p. 1026-1049, 2009.

FAINA, L. A global optimization algorithm for the three-dimensional packing problem. **European Journal of Operational Research**, n. 126, p. 340-354, 2000.

FIGUEIRA, J. R.; GRECO, S.; EHRGOTT, M. (eds.). **Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys**. International Series in Operations Research and Management Science. New York: Springer, 2016.

- GOMES, L. F. A. M.; ANDRADE, R. M. Performance evaluation in assets management with the AHP. **Pesquisa Operacional**, n. 32, p. 31-53, 2012.
- GOMES, L. F. A. M.; MAURICIO, R. S. D. Projeto multicritério de redes de transportes utilizando o método da contração do cone. **Transportes**, v. 3, n. 2, p. 80-94, 1995.
- GOVONI, D. **Java Application Frameworks**. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- GRANGER, G. G. **A razão**. São Paulo: Difusão Européia do Livro, 1962.
- HARMON, R. L. **Reinventando a distribuição**: logística de distribuição classe mundial. Rio de Janeiro: Campus, 1994.
- HIFI, M. Approximate algorithms for the container loading problem. **International Transactions in Operational Research**, n. 9, p. 747-774, 2002.
- HOBBS, B. F.; CHANKONG, V.; HAMADEH, W. Does choice os Multicriteria Method matter? An experiment in water resources planning. **Water Resources Research**, v. 28, n. 7, p. 1767-1779, 1992.
- HWANG, C. L.; YOON, K. **Multiple attribute decision making**: methods and applications. New York: Springer-Verlag, 1981.
- JAMRUS, T.; CHIEN, C. F. Extended priority-based hybrid genetic algorithm for the less-than-container loading problem. **Computers & Industrial Engineering**, n. 96, p. 227-236, 2016.
- JOHNSON, R. E. Frameworks: (components + patterns). **Communications of the ACM**, v. 40, n. 10, p.39-42, 1997.
- JUNQUEIRA, L.; MORABITO, R.; YAMASHITA, D. S. Three-dimensional container loading models with cargo stability and load bearing constraints. **Computers & Operations Research**, n. 39, p. 74-85, 2012.
- KENGPOL, A. Design of a decision support system to evaluate the investment in a new distribution centre. **International Journal of Production Economics**, n. 90, p. 59-70, 2004.
- LIU, J. *et al.* A novel hybrid tabu search approach to container loading. **Computers & Operations Research**, n. 38, p. 797-807, 2011.
- LIU, J.; SMITH, A. E.; QIAN, D. The vehicle loading problem with a heterogeneous transport fleet. **Computers & Industrial Engineering**, n. 97, p. 137-145, 2016.
- MARINS, C. S.; SOUZA, D. O.; BARROS, M. S. O uso do método de análise hierárquica (AHP) na tomada de decisões gerenciais – um estudo de caso. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL. 41, 2009, Bahia. **Anais...** Bahia, 2009.
- MARTELLO, S. *et al.* Algorithm 864: General and Robot-Packable Variants of the Three-Dimensional Bin Packing Problem. **ACM Transactions on Mathematical Software**, v. 33, n. 1, a. 7, p. 1-12, 2007.

- MARTÍNEZ, D. A.; ALVAREZ-VALDES, R.; PARREÑO, F. A GRASP algorithm for the Container Loading Problem with multi-drop constraints. **Pesquisa Operacional**, n. 35, p. 1-24, 2015.
- MEREDITH, J.R. *et al.* Alternative research paradigms in operations. **Journal of Operations Management**, v. 8, p. 297-326, 1989.
- MONTIS, A. *et al.* Assessing the quality of different MCDA methods. In: GETZNER, M.; SPASH, C.; STAGL, S. (eds). **Alternatives for environmental valuation**. Routledge: Abingdon/Oxon, 2005. Cap. 5, p. 99-133.
- MORABITO, R.; PUREZA, V. Modelagem e Simulação. In: CAUCHICK MIGUEL, P. A. (coord.). **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012. Cap. 8, p. 168-198.
- PATRO, S. G. K.; SAHU, K. K. Normalization: A Preprocessing Stage. **arXiv preprint**, 2015. Disponível em: < <https://arxiv.org/abs/1503.06462>>. Acesso em: 04 jun. 2017.
- PIRES, S. **Gestão da Cadeia de Suprimentos (Supply Chain Management): conceitos, estratégias, práticas e casos**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2009.
- PISINGER, D. **David Pisinger's Optimization Codes**. [S.l.], 2007. Disponível em: <<http://hjemmesider.diku.dk/~pisinger/codes.html>>. Acesso em: 21 fev. 2019.
- PISINGER, D. Heuristics for the container loading problem. **European Journal of Operational Research**, n. 141, p. 382-392, 2002.
- REN, J.; TIAN, Y.; SAWARAGI, T. A priority-considering approach for the multiple container loading problem. **International Journal of Metaheuristics**, v. 1, n. 4, p. 298-315, 2011a.
- REN, J.; TIAN, Y.; SAWARAGI, T. A tree search method for the container loading problem with shipment priority. **European Journal of Operational Research**, n. 214, p. 526-535, 2011b.
- RENDER, B.; STAIR JÚNIOR, R. M.; HANNA, M. E. **Análise quantitativa para administração: com Excel e POM-QM para Windows**. 10. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.
- RIABACKE, M.; DANIELSON, M.; EKENBERG, L. State-of-the-Art Prescriptive Criteria Weight Elicitation. **Advances in Decision Sciences**, v. 2012.
- ROY, B. Paradigms and challenges. In: FIGUEIRA, J. R.; GRECO, S.; EHRGOTT, M. (eds.). **Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys**. International Series in Operations Research and Management Science. New York: Springer, 2016. Cap. 1, p. 3-24.
- ROY, B.; MOUSSEAU, V. A Theoretical Framework for Analysing the Notion of Relative Importance of Criteria. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**, v. 5, p. 145-159, 1996.
- SAATY, T. L. Highlights and critical points in the theory and application of the Analytic

Hierarchy Process. **European Journal of Operational Research**, n. 74, p. 426-447, 1994.

SAATY, T. L. How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. **European Journal of Operational Research**, n. 48, p. 9-26, 1990.

SAATY, T. L. Rank from comparisons and from ratings in the analytic hierarchy / network processes. **European Journal of Operational Research**, n. 168, p. 557-570, 2006.

SAATY, T. L. The Analytic Hierarchy and Analytic Network Processes for the measurement of intangible criteria and for decision-making. In: FIGUEIRA, J. R.; GRECO, S.; EHRGOTT, M. (eds.). **Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys**. International Series in Operations Research and Management Science. New York: Springer, 2016. Cap. 9, p. 345-407.

SARANYA, C.; MANIKANDAN, G. A Study on Normalization Techniques for Privacy Preserving Data Mining. **International Journal of Engineering and Technology**, v. 5, n. 3, p. 2701-2704, 2013.

SRIVASTAVA, J.; CONNOLLY, T.; BEACH, L. R. Do Ranks Suffice? A Comparison of Alternative Weighting Approaches in Value Elicitation. **Organizational Behavior and Human Decision Processes**, v. 63, n. 1, p. 112-116, 1995.

TIAN, T. *et al.* The multiple container loading problem with preference. **European Journal of Operational Research**, n. 248, p. 84-94, 2016.

WANG, N.; LIM, A.; ZHU, W. A multi-round partial beam search approach for the single container loading problem with shipment priority. **International Journal of Production Economics**, n. 145, p. 531-540, 2013.

WEB OF SCIENCE. Coleção Principal. **Thomson Reuters Scientific**. Disponível em: <<https://www.webofknowledge.com/>>. Acesso em: 07 mai. 2017.

YOON, K.; HWANG, C. L. Multiple Attribute Decision Making: an introduction. **Quantitative Applications in the Social Sciences**; n. 07-104, Sage University Papers Series, 1995.

ZHAO, X. *et al.* A comparative review of 3D container loading algorithms. **International Transactions in Operational Research**, n. 23, p. 287-320, 2016.

APÊNDICES

APÊNDICE A: Código em Matlab para estabelecimento dos pesos dos critérios pelo método AHP

```
function elicita_pesos

disp('Elicitação de Pesos dos Critérios - AHP');

%% Inserção da matriz de comparações par-a-par
A = [ 1/1 3/1 3/1 2/1 7/1 3/1 1/2; ...
      1/3 1/1 4/1 1/3 4/1 4/1 1/2; ...
      1/3 1/4 1/1 1/4 3/1 2/1 1/7; ...
      1/2 3/1 4/1 1/1 4/1 2/1 1/4; ...
      1/7 1/4 1/3 1/4 1/1 2/1 1/8; ...
      1/3 1/4 1/2 1/2 1/2 1/1 1/9; ...
      2/1 2/1 7/1 4/1 8/1 9/1 1/1 ];

%% Índices randômicos para avaliação de consistência
IR = [0.00 0.00 0.52 0.89 1.11 1.25 1.35 1.40 1.45 1.49];

%% Número de critérios
n = length(A);

%% Cálculo da Razão de Consistência
RC = ((max(eig(A))-n)/(n-1))/IR(n)

%% Teste de Consistência
if RC <= 0.1
    disp('Matriz consistente - considerar os pesos');
    disp(' ');
else
    disp('Matriz inconsistente - rever avaliações');
    disp(' ');
end

%% Cálculo dos pesos - Método do Autovetor
w1 = sym('w', [1 n]);
assume(w1, 'real');
A1 = A;
A1(diag(true(n,1))) = 1-max(eig(A));
b = zeros(n,1);
b(n+1,:) = 1;
A1(n+1,:) = 1;
w1 = linsolve(A1, b);
disp('Pesos pelo Método do Autovetor');
disp(w1');

%% Cálculo dos pesos - Método de Normalização e Médias
%% Normalização
for i = 1:n
    for j = 1:n
        A2(i,j) = A(i,j)/sum(A(:,j));
    end
end
%% Médias para obter o vetor w
for i = 1:n
    w2(i) = mean(A2(i,:));
end
disp('Pesos pelo Método de Normalização e Médias');
disp(w2);

end
```

APÊNDICE B: Dados brutos para o estabelecimento dos índices de prioridade relativa de embarque

Entrega	Prazo de Entrega	Frete	Tipo de mercadoria	Pereciv.	Sensib.	Pagante do Frete	Prazo do Concor.	Dimensões e volumetria (cm m³)				Peso
								L	A	P	Vol.	
e1	30/08/2018	R\$100,44	Vestuários	Não	Não	CIF	29/08/2018	46	47	53	0,1146	12,075
e2	30/08/2018	R\$144,00	Livros	Não	Não	FOB	30/08/2018	49	46	53	0,1195	12,098
e3	30/08/2018	R\$37,82	Calçados	Não	Não	FOB	31/08/2018	46	47	53	0,1146	12,098
e4	30/08/2018	R\$172,80	Informática	Não	Não	CIF	30/08/2018	47	46	55	0,1189	12,121
e5	30/08/2018	R\$31,18	Autopeças	Não	Não	CIF	01/09/2018	47	46	54	0,1167	12,075
e6	30/08/2018	R\$18,71	Medicamentos	Não	Não	CIF	30/08/2018	48	45	54	0,1166	12,098
e7	31/08/2018	R\$112,18	Informática	Não	Sim	CIF	31/08/2018	49	46	53	0,1195	12,098
e8	31/08/2018	R\$31,18	Informática	Não	Não	CIF	01/09/2018	48	46	54	0,1192	12,075
e9	31/08/2018	R\$19,14	Autopeças	Não	Não	CIF	31/08/2018	46	45	54	0,1118	12,052
e10	31/08/2018	R\$62,35	Vestuários	Não	Não	CIF	01/09/2018	50	45	54	0,1215	12,052
e11	31/08/2018	R\$18,71	Calçados	Não	Não	FOB	30/08/2018	46	45	53	0,1097	12,075
e12	31/08/2018	R\$24,94	CDs e DVDs	Não	Não	CIF	31/08/2018	46	47	53	0,1146	12,052
e13	31/08/2018	R\$56,12	CDs e DVDs	Não	Não	CIF	02/09/2018	49	45	54	0,1191	12,075
e14	31/08/2018	R\$99,76	CDs e DVDs	Sim	Não	CIF	01/09/2018	47	45	54	0,1142	12,052
e15	31/08/2018	R\$124,70	Vestuários	Não	Não	CIF	31/08/2018	47	46	54	0,1167	16,353
e16	31/08/2018	R\$31,18	CDs e DVDs	Não	Não	CIF	30/08/2018	50	45	53	0,1193	16,399
e17	31/08/2018	R\$81,06	Informática	Não	Não	FOB	30/08/2018	46	46	53	0,1121	18,239
e18	31/08/2018	R\$62,35	Medicamentos	Não	Não	CIF	30/08/2018	48	47	55	0,1241	12,121
e19	31/08/2018	R\$142,96	Autopeças	Não	Não	CIF	31/08/2018	50	45	53	0,1193	12,075
e20	31/08/2018	R\$12,47	Vestuários	Não	Não	CIF	31/08/2018	47	45	54	0,1142	12,121
e21	01/09/2018	R\$49,88	Livros	Não	Não	CIF	01/09/2018	46	45	53	0,1097	12,098
e22	01/09/2018	R\$329,90	Livros	Não	Não	CIF	01/09/2018	46	47	55	0,1189	12,075
e23	01/09/2018	R\$24,94	Brindes	Não	Não	CIF	01/09/2018	46	46	55	0,1164	18,239
e24	01/09/2018	R\$62,35	Vestuários	Não	Não	CIF	31/08/2018	47	46	55	0,1189	18,285
e25	01/09/2018	R\$135,00	CDs e DVDs	Não	Não	CIF	01/09/2018	47	47	55	0,1215	18,998
e26	01/09/2018	R\$68,98	Medicamentos	Não	Não	CIF	01/09/2018	49	47	55	0,1267	9,177
e27	01/09/2018	R\$143,35	Livros	Não	Sim	CIF	01/09/2018	48	45	54	0,1166	9,154
e28	01/09/2018	R\$105,94	Livros	Não	Não	CIF	01/09/2018	46	45	53	0,1097	9,200
e29	01/09/2018	R\$116,10	Vestuários	Não	Não	CIF	01/09/2018	50	45	55	0,1238	8,878
e30	01/09/2018	R\$174,53	CDs e DVDs	Não	Não	FOB	31/08/2018	46	46	53	0,1121	9,200
e31	01/09/2018	R\$12,47	Livros	Não	Não	CIF	31/08/2018	47	45	53	0,1121	9,200
e32	01/09/2018	R\$5,40	Calçados	Sim	Não	CIF	01/09/2018	50	46	55	0,1265	21,942
e33	01/09/2018	R\$58,18	Vestuários	Não	Não	CIF	01/09/2018	46	46	53	0,1121	9,177
e34	01/09/2018	R\$93,53	Medicamentos	Não	Não	CIF	01/09/2018	46	47	53	0,1146	9,177
e35	01/09/2018	R\$27,96	Informática	Não	Não	CIF	01/09/2018	47	45	54	0,1142	9,200
e36	01/09/2018	R\$45,90	Vestuários	Não	Não	CIF	01/09/2018	48	45	55	0,1188	9,200
e37	01/09/2018	R\$81,00	Calçados	Não	Não	CIF	01/09/2018	50	45	53	0,1193	21,942
e38	01/09/2018	R\$64,80	Autopeças	Não	Não	CIF	01/09/2018	50	46	54	0,1242	9,177
e39	01/09/2018	R\$27,00	Brindes	Não	Não	CIF	02/09/2018	47	45	54	0,1142	9,223
e40	01/09/2018	R\$216,00	Informática	Não	Não	FOB	01/09/2018	47	47	54	0,1193	9,200
e41	01/09/2018	R\$91,80	Informática	Não	Sim	FOB	01/09/2018	46	45	54	0,1118	21,965
e42	01/09/2018	R\$32,86	Informática	Não	Não	CIF	01/09/2018	48	47	55	0,1241	21,942
e43	01/09/2018	R\$20,80	Livros	Não	Não	CIF	01/09/2018	46	45	53	0,1097	21,896
e44	01/09/2018	R\$108,00	Informática	Não	Não	CIF	03/09/2018	48	46	55	0,1214	21,896
e45	01/09/2018	R\$45,00	CDs e DVDs	Não	Não	CIF	01/09/2018	50	45	55	0,1238	16,307
e46	01/09/2018	R\$270,00	Calçados	Não	Não	CIF	01/09/2018	50	47	53	0,1246	20,102
e47	01/09/2018	R\$189,00	Informática	Sim	Sim	CIF	01/09/2018	47	45	55	0,1163	20,079
e48	01/09/2018	R\$70,20	Calçados	Não	Não	CIF	01/09/2018	48	45	53	0,1145	23,138
e49	01/09/2018	R\$202,50	Brindes	Não	Não	CIF	01/09/2018	50	47	55	0,1293	28,451
e50	01/09/2018	R\$27,00	Vestuários	Não	Não	CIF	01/09/2018	46	45	53	0,1097	28,382
e51	01/09/2018	R\$32,40	Medicamentos	Não	Não	CIF	01/09/2018	46	45	53	0,1097	28,336
e52	01/09/2018	R\$26,75	Autopeças	Não	Não	CIF	01/09/2018	48	47	54	0,1218	12,098
e53	01/09/2018	R\$54,00	CDs e DVDs	Não	Não	FOB	01/09/2018	47	45	53	0,1121	12,098
e54	01/09/2018	R\$54,00	Autopeças	Não	Não	CIF	01/09/2018	49	45	53	0,1169	12,098

Entrega	Prazo de Entrega	Frete	Tipo de mercadoria	Perciv.	Sensib.	Pagante do Frete	Prazo do Concor.	Dimensões e volumetria (cm m³)				Peso
								L	A	P	Vol.	
E55	01/09/2018	R\$10,80	Livros	Não	Não	CIF	01/09/2018	49	45	55	0,1213	12,098
E56	01/09/2018	R\$37,80	Calçados	Não	Não	CIF	02/09/2018	46	46	54	0,1143	12,075
E57	01/09/2018	R\$54,00	Informática	Não	Sim	FOB	30/08/2018	46	46	53	0,1121	12,121
E58	01/09/2018	R\$27,00	Informática	Não	Não	CIF	01/09/2018	48	45	54	0,1166	12,075
E59	01/09/2018	R\$10,80	Brindes	Não	Não	CIF	01/09/2018	48	45	54	0,1166	12,144
E60	01/09/2018	R\$16,20	Livros	Sim	Sim	CIF	01/09/2018	50	47	54	0,1269	12,075
E61	01/09/2018	R\$21,60	Autopeças	Não	Sim	CIF	01/09/2018	46	46	55	0,1164	12,052
E62	01/09/2018	R\$263,88	CDs e DVDs	Não	Não	CIF	01/09/2018	48	46	54	0,1192	12,098
E63	01/09/2018	R\$37,61	Calçados	Não	Não	CIF	01/09/2018	47	46	53	0,1146	10,212
E64	01/09/2018	R\$149,98	Informática	Não	Não	FOB	01/09/2018	46	46	53	0,1121	22,977
E65	01/09/2018	R\$70,20	Medicamentos	Não	Não	CIF	02/09/2018	47	45	55	0,1163	10,166
E66	01/09/2018	R\$54,00	Autopeças	Não	Não	CIF	03/09/2018	47	47	55	0,1215	16,928
E67	01/09/2018	R\$35,10	Brindes	Não	Não	CIF	01/09/2018	49	45	54	0,1191	10,189
E68	01/09/2018	R\$55,00	CDs e DVDs	Não	Não	CIF	01/09/2018	46	46	55	0,1164	10,120
E69	01/09/2018	R\$27,00	Medicamentos	Não	Não	CIF	01/09/2018	50	46	54	0,1242	14,858
E70	01/09/2018	R\$108,00	Medicamentos	Não	Não	FOB	01/09/2018	48	45	53	0,1145	9,200
E71	01/09/2018	R\$81,00	Informática	Não	Não	CIF	01/09/2018	46	47	55	0,1189	13,409
E72	01/09/2018	R\$32,40	Autopeças	Não	Não	FOB	01/09/2018	46	45	53	0,1097	21,827
E73	01/09/2018	R\$54,00	Medicamentos	Não	Não	FOB	31/08/2018	49	46	55	0,1240	12,512
E74	01/09/2018	R\$76,88	CDs e DVDs	Não	Não	CIF	31/08/2018	50	47	55	0,1293	28,336
E75	01/09/2018	R\$209,82	Vestuários	Não	Não	CIF	01/09/2018	48	46	53	0,1170	28,382
E76	01/09/2018	R\$191,12	Medicamentos	Sim	Não	CIF	01/09/2018	47	47	55	0,1215	28,359
E77	01/09/2018	R\$221,07	Medicamentos	Não	Não	CIF	01/09/2018	47	47	55	0,1215	28,267
E78	01/09/2018	R\$205,70	Autopeças	Não	Não	CIF	01/09/2018	49	47	53	0,1221	28,290
E79	01/09/2018	R\$75,21	Vestuários	Não	Não	CIF	01/09/2018	47	45	54	0,1142	28,244
E80	01/09/2018	R\$54,00	Brindes	Não	Não	CIF	01/09/2018	49	47	54	0,1244	28,336
E81	01/09/2018	R\$94,75	Calçados	Não	Não	CIF	01/09/2018	47	47	55	0,1215	28,359
E82	01/09/2018	R\$54,00	Autopeças	Não	Não	FOB	31/08/2018	47	46	54	0,1167	28,267
E83	01/09/2018	R\$270,00	Medicamentos	Não	Não	CIF	01/09/2018	49	47	55	0,1267	28,428
E84	02/09/2018	R\$32,40	Calçados	Não	Não	CIF	01/09/2018	47	47	53	0,1171	23,713
E85	02/09/2018	R\$54,00	Calçados	Não	Não	CIF	01/09/2018	48	45	53	0,1145	24,150
E86	02/09/2018	R\$43,20	Informática	Não	Não	CIF	01/09/2018	46	47	54	0,1167	21,137
E87	02/09/2018	R\$32,40	Informática	Não	Não	FOB	01/09/2018	49	46	54	0,1217	21,436
E88	02/09/2018	R\$34,57	CDs e DVDs	Não	Não	CIF	01/09/2018	49	47	54	0,1244	17,894
E89	02/09/2018	R\$37,80	Medicamentos	Não	Não	CIF	01/09/2018	50	45	55	0,1238	26,105
E90	02/09/2018	R\$40,50	Autopeças	Não	Sim	CIF	02/09/2018	48	47	55	0,1241	26,036
E91	02/09/2018	R\$27,00	Brindes	Não	Não	CIF	01/09/2018	46	45	54	0,1118	26,220
E92	02/09/2018	R\$24,30	Calçados	Não	Não	FOB	01/09/2018	49	46	55	0,1240	26,220
E93	02/09/2018	R\$201,53	Vestuários	Não	Não	CIF	01/09/2018	46	47	53	0,1146	26,036
E94	02/09/2018	R\$27,00	Informática	Não	Não	FOB	30/08/2018	47	45	55	0,1163	26,036
E95	02/09/2018	R\$86,65	Medicamentos	Não	Não	CIF	01/09/2018	46	47	54	0,1167	26,059
E96	02/09/2018	R\$54,00	Livros	Não	Não	CIF	02/09/2018	50	47	54	0,1269	25,714
E97	02/09/2018	R\$40,50	Informática	Não	Não	CIF	02/09/2018	48	46	54	0,1192	26,059
E98	02/09/2018	R\$54,00	CDs e DVDs	Não	Sim	CIF	03/09/2018	47	47	55	0,1215	26,013
E99	02/09/2018	R\$108,00	CDs e DVDs	Não	Não	CIF	01/09/2018	47	45	55	0,1163	26,082
E100	02/09/2018	R\$143,35	Livros	Não	Não	CIF	01/09/2018	50	45	53	0,1193	28,359
E101	03/09/2018	R\$143,35	Vestuários	Não	Não	CIF	01/09/2018	48	46	55	0,1214	28,336
E102	03/09/2018	R\$288,71	Autopeças	Não	Não	FOB	03/09/2018	46	47	55	0,1189	28,244
E103	03/09/2018	R\$268,06	Informática	Não	Não	CIF	04/09/2018	49	45	54	0,1191	28,290
TOTAIS		R\$8.791,79									12,1691	1828,477

Data do roteiro: 01/09/2018 | Medidas do baú: 3,00 x 1,90 x 2,20 m | Volumetria do baú: 12,54 m³ | Capacidade: 1.700 kg

APÊNDICE C: Base numérica normalizada e cálculo dos índices de prioridade relativa e seus respectivos ordenamentos

Entrega	Prazo de Entrega	Frete	Tipo de mercadoria	Pereciv.	Sensibil.	Pagante do Frete	Prazo do Concorrente	Índice de Prioridade Relativa (p _i)	Índice de Prioridade Absoluta (a _i)
Peso	0,2167	0,1282	0,0585	0,1577	0,0374	0,0408	0,3606		
e1	1,0000	0,2929	0,2500	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,629471927	1
e2	1,0000	0,4271	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,8333	0,612755935	3
e3	1,0000	0,0999	0,5000	0,0000	0,0000	1,0000	0,6667	0,539956726	11
e4	1,0000	0,5159	0,7500	0,0000	0,0000	0,0000	0,8333	0,627208792	2
e5	1,0000	0,0794	0,7500	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,451058182	25
e6	1,0000	0,0410	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,8333	0,58095657	5
e7	0,7500	0,3290	0,7500	0,0000	1,0000	0,0000	0,6667	0,526383404	13
e8	0,7500	0,0794	0,7500	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,396883182	38
e9	0,7500	0,0423	0,7500	0,0000	0,0000	0,0000	0,6667	0,452228186	23
e10	0,7500	0,1755	0,2500	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,379949712	45
e11	0,7500	0,0410	0,5000	0,0000	0,0000	1,0000	0,8333	0,53833157	12
e12	0,7500	0,0602	0,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,6667	0,439894876	28
e13	0,7500	0,1563	0,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,332011406	67
e14	0,7500	0,2908	0,5000	1,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,567054547	8
e15	0,7500	0,3677	0,2500	0,0000	0,0000	0,0000	0,6667	0,464682771	20
e16	0,7500	0,0794	0,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,8333	0,502458182	14
e17	0,7500	0,2331	0,7500	0,0000	0,0000	1,0000	0,8333	0,577589629	7
e18	0,7500	0,1755	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,8333	0,544024712	10
e19	0,7500	0,4239	0,7500	0,0000	0,0000	0,0000	0,6667	0,501146332	15
e20	0,7500	0,0218	0,2500	0,0000	0,0000	0,0000	0,6667	0,420343264	33
e21	0,5000	0,1371	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,3062231	82
e22	0,5000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,41685	35
e23	0,5000	0,0602	0,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,325619876	74
e24	0,5000	0,1755	0,2500	0,0000	0,0000	0,0000	0,6667	0,385874712	40
e25	0,5000	0,3994	0,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,369100355	49
e26	0,5000	0,1959	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,372266619	48
e27	0,5000	0,4251	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,5000	0,380549933	44
e28	0,5000	0,3098	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,328370098	72
e29	0,5000	0,3411	0,2500	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,347008637	58
e30	0,5000	0,5212	0,5000	0,0000	0,0000	1,0000	0,6667	0,485616463	17
e31	0,5000	0,0218	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,6667	0,351543264	56
e32	0,5000	0,0000	0,5000	1,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,4756	18
e33	0,5000	0,1626	0,2500	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,324124922	76
e34	0,5000	0,2716	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,381967032	43
e35	0,5000	0,0695	0,7500	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,341437654	61
e36	0,5000	0,1248	0,2500	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,319275111	78
e37	0,5000	0,2330	0,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,347766874	57
e38	0,5000	0,1830	0,7500	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,355991829	52
e39	0,5000	0,0666	0,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,266333393	95
e40	0,5000	0,6490	0,7500	0,0000	0,0000	1,0000	0,5000	0,456525577	21
e41	0,5000	0,2663	0,7500	0,0000	1,0000	1,0000	0,5000	0,44485857	27
e42	0,5000	0,0846	0,7500	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,34337347	60
e43	0,5000	0,0475	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,294733993	85
e44	0,5000	0,3162	0,7500	0,0000	0,0000	0,0000	0,1667	0,252858614	97
e45	0,5000	0,1220	0,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,333544553	66
e46	0,5000	0,8154	0,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,422434058	32
e47	0,5000	0,5658	0,7500	1,0000	1,0000	0,0000	0,5000	0,600158836	4
e48	0,5000	0,1997	0,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,343500178	59
e49	0,5000	0,6074	0,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,395767207	39
e50	0,5000	0,0666	0,2500	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,311808393	81
e51	0,5000	0,0832	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,357816741	51
e52	0,5000	0,0658	0,7500	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,340959626	63
e53	0,5000	0,1498	0,5000	0,0000	0,0000	1,0000	0,5000	0,377900133	46
e54	0,5000	0,1498	0,7500	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,351725133	55

Entrega	Prazo de Entrega	Frete	Tipo de mercadoria	Pereciv.	Sensibil.	Pagante do Frete	Prazo do Concorrente	Índice de Prioridade Relativa (p _i)	Índice de Prioridade Absoluta (a _i)
E55	0,5000	0,0166	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,290783348	87
E56	0,5000	0,0998	0,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,270600089	93
E57	0,5000	0,1498	0,7500	0,0000	1,0000	1,0000	0,8333	0,550125133	9
E58	0,5000	0,0666	0,7500	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,341058393	62
E59	0,5000	0,0166	0,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,320033348	77
E60	0,5000	0,0333	0,0000	1,0000	1,0000	0,0000	0,5000	0,488016696	16
E61	0,5000	0,0499	0,7500	0,0000	1,0000	0,0000	0,5000	0,376325044	47
E62	0,5000	0,7965	0,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,420016264	34
E63	0,5000	0,0992	0,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,330623288	69
E64	0,5000	0,4455	0,7500	0,0000	0,0000	1,0000	0,5000	0,43044184	30
E65	0,5000	0,1997	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,312650178	79
E66	0,5000	0,1498	0,7500	0,0000	0,0000	0,0000	0,1667	0,231525133	100
E67	0,5000	0,0915	0,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,329633415	71
E68	0,5000	0,1528	0,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,337495198	64
E69	0,5000	0,0666	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,355683393	53
E70	0,5000	0,3162	1,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,5000	0,428483614	31
E71	0,5000	0,2330	0,7500	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,362391874	50
E72	0,5000	0,0832	0,7500	0,0000	0,0000	1,0000	0,5000	0,383991741	42
E73	0,5000	0,1498	1,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,6667	0,467250133	19
E74	0,5000	0,2203	0,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,6667	0,40623984	37
E75	0,5000	0,6300	0,2500	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,384035027	41
E76	0,5000	0,5723	1,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,578220109	6
E77	0,5000	0,6646	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,43235308	29
E78	0,5000	0,6173	0,7500	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,411657993	36
E79	0,5000	0,2151	0,2500	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,330854925	68
E80	0,5000	0,1498	0,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,337100133	65
E81	0,5000	0,2753	0,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,3531998	54
E82	0,5000	0,1498	0,7500	0,0000	0,0000	1,0000	0,6667	0,452625133	22
E83	0,5000	0,8154	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,451684058	24
E84	0,2500	0,0832	0,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,274391741	91
E85	0,2500	0,1498	0,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,282925133	89
E86	0,2500	0,1165	0,7500	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,293283437	86
E87	0,2500	0,0832	0,7500	0,0000	0,0000	1,0000	0,5000	0,329816741	70
E88	0,2500	0,0899	0,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,275249031	90
E89	0,2500	0,0998	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,305775089	83
E90	0,2500	0,1082	0,7500	0,0000	1,0000	0,0000	0,3333	0,269516763	94
E91	0,2500	0,0666	0,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,272258393	92
E92	0,2500	0,0582	0,5000	0,0000	0,0000	1,0000	0,5000	0,311991718	80
E93	0,2500	0,6044	0,2500	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,326583204	73
E94	0,2500	0,0666	0,7500	0,0000	0,0000	1,0000	0,8333	0,447883393	26
E95	0,2500	0,2504	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,325074778	75
E96	0,2500	0,1498	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,193575133	102
E97	0,2500	0,1082	0,7500	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,232116763	99
E98	0,2500	0,1498	0,5000	0,0000	1,0000	0,0000	0,1667	0,200125133	101
E99	0,2500	0,3162	0,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,304258614	84
E100	0,2500	0,4251	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,288974933	88
E101	0,0000	0,4251	0,2500	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,249424933	98
E102	0,0000	0,8730	0,7500	0,0000	0,0000	1,0000	0,1667	0,256698976	96
E103	0,0000	0,8094	0,7500	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,147641053	103

APÊNDICE D: *Output* obtido na resolução do problema proposto, gerado pelo programa utilizado, considerando a base de dados de 97 caixas

```

3DBPP PROBLEM database.txt 0 100000 0 0
3DBPP PROBLEM 97 0 0 0 100000 0 0
ITERLIMIT
1 : lb 1 z 2 node 0 iter 100000 time 666.06
97 (300,190,220)
0 (46 47 53) : Bin 1 (95, 141, 55)
1 (47 46 55) : Bin 1 (243, 46, 0)
2 (49 46 53) : Bin 1 (195, 0, 55)
3 (47 45 55) : Bin 1 ( 0, 135, 165)
4 (48 45 54) : Bin 1 ( 0, 90, 165)
5 (47 47 55) : Bin 2 (190, 141, 0)
6 (46 46 53) : Bin 1 (46, 139, 55)
7 (47 45 54) : Bin 1 (245, 135, 110)
8 (46 46 53) : Bin 1 (145, 138, 55)
9 (48 47 55) : Bin 2 (190, 94, 0)
10 (46 47 53) : Bin 1 (95, 94, 55)
11 (46 45 53) : Bin 1 (245, 90, 110)
12 (49 46 53) : Bin 1 (145, 92, 55)
13 (50 45 53) : Bin 1 ( 0, 45, 165)
14 (50 45 53) : Bin 1 ( 0, 0, 165)
15 (50 47 54) : Bin 1 (47, 0, 0)
16 (46 46 53) : Bin 1 (145, 46, 55)
17 (50 46 55) : Bin 1 (145, 0, 55)
18 (49 46 55) : Bin 1 (243, 0, 0)
19 (47 46 54) : Bin 1 (196, 0, 0)
20 (47 47 54) : Bin 1 ( 0, 94, 0)
21 (47 46 54) : Bin 1 ( 0, 141, 0)
22 (46 45 54) : Bin 1 (245, 45, 110)
23 (49 47 55) : Bin 2 (190, 47, 0)
24 (47 46 54) : Bin 1 (97, 138, 0)
25 (47 45 55) : Bin 1 (245, 0, 110)
26 (46 45 54) : Bin 1 (199, 0, 110)
27 (46 47 53) : Bin 1 (95, 47, 55)
28 (47 47 55) : Bin 2 (239, 141, 0)
29 (46 46 53) : Bin 1 (46, 93, 55)
30 (48 45 53) : Bin 1 (149, 135, 110)
31 (50 47 53) : Bin 1 (95, 0, 55)
32 (47 45 54) : Bin 1 (149, 90, 110)
33 (48 46 54) : Bin 1 (97, 92, 0)
34 (46 47 55) : Bin 2 (239, 94, 0)
35 (49 47 53) : Bin 1 (46, 0, 55)
36 (50 47 55) : Bin 2 (239, 47, 0)
37 (48 46 54) : Bin 1 (146, 138, 0)
38 (50 47 55) : Bin 2 (239, 0, 0)
39 (47 46 55) : Bin 1 (146, 92, 0)
40 (48 46 53) : Bin 1 (46, 47, 55)
41 (46 45 53) : Bin 1 ( 0, 137, 55)
42 (46 47 53) : Bin 1 ( 0, 0, 55)
43 (48 45 54) : Bin 1 (149, 45, 110)
44 (50 45 54) : Bin 1 (149, 0, 110)
45 (47 45 53) : Bin 1 ( 0, 135, 110)
46 (46 46 55) : Bin 2 ( 0, 94, 0)
47 (49 47 55) : Bin 2 (190, 0, 0)
48 (47 47 55) : Bin 2 (143, 0, 0)
49 (46 47 55) : Bin 2 ( 0, 47, 0)
50 (46 45 53) : Bin 1 ( 0, 92, 55)
51 (50 46 54) : Bin 1 (146, 46, 0)
52 (50 46 54) : Bin 1 (146, 0, 0)
53 (47 47 55) : Bin 2 (46, 141, 0)
54 (49 45 53) : Bin 1 (99, 135, 110)
55 (47 45 53) : Bin 1 (99, 90, 110)
56 (50 45 53) : Bin 1 (99, 45, 110)
57 (50 45 55) : Bin 1 (99, 0, 110)

```

```
58 (48 45 53) : Bin 1 (49, 135, 110)
59 (48 47 55) : Bin 2 (46, 94, 0)
60 (47 45 54) : Bin 1 (49, 90, 110)
61 (48 45 54) : Bin 1 (49, 45, 110)
62 (48 47 54) : Bin 2 (46, 47, 0)
63 (46 46 55) : Bin 2 (143, 139, 0)
64 (49 47 54) : Bin 2 (94, 141, 0)
65 (50 45 55) : Bin 1 (49, 0, 110)
66 (49 45 54) : Bin 1 (0, 90, 110)
67 (47 45 54) : Bin 1 (0, 45, 110)
68 (47 46 53) : Bin 1 (97, 46, 0)
69 (49 46 54) : Bin 1 (97, 0, 0)
70 (49 45 54) : Bin 1 (0, 0, 110)
71 (46 45 53) : Bin 1 (0, 47, 55)
72 (46 47 53) : Bin 1 (0, 47, 0)
73 (46 46 55) : Bin 2 (143, 93, 0)
74 (46 47 54) : Bin 2 (94, 94, 0)
75 (46 46 53) : Bin 1 (47, 139, 0)
76 (48 45 54) : Bin 1 (195, 136, 55)
77 (48 45 55) : Bin 1 (195, 91, 55)
78 (47 45 55) : Bin 1 (195, 46, 55)
79 (49 46 55) : Bin 1 (47, 93, 0)
80 (46 45 53) : Bin 1 (244, 135, 55)
81 (46 45 53) : Bin 1 (196, 136, 0)
82 (50 45 55) : Bin 1 (244, 90, 55)
83 (47 45 55) : Bin 1 (196, 91, 0)
84 (46 45 53) : Bin 1 (196, 46, 0)
85 (46 47 54) : Bin 2 (94, 47, 0)
86 (49 45 55) : Bin 1 (244, 45, 55)
87 (50 45 53) : Bin 1 (244, 0, 55)
88 (48 45 53) : Bin 1 (243, 137, 0)
89 (49 47 54) : Bin 2 (94, 0, 0)
90 (47 47 53) : Bin 1 (0, 0, 0)
91 (46 45 54) : Bin 2 (0, 140, 0)
92 (46 46 54) : Bin 2 (143, 47, 0)
93 (48 47 55) : Bin 2 (46, 0, 0)
94 (47 45 54) : Bin 1 (243, 92, 0)
95 (46 47 55) : Bin 2 (0, 0, 0)
96 (48 46 55) : Bin 1 (47, 47, 0)
n = 97
bdim = 0
type = 0
nodelimit = 0
iterlimit = 100000
timelimit = 0
packingtype = 0
solved = 0
ub = 2.0
lb = 1.0
gap = 1.0
dev = 1.00
nodes = 0
iterations = 100000
time = 666.06
```

APÊNDICE E: *Output* obtido na resolução do problema proposto após a retirada da caixa de menor prioridade

```

3DBPP PROBLEM database.txt 0 100000 0 0
3DBPP PROBLEM 97 0 0 0 100000 0 0
ITERLIMIT
1 : lb 1 z 1 node 0 iter 100000 time 0.00
96 (300,190,220)
0 (46 47 53) : Bin 1 (95, 141, 110)
1 (47 46 55) : Bin 1 (244, 46, 55)
2 (49 46 53) : Bin 1 (145, 138, 110)
3 (47 45 55) : Bin 1 ( 0, 135, 165)
4 (48 45 54) : Bin 1 ( 0, 90, 165)
5 (47 47 55) : Bin 1 (190, 141,  0)
6 (46 46 53) : Bin 1 (145, 92, 110)
7 (47 45 54) : Bin 1 (247, 135, 165)
8 (46 46 53) : Bin 1 (145, 46, 110)
9 (48 47 55) : Bin 1 (190, 94,  0)
10 (46 47 53) : Bin 1 (95, 94, 110)
11 (46 45 53) : Bin 1 (247, 90, 165)
12 (49 46 53) : Bin 1 (145,  0, 110)
13 (50 45 53) : Bin 1 (247, 45, 165)
14 (50 45 53) : Bin 1 (247,  0, 165)
15 (50 47 54) : Bin 1 (47,  0, 55)
16 (46 46 53) : Bin 1 (46, 139, 110)
17 (50 46 55) : Bin 1 (244,  0, 55)
18 (49 46 55) : Bin 1 (195,  0, 55)
19 (47 46 54) : Bin 1 (147, 138, 55)
20 (47 47 54) : Bin 1 ( 0, 94, 55)
21 (47 46 54) : Bin 1 (147, 92, 55)
22 (46 45 54) : Bin 1 (48, 135, 165)
23 (49 47 55) : Bin 1 (190, 47,  0)
24 (47 46 54) : Bin 1 (147, 46, 55)
25 (47 45 55) : Bin 1 (48, 90, 165)
26 (46 45 54) : Bin 1 ( 0, 137, 110)
27 (46 47 53) : Bin 1 (95, 47, 110)
28 (47 47 55) : Bin 1 (239, 141,  0)
29 (46 46 53) : Bin 1 (46, 93, 110)
30 (48 45 53) : Bin 1 (197, 135, 165)
31 (50 47 53) : Bin 1 (95,  0, 110)
32 (47 45 54) : Bin 1 (197, 90, 165)
33 (48 46 54) : Bin 1 (147,  0, 55)
34 (46 47 55) : Bin 1 (239, 94,  0)
35 (49 47 53) : Bin 1 (46,  0, 110)
36 (50 47 55) : Bin 1 (239, 47,  0)
37 (48 46 54) : Bin 1 (97, 138, 55)
38 (50 47 55) : Bin 1 (239,  0,  0)
39 (47 46 55) : Bin 1 (97, 92, 55)
40 (48 46 53) : Bin 1 (46, 47, 110)
41 (46 45 53) : Bin 1 ( 0, 92, 110)
42 (46 47 53) : Bin 1 ( 0,  0, 110)
43 (48 45 54) : Bin 1 (197, 45, 165)
44 (50 45 54) : Bin 1 (197,  0, 165)
45 (47 45 53) : Bin 1 (147, 135, 165)
46 (46 46 55) : Bin 1 ( 0, 94,  0)
47 (49 47 55) : Bin 1 (190,  0,  0)
48 (47 47 55) : Bin 1 (143,  0,  0)
49 (46 47 55) : Bin 1 ( 0, 47,  0)
50 (46 45 53) : Bin 1 ( 0, 47, 110)
51 (50 46 54) : Bin 1 (97, 46, 55)
52 (50 46 54) : Bin 1 (97,  0, 55)
53 (47 47 55) : Bin 1 (46, 141,  0)
54 (49 45 53) : Bin 1 (147, 90, 165)
55 (47 45 53) : Bin 1 (147, 45, 165)
56 (50 45 53) : Bin 1 (147,  0, 165)
57 (50 45 55) : Bin 1 (97, 135, 165)

```

```
58 (48 45 53) : Bin 1 (97, 90, 165)
59 (48 47 55) : Bin 1 (46, 94, 0)
60 (47 45 54) : Bin 1 (244, 135, 110)
61 (48 45 54) : Bin 1 (97, 45, 165)
62 (48 47 54) : Bin 1 (46, 47, 0)
63 (46 46 55) : Bin 1 (143, 139, 0)
64 (49 47 54) : Bin 1 (94, 141, 0)
65 (50 45 55) : Bin 1 (97, 0, 165)
66 (49 45 54) : Bin 1 (48, 45, 165)
67 (47 45 54) : Bin 1 (244, 90, 110)
68 (47 46 53) : Bin 1 (0, 141, 55)
69 (49 46 54) : Bin 1 (47, 139, 55)
70 (49 45 54) : Bin 1 (48, 0, 165)
71 (46 45 53) : Bin 1 (244, 45, 110)
72 (46 47 53) : Bin 1 (0, 47, 55)
73 (46 46 55) : Bin 1 (143, 93, 0)
74 (46 47 54) : Bin 1 (94, 94, 0)
75 (46 46 53) : Bin 1 (47, 93, 55)
76 (48 45 54) : Bin 1 (0, 45, 165)
77 (48 45 55) : Bin 1 (0, 0, 165)
78 (47 45 55) : Bin 1 (244, 0, 110)
79 (49 46 55) : Bin 1 (47, 47, 55)
80 (46 45 53) : Bin 1 (194, 135, 110)
81 (46 45 53) : Bin 1 (194, 90, 110)
82 (50 45 55) : Bin 1 (194, 45, 110)
83 (47 45 55) : Bin 1 (195, 136, 55)
84 (46 45 53) : Bin 1 (195, 91, 55)
85 (46 47 54) : Bin 1 (94, 47, 0)
86 (49 45 55) : Bin 1 (195, 46, 55)
87 (50 45 53) : Bin 1 (194, 0, 110)
88 (48 45 53) : Bin 1 (244, 137, 55)
89 (49 47 54) : Bin 1 (94, 0, 0)
90 (47 47 53) : Bin 1 (0, 0, 55)
91 (46 45 54) : Bin 1 (0, 140, 0)
92 (46 46 54) : Bin 1 (143, 47, 0)
93 (48 47 55) : Bin 1 (46, 0, 0)
94 (47 45 54) : Bin 1 (244, 92, 55)
95 (46 47 55) : Bin 1 (0, 0, 0)
n = 96
bdim = 0
type = 0
nodelimit = 0
iterlimit = 100000
timelimit = 0
packingtype = 0
solved = 1
ub = 1.0
lb = 1.0
gap = 0.0
dev = 0.00
nodes = 0
iterations = 0
time = 0.00
```

APÊNDICE F: Sub-rotina em Matlab para conversão gráfica do padrão de carregamento obtido

```

function caixa(coord,X,Y,Z,cor)
% A função caixa gera um cubo de dimensões X, Y, Z.

% INPUTS:
% coord = a coordenada de origem da caixa no formato [x,y,z];
% X = extensão da caixa na direção do eixo x;
% Y = extensão da caixa na direção do eixo y;
% Z = extensão da caixa na direção do eixo z;
% cor = string de definição da cor da caixa (aplicou-se cores aleatórias).

% Definição dos vértices da caixa:
vert = [1 1 0;
        0 1 0;
        0 1 1;
        1 1 1;
        0 0 1;
        1 0 1;
        1 0 0;
        0 0 0];

% Definição das faces da caixa:
face = [1 2 3 4;
        4 3 5 6;
        6 7 8 5;
        1 2 8 7;
        6 7 1 4;
        2 3 5 8];

cubo = [vert(:,1)*X+coord(1),vert(:,2)*Y+coord(2),vert(:,3)*Z+coord(3)];
patch('Faces',face,'Vertices',cubo,'FaceColor',cor);
end

```

GERAÇÃO DO PADRÃO DE CARREGAMENTO

```

% Limpa a janela de figura atual e cria a figura que conterá o padrão:
clf;
figure(1);

% Iguala a unidade dos três eixos e exibe a grade de fundo:
axis equal;
grid on;

% Define o nome e tamanho da fonte dos eixos:
xlabel('X','FontSize',14);
ylabel('Y','FontSize',14);
zlabel('Z','FontSize',14);

% Define o ponto de vista (inclinação):
view(30,30);

% Cria os limites do container:
caixa([0,0,0],300,190,220,'w');

% Mantém as faces do contêiner transparente:
alpha('color');
alphamap('vdown');

% Cria a matriz dos resultados obtidos:
fileID = fopen('result.txt');
A = fscanf(fileID,'%f',[6,96]);
A = A.';

% Cria todas as caixas a serem carregadas:
for i=1:length(A)
    caixa([A(i,4),A(i,5),A(i,6)],A(i,1),A(i,2),A(i,3),rand(1,3))
end

```

APÊNDICE G: Alteração na base de dados do carregamento completo para testar o comportamento do método com caixas de medidas mais heterogêneas

Entrega	Prioridade (a)	L	A	P	Volume (m³)
e ₁	1	48	47	51	0,115056
e ₄	2	49	46	53	0,119462
e ₂	3	51	46	51	0,119646
e ₄₇	4	49	45	53	0,116865
e ₆	5	50	45	52	0,117
e ₇₆	6	49	47	53	0,122059
e ₁₇	7	48	46	51	0,112608
e ₁₄	8	49	45	52	0,11466
e ₅₇	9	48	46	51	0,112608
e ₁₈	10	50	47	53	0,12455
e ₃	11	48	47	51	0,115056
e ₁₁	12	48	45	51	0,11016
e ₇	13	51	46	51	0,119646
e ₁₆	14	52	45	51	0,11934
e ₁₉	15	52	45	51	0,11934
e ₆₀	16	52	47	52	0,127088
e ₃₀	17	48	46	51	0,112608
e ₃₂	18	52	46	53	0,126776
e ₇₃	19	51	46	53	0,124338
e ₁₅	20	49	46	52	0,117208
e ₄₀	21	49	47	52	0,119756
e ₈₂	22	49	46	52	0,117208
e ₉	23	48	45	52	0,11232
e ₈₃	24	51	47	53	0,127041
e ₅	25	49	46	52	0,117208
e ₉₄	26	49	45	53	0,116865
e ₄₁	27	48	45	52	0,11232
e ₁₂	28	48	47	51	0,115056
e ₇₇	29	49	47	53	0,122059
e ₆₄	30	48	46	51	0,112608
e ₇₀	31	50	45	51	0,11475
e ₄₆	32	52	47	51	0,124644
e ₂₀	33	49	45	52	0,11466
e ₆₂	34	50	46	52	0,1196
e ₂₂	35	48	47	53	0,119568
e ₇₈	36	51	47	51	0,122247
e ₇₄	37	52	47	53	0,129532
e ₈	38	50	46	52	0,1196
e ₄₉	39	52	47	53	0,129532
e ₂₄	40	49	46	53	0,119462
e ₇₅	41	50	46	51	0,1173
e ₇₂	42	48	45	51	0,11016
e ₃₄	43	48	47	51	0,115056
e ₂₇	44	50	45	52	0,117
e ₁₀	45	52	45	52	0,12168
e ₅₃	46	49	45	51	0,112455
e ₆₁	47	48	46	53	0,117024
e ₂₆	48	51	47	53	0,127041
e ₂₅	49	47	47	55	0,121495
e ₆₈	50	46	47	55	0,11891
e ₇₁	51	46	45	53	0,10971
e ₅₁	52	50	46	54	0,1242
e ₃₈	53	50	46	54	0,1242
e ₆₉	54	47	47	55	0,121495
e ₈₁	55	49	45	53	0,116865
e ₅₄	56	47	45	53	0,112095
e ₃₁	57	50	45	53	0,11925
e ₅₂	58	50	45	55	0,12375
e ₃₇	59	48	45	53	0,11448
e ₅₈	60	48	47	55	0,12408

Entrega	Prioridade (a)	L	A	P	Volume (m³)
e ₂₉	61	47	45	54	0,11421
e ₄₈	62	48	45	54	0,11664
e ₄₂	63	48	47	54	0,121824
e ₃₅	64	46	46	55	0,11638
e ₈₀	65	49	47	54	0,124362
e ₄₅	66	50	45	55	0,12375
e ₁₃	67	49	45	54	0,11907
e ₇₉	68	47	45	54	0,11421
e ₆₃	69	47	46	53	0,114586
e ₈₇	70	49	46	54	0,121716
e ₆₇	71	49	45	54	0,11907
e ₂₈	72	46	45	53	0,10971
e ₉₃	73	46	47	53	0,114586
e ₂₃	74	46	46	55	0,11638
e ₉₅	75	46	47	54	0,116748
e ₃₃	76	46	46	53	0,112148
e ₅₉	77	48	45	54	0,11664
e ₃₆	78	48	45	55	0,1188
e ₆₅	79	47	45	55	0,116325
e ₉₂	80	49	46	55	0,12397
e ₅₀	81	46	45	53	0,10971
e ₂₁	82	46	46	53	0,112148
e ₈₉	83	50	45	55	0,12375
e ₉₉	84	47	45	55	0,116325
e ₈₈	85	46	45	53	0,10971
e ₄₃	86	46	47	54	0,116748
e ₈₆	87	49	45	55	0,121275
e ₅₅	88	50	46	53	0,1219
e ₁₀₀	89	48	45	53	0,11448
e ₈₅	90	49	40	54	0,10584
e ₈₄	91	47	45	53	0,112095
e ₉₁	92	46	45	54	0,11178
e ₅₆	93	46	46	54	0,114264
e ₉₀	94	48	47	55	0,12408
e ₃₉	95	47	45	54	0,11421
e ₁₀₂	96	46	47	55	0,11891
TOTAL					11,318706