



Universidade de Aveiro
2023

**Marlene Dias
Vieira Agra**

**Desenvolvimento de uma solução para o problema
de empacotamento em palete na Saint-Gobain
Portugal S.A.**



Universidade de Aveiro
2023

Marlene Dias Vieira
Agra

Desenvolvimento de uma solução para o problema de empacotamento em palete na Saint-Gobain Portugal S.A

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial, realizada sob a orientação científica do Doutor José António de Vasconcelos Ferreira, Professor associado do Departamento de Economia, Gestão, Engenharia Industrial e Turismo da Universidade de Aveiro.

Dedicado à memória da Vó Lina, por todos os momentos juntas e por tudo o que me ensinou. Espero que te sintas orgulhosa de mim, Vó.

o júri

presidente

Prof. Doutora Ana Luísa Ramos
professora auxiliar da Universidade de Aveiro

vogais

Prof. Doutor José António de Sousa Barros Basto
professor auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Prof. Doutor José António de Vasconcelos Ferreira
professor associado da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Finalizando esta etapa, que representa o culminar dos cinco anos do meu percurso académico na Universidade de Aveiro, não poderia deixar de agradecer às pessoas que contribuíram para que esta conquista fosse possível. Aos que me acompanharam nesta jornada e aos que me acompanham na vida, estas palavras representam o mais sentido agradecimento para convosco.

Aos meus pais, Manuel e Elisa, e à minha irmã, Sónia, que me acompanham desde sempre e que sempre me apoiaram. Obrigada por serem os pilares da minha vida. Obrigada pela motivação, confiança e, acima de tudo, pelo amor incondicional. Sem vocês, nunca teria chegado até aqui.

À minha família, aos que estiveram presentes em todas as conquistas e etapas da minha vida. Obrigada pela preocupação, apoio constante e motivação.

Ao meu namorado, Ricardo, pela paciência, motivação, carinho e amor incondicional, ao longo desta jornada. Obrigada por acreditares em mim e por me motivares a ser a melhor versão de mim mesma, todos os dias. E, acima de tudo, por tornares a minha vida mais bonita.

Aos meus amigos e amigas que estiveram sempre presentes, em todas as etapas da minha vida. Um agradecimento especial às minhas amigas, Ana Isabel, Bruna e Inês, pelo ombro amigo e por tornarem esta jornada mais fácil. Obrigada pela vossa amizade e por tornarem estes cinco anos inesquecíveis.

Ao professor José Vasconcelos, pelo acompanhamento, orientação e tempo despendido em prol da realização deste trabalho.

À minha orientadora, Maria João Sá, pelo apoio incessante, pela constante disponibilidade, pelos conhecimentos que me transmitiu e, acima de tudo, por confiar em mim e no meu trabalho. À minha equipa, Miguel Espada, Helena Neves e Alexandra Lopes, pelo constante apoio, disponibilidade e ajuda diária, que se revelou fulcral para o meu desenvolvimento profissional. Obrigada por terem acreditado em mim.

A todos os colegas da Saint-Gobain Portugal S.A. que colaboraram comigo e que me ajudaram na realização deste projeto.

A todos vocês,
O meu sincero obrigada!

palavras-chave

Gestão de armazém, Indústria 4.0, Logística, Problema de empacotamento em palete, Processo de preparação de encomendas, *Warehouse Management System*.

resumo

O presente trabalho foi desenvolvido em contexto empresarial, na Saint-Gobain Portugal S.A. O projeto surgiu da necessidade de melhoria e otimização do processo de preparação de encomendas, associado ao empacotamento em palete, tendo sido proposto no sentido de complementar a automatização inerente à implementação de um *Warehouse Management System*, em 2023.

O objetivo deste projeto é o desenvolvimento de soluções para o processo de preparação de encomendas, nomeadamente no processo de *picking* e consolidação de diferentes produtos em palete, sendo que o principal foco é a redução de paletes utilizadas por encomenda. Inicialmente, procedeu-se à realização de um estudo de tempos e movimentos ao processo de execução de *picking*, com o intuito de identificar os principais desperdícios e as oportunidades de melhoria a considerar. Os principais problemas passam pela inexistência de procedimentos e regras no processo preparação de encomendas, pela taxa de utilização de paletes elevada internamente e pela utilização do número de paletes por encomenda superior à necessária. De seguida, foi desenvolvido o modelo matemático para o problema de empacotamento em palete, o qual considera as restrições no contexto real e prático do setor logístico da empresa. Por fim, o modelo matemático foi implementado e testado no software CPLEX. No entanto, não foi possível obter resultados computacionais do modelo, dada a complexidade inerente ao problema em questão.

Em termos teóricos, o presente trabalho propõe a redução do número de paletes utilizadas na empresa, especificamente no processo de *picking*. Em termos práticos, o estudo das categorias de produtos e respetivas restrições culminou na criação de uma matriz de combinações de posicionamentos na palete, a qual identifica e define as regras de empacotamento a considerar no futuro, na consolidação de diferentes produtos na palete.

keywords

Warehouse Management, Industry 4.0, Logistics, Pallet Loading Problem, Order picking process, *Warehouse Management System*.

abstract

This work was developed at Saint-Gobain Portugal S.A. The project arose from the need to improve and optimize the order preparation process, associated with pallet loading process. This work was proposed as a complement to the automation inherent in the implementation of a Warehouse Management System, in 2023.

The objective of this project is the development of solutions for the order preparation process, particularly in the picking process and consolidation of different products on pallets. The main focus is to reduce the quantity of pallets used per order. Initially, a time and motion study were conducted on the picking execution process, to identify the main wastes and improvement opportunities to be considered. The main problems are the lack of procedures and rules in the order preparation process, the high internal pallet utilization rate, and the use of a higher number of pallets per order, than necessary.

Next, a mathematical model was developed for the pallet loading problem, which considers the constraints in the real and practical context of the company's logistics sector. Finally, the mathematical model was implemented and tested in the CPLEX software. However, it was not possible to obtain computational results for the model, due to the inherent complexity of the problem.

In theoretical terms, this work proposes the reduction of the number of pallets used in the company, specifically in the picking process. In practical terms, the study of product categories and their respective constraints culminated in the creation of a matrix of placement combinations on the pallet, which identifies and defines the packaging rules to be considered in the future when consolidating different products on the pallet.

Índice

| | |
|---|-----------|
| 1. Introdução | 1 |
| 1.1. Enquadramento | 1 |
| 1.2. O projeto | 1 |
| 1.2.1. A empresa | 1 |
| 1.2.2. Motivação e objetivos a atingir | 2 |
| 1.2.3. Metodologia..... | 3 |
| 1.3. Estrutura do documento..... | 5 |
| 2. Enquadramento teórico | 7 |
| 2.1. Logística na Indústria 4.0 | 7 |
| 2.1.1. Indústria 4.0 | 7 |
| 2.1.2. Implicações da Indústria 4.0 na logística..... | 8 |
| 2.2. Gestão de Armazéns | 8 |
| 2.2.1. Conceitos e objetivos..... | 8 |
| 2.2.2. Operações | 10 |
| 2.2.3. Indicadores de desempenho..... | 12 |
| 2.3. <i>Warehouse Management System</i> (WMS)..... | 14 |
| 2.3.1. Conceitos | 14 |
| 2.3.2. Implementação..... | 15 |
| 2.3.3. Integração no ERP | 17 |
| 2.4. O Problema de Empacotamento | 18 |
| 2.4.1. Problemas de Otimização Combinatória | 18 |
| 2.4.2. Problemas de Empacotamento..... | 20 |
| 3. Caracterização do projeto | 25 |
| 3.1. A Saint-Gobain | 25 |
| 3.1.1. O Grupo Saint-Gobain em todo o mundo..... | 25 |
| 3.1.2. O Grupo Saint-Gobain em Portugal | 26 |
| 3.1.3. A empresa Saint-Gobain Portugal S.A. | 27 |
| 3.1.4. Setor Logístico e Produtivo da Saint-Gobain Portugal S.A. | 30 |
| 3.2. Implementação de um <i>Warehouse Management System</i> | 31 |
| 3.2.1. Motivações e objetivos | 31 |
| 3.2.2. Gestão de encomendas no Armazém..... | 33 |
| 3.3. Diagnóstico ao processo de preparação de encomendas | 37 |
| 3.3.1. Encomendas com preparação e Transporte SGPT | 38 |
| 3.3.2. Tempos e movimentos do processo de preparação de encomendas..... | 40 |

| | |
|---|-----------|
| 3.3.3. Análise da utilização de paletes na empresa e o seu impacto..... | 44 |
| 3.4. Oportunidades de melhoria e plano de ação..... | 45 |
| 4. Resultados do projeto..... | 47 |
| 4.1. Análise das melhorias após o WMS..... | 47 |
| 4.1.1. Impacto no processo preparação de encomendas..... | 47 |
| 4.1.2. Impacto ambiental..... | 50 |
| 4.2. Levantamento das restrições associadas ao problema..... | 51 |
| 4.3. Desenvolvimento de soluções para o problema de empacotamento..... | 53 |
| 4.3.1. Modelo matemático no CPLEX..... | 58 |
| 4.3.2. Teste..... | 61 |
| 4.4. Estudo do impacto da solução desenvolvida..... | 62 |
| 5. Conclusão..... | 67 |
| 5.1. Reflexão sobre o trabalho realizado..... | 67 |
| 5.2. Desenvolvimentos Futuros..... | 67 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Unidade Operacional de Aveiro. Retirado de Saint-Gobain Portugal S.A., 2023 de https://construir.saint-gobain.pt/noticias/saint-gobain-investe-12-milhoes-em-nova-linha-de-producao-em-aveiro | 2 |
| Figura 2 - Operações de armazém, Retirado de Safety Culture 2023 de https://safetyculture.com/topics/warehouse-management/ | 11 |
| Figura 3 - Marcas do Grupo Saint-Gobain | 25 |
| Figura 4 - Distribuição das empresas do Grupo, em Portugal..... | 27 |
| Figura 5 - Marcas da empresa Saint-Gobain Portugal S.A..... | 27 |
| Figura 6 - Organograma da empresa | 28 |
| Figura 7 - Mercadorias | 30 |
| Figura 8 - Objetivos da implementação do WMS | 32 |
| Figura 9 - Estantes do armazém interior..... | 33 |
| Figura 10 - Parque de cargas do centro de Aveiro | 34 |
| Figura 11 – Processo de gestão de encomendas atual | 34 |
| Figura 12 - Local de armazenamento das ordens de picking | 36 |
| Figura 13 - Representatividade das Encomendas com preparação..... | 39 |
| Figura 14 - Representatividade das Encomendas com Transporte SG-PT..... | 39 |
| Figura 15 - Encomendas com preparação e condição de transporte..... | 40 |
| Figura 16 – Cronograma do projeto | 46 |
| Figura 17 - Processo de gestão de encomendas, após WMS..... | 47 |
| Figura 18 – Exemplo de dispositivo móvel integrado no WMS | 48 |
| Figura 19 – Declaração dos parâmetros no ficheiro “.dat”..... | 59 |
| Figura 20 – Definição da função objetivo e respetivas equações..... | 60 |
| Figura 21 – Declaração das regras de empacotamento..... | 60 |
| Figura 22 - Erro ocorrido na execução do modelo | 61 |

Índice de tabelas

| | |
|--|----|
| <i>Tabela 1 - KPIs de armazém, adaptado de Frazelle (2016)</i> | 13 |
| Tabela 2 - KPIs do Armazém: Gestão de Inventário, adaptado de (Ramaa A. et al., 2012) | 13 |
| <i>Tabela 3 - KPIs do Armazém: Cumprimento de pedidos, adaptado de (Ramaa A. et al., 2012)</i> | 14 |
| Tabela 4 - KPIs do Armazém: Desempenho do Armazém, adaptado de (Ramaa A. et al., 2012)..... | 14 |
| Tabela 5 - Tarefas do processo de preparação de encomendas | 41 |
| Tabela 6 - Análise dos dados do estudo de tempos e movimentos..... | 43 |
| Tabela 7 - Produtos na ordem de picking | 43 |
| Tabela 8 - Análise das melhorias ao processo de picking | 49 |
| Tabela 9 - N° de ordens de picking emitidas, no centro de Aveiro | 50 |
| Tabela 10 - N° de ordens de picking emitidas, no centro do Carregado | 50 |
| Tabela 11 - Encomendas preparadas, em maio, no centro de Aveiro | 62 |
| Tabela 12 - Encomendas preparadas, em maio, no centro do Carregado..... | 62 |

Lista de Abreviaturas

| | |
|--------------|--|
| BPP | <i>Bin Packing Problem</i> |
| CLP | <i>Container Loading Problem</i> |
| EDI | <i>Electronic Data Interchange</i> |
| ERP | <i>Enterprise Resource Planning</i> |
| EWM | <i>Extended Warehouse Management</i> |
| PLP | <i>Pallet Loading Problem</i> |
| RFID | <i>Radio Frequency Identification</i> |
| SC | <i>Supply Chain</i> |
| SGPT | Saint-Gobain Portugal S.A. |
| WMS | <i>Warehouse Management System</i> |
| 3DBPP | <i>Three-Dimensional Bin Packing Problem</i> |

1. Introdução

1.1. Enquadramento

O presente documento surge como apresentação do projeto desenvolvido no âmbito da unidade curricular de Estágio/Projeto/Dissertação, inserida no Mestrado Integrado em Engenharia e Gestão Industrial da Universidade de Aveiro. O presente trabalho foi realizado em parceria com a empresa Saint-Gobain Portugal S.A. (SGPT).

A estratégia da empresa rege-se pelo alcance de vantagem competitiva, através do fornecimento de soluções mais sustentáveis com elevados padrões de qualidade, os quais são característicos da organização. Para além disso, os clientes são o cerne das ações da empresa e como tal, o objetivo de manter o nível de serviço acima dos 90% é uma das suas prioridades. Desta forma, a evolução e a otimização dos processos organizacionais são imperativas para o alcance da vantagem competitiva.

Tendo conhecimento dos problemas associados à gestão de armazém, que afetam o nível de serviço, a Saint-Gobain Portugal S.A. determinou a implementação de um *Warehouse Management System* (WMS), para novembro de 2023. A implementação do WMS será através da integração do módulo de *Extended Warehouse Management* (EWM) inerente ao SAP, o qual é o sistema ERP da empresa. O desenvolvimento deste projeto surge no âmbito do WMS, sendo que o foco prende-se com a otimização do processo de preparação de encomendas.

1.2. O projeto

1.2.1. A empresa

O projeto foi desenvolvido na área de *Supply Chain* da Saint-Gobain Portugal S.A. A organização possui duas unidades operacionais, uma em Aveiro e outra no Carregado. O presente trabalho decorreu presencialmente na unidade de Aveiro, onde está centralizada a empresa. Assim, apresenta-se a unidade operacional de Aveiro, na Figura 1.



Figura 1 - Unidade Operacional de Aveiro. Retirado de Saint-Gobain Portugal S.A., 2023 de <https://construir.saint-gobain.pt/noticias/saint-gobain-investe-12-milhoes-em-nova-linha-de-producao-em-aveiro>

A organização está inserida no setor de materiais de construção, sendo responsável pela produção e comercialização de argamassas industriais. Foca-se no fornecimento de alternativas à construção pesada, através de soluções e serviços mais sustentáveis e com um melhor desempenho, mediante um processo de inovação contínua. Apresenta uma gama de soluções para a construção leve, assim como para a renovação e reabilitação de edifícios, mais eficientes no que diz respeito à utilização de recursos e processos industriais de descarbonização.

1.2.2. Motivação e objetivos a atingir

A crescente preocupação com a racionalização e otimização dos processos logísticos tem despertado a atenção para o problema de empacotamento de paletes, também conhecido como *Pallet Loading Problem* (PLP). Assim, no sentido de complementar a automatização e digitalização dos processos que advém da implementação do WMS, surge a necessidade de otimização do processo de preparação de encomendas, o qual engloba a execução do *picking* e o respetivo empacotamento e consolidação dos produtos na paleta. Este processo está inserido nos processos logísticos da empresa e destaca-se pela sua representatividade na gestão de tempo e recursos do armazém. Assim, os principais motivos que evidenciam a necessidade de otimização do processo de preparação de encomendas apresentam-se, de seguida:

1. Inexistência de procedimentos e regras para o processo preparação de encomendas, especificamente na execução de *picking* e empacotamento dos produtos na paleta;
2. Taxa de utilização de paletes elevada internamente;

3. Custo elevado de armazenamento de paletes;
4. Utilização do número de paletes por encomenda superior à necessária;
5. Custos de transporte elevados, associados ao número de paletes utilizadas por encomenda;

O principal objetivo deste trabalho prende-se com a melhoria e otimização do processo de preparação de encomendas, especificamente na execução de *picking* e consolidação dos produtos na paleta. Considerando os problemas e oportunidades de melhoria identificadas neste processo, destaca-se a necessidade de desenvolvimento de um modelo matemático, para minimização do número de paletes utilizadas por encomenda. O presente trabalho encontra-se projetado para as necessidades logísticas dos centros de Aveiro e do Carregado. Como tal, os objetivos do projeto assentam nos seguintes tópicos:

1. Definição das regras de empacotamento associadas ao processo de preparação de encomendas, na execução de *picking* e empacotamento em paleta;
2. Redução da curva de aprendizagem aquando da contratação de recursos humanos para o armazém;
3. Redução do tempo de execução do *picking*;
4. Desenvolvimento de uma solução para o problema de empacotamento em paleta, no contexto empresarial da SGPT;
5. Contribuição para a redução da pegada carbónica, através da redução da aquisição de paletes.

Este trabalho fundamenta-se num conjunto de pressupostos, o qual considera as restrições associadas ao limite de peso e regras de empacotamento, que advêm das características dos produtos, da fragilidade das embalagens, das limitações dimensionais e estabilidade da paleta. O modelo matemático desenvolvido é testado no *software* de programação matemática CPLEX, o qual pertence à *International Business Management* (IBM).

1.2.3. Metodologia

O projeto foi desenvolvido através da utilização da abordagem de Investigação-Ação, a qual é definida como uma abordagem de investigação. Esta abordagem utiliza simultaneamente a Ação e a Investigação, num processo cíclico (Oliveira Da Fonseca, 2012). De acordo com (Oliveira Da Fonseca, 2012), apresentam-se as suas características:

- Participativa e colaborativa, no sentido em que os investigadores colaboram ativamente na implementação de um projeto;
- Situacional, uma vez que se foca no diagnóstico e resolução de um problema num determinado contexto;
- Cíclica, dado que consiste num conjunto de ciclos, nos quais os resultados iniciais geram oportunidades de mudança, que são posteriormente implementadas e avaliadas como um prelúdio para o ciclo seguinte;
- Auto-avaliativa, uma vez que as alterações são continuamente avaliadas e monitorizadas do ponto de vista da flexibilidade e adaptabilidade, a fim de gerar novos conhecimentos e melhorar a prática.

Este processo metodológico é dividido em fases, considerando-se as etapas de planeamento, ação, observação, reflexão, avaliação e reformulação. Estas etapas decorrem de forma contínua e cíclica, resultando em novos ciclos que estimulam ações reflexivas (Oliveira Da Fonseca, 2012).

Dadas as suas características, a Investigação-Ação não se limita a um único ciclo, permitindo que os participantes executem ajustes na ação. Esta metodologia visa a execução de melhorias nos procedimentos, de modo a obter resultados aprimorados (Oliveira Da Fonseca, 2012).

Neste sentido, numa primeira fase do projeto, decorreu um período de integração na empresa, de forma a compreender o funcionamento da área de *Supply Chain*, assim como o setor logístico. Após a fase de adaptação, foi desenvolvido um plano de ação para o problema lançado pela empresa. Primeiramente, foi realizado um diagnóstico ao processo de preparação de encomendas, com o intuito de identificação dos eventuais problemas inerentes ao processo, bem como as possíveis oportunidades de melhoria. O contacto com os responsáveis do setor logístico e os operadores do armazém possibilitou uma maior compreensão do processo, para além da identificação dos principais problemas. Também nesta fase, foi efetuado um estudo de tempos e movimentos ao processo de execução de *picking*, de modo a identificar os seus principais desperdícios.

Numa segunda etapa, procedeu-se à recolha e análise de dados, inerentemente aos produtos dos quais é executado *picking*. Para além disso, procedeu-se à recolha das restrições associadas às suas características, bem como as restrições associadas à palete. Nesta etapa,

as ferramentas de SAP e o contacto com a equipa de *Supply Chain* e com os responsáveis do armazém, bem como os seus colaboradores, permitiram a recolha de dados necessária para o desenvolvimento do modelo matemático.

Na terceira etapa, com base nos dados recolhidos, realizou-se uma matriz de combinação de empacotamento dos diferentes produtos, que visa a identificação de interdições no processo de empacotamento dos produtos na paleta, também conhecidas como as regras de empacotamento. Para além disso, foi desenvolvido o modelo matemático para o problema de empacotamento em paleta, tendo em conta as restrições a considerar no contexto prático do setor logístico da SGPT. Posteriormente, o modelo foi implementado e testado no CPLEX. Dada a complexidade do modelo, não foi possível a obtenção de resultados computacionais, uma vez que o computador portátil utilizado para a fase de teste não possuía memória suficiente para a execução do modelo. De seguida, o modelo foi testado em mais dois computadores portáteis que também não foram capazes de fornecer resultados computacionais, devido a memória insuficiente para a execução do modelo. Neste sentido, o modelo matemático inicialmente estabelecido foi reformulado. Após a reformulação, procedeu-se ao teste do mesmo, no CPLEX.

1.3. Estrutura do documento

O presente documento encontra-se dividido em cinco capítulos, que por sua vez são constituídos por diferentes secções.

O primeiro capítulo é o capítulo introdutório, onde se realiza um enquadramento do projeto e uma breve apresentação da empresa. São apresentados os objetivos do projeto, bem como a metodologia adotada.

No segundo capítulo é feito um enquadramento teórico, o qual desempenha um papel de suporte para o restante projeto. Neste capítulo são abordados e descritos os principais conceitos e metodologias abordados ao longo do documento, como Indústria 4.0, Gestão de Armazém, Processos de Armazém, *Warehouse Management System* e o Problema de Empacotamento em Paleta.

No terceiro capítulo é descrito o Grupo Saint-Gobain, assim como a empresa Saint-Gobain Portugal S.A. e a área onde o projeto está inserido. É apresentado o Setor Logístico da empresa, bem como o processo de preparação de encomendas, o qual engloba a execução de

picking e o empacotamento de produtos na paleta. Associado a este tópico, é exposto o diagnóstico efetuado ao processo em causa, bem como as informações adicionais necessárias para a realização do presente trabalho. Por fim, é descrito o plano de ação estabelecido, com base nas oportunidades de melhoria identificadas.

No quarto capítulo é apresentada a formulação do modelo matemático para a resolução do problema de empacotamento de paleta, assim como as restrições a que este se encontra sujeito. São descritos o problema e a formulação matemática, bem como os parâmetros e as variáveis. Após a exposição do modelo matemático desenvolvido, são analisados os resultados da fase de teste do algoritmo no *software* CPLEX, assim como as possíveis melhorias no processo de consolidação de paleta, após a implementação deste projeto.

No quinto capítulo, é apresentada uma síntese dos resultados do projeto e respetivas conclusões alcançadas, bem como as limitações do trabalho. Por último, são expostas perspectivas de trabalhos futuros a serem considerados pela empresa.

2. Enquadramento teórico

2.1. Logística na Indústria 4.0

2.1.1. Indústria 4.0

Atualmente, a transformação digital já não é uma escolha para as empresas presentes no negócio dinâmico e é bastante imperativo para a sua sobrevivência (Bag et al., 2018).

A inovação é um fator-chave para as indústrias acederem a novas oportunidades. Neste sentido, estas devem procurar a inovação na cadeia de abastecimento, a fim de manterem a vantagem competitiva no mercado em que atuam (Kunrath et al., 2022). Neste âmbito, em 2011, um novo conceito, conhecido como “Indústria 4.0”, foi introduzido na Alemanha (Lee et al., 2018). A Indústria 4.0 pode ser descrita como a digitalização, automação, transparência, colaboração e disponibilidade de informação em tempo real de produtos e processos, bem como a criação de uma cadeia de valor digital que permite a comunicação entre produtos e os parceiros de negócio (Frazzon et al., 2019; Lasi et al., 2014).

A Indústria 4.0 requer a integração de inovações tecnológicas, sendo suportada por determinadas tecnologias, das quais se destacam, robots autónomos, simulação, sistemas de integração horizontal e vertical, *Internet of Things* (IoT), segurança de dados, *cloud computing*, manufatura aditiva, realidade aumentada, *big data* e análise de dados. Estas tecnologias são consideradas fundamentais para a implementação da Indústria 4.0 dentro das organizações (Kunrath et al., 2022).

Para alcançar o sucesso do negócio e no que diz respeito à Indústria 4.0, é imprescindível que os fluxos de informação sejam bem estruturados. A adoção de *Internet of Things* (IoT) e Sistemas Cyber-Físicos permite a criação de redes inteligentes e a otimização de processos independentes, com a interação do mundo real e virtual a representar um novo marco crucial no desenvolvimento da indústria (Wang et al., 2016). A IoT permite que os itens relevantes para a indústria, como sensores, máquinas e produtos estejam conectados entre si. A conexão destes intervenientes proporciona a rastreabilidade e monitorização contínua dos processos, uma vez que permite que a informação esteja disponível em tempo real (Lasi et al., 2014). Deste modo, a Indústria 4.0 contribui para a estruturação do fluxo de informação na cadeia de abastecimento, uma vez que integra e liga entre si os diferentes elos da cadeia de abastecimento (Khan et al., 2022; Kunrath et al., 2022).

2.1.2. Implicações da Indústria 4.0 na logística

Devido à logística altamente dinâmica, incerta e complexa e também ao comportamento do consumidor, as redes logísticas exigem novos métodos, produtos e serviços, que conduzam a novos desafios e oportunidades logísticas (Wang et al., 2016). Assim, o papel do armazém mudou drasticamente dada a constante procura por informações em tempo real, precisão de dados e ainda, a complexidade e variedade de pedidos dos clientes. Neste sentido, (Lee et al., 2018) argumenta que as operações manuais executadas de forma tradicional não são capazes de responder aos requisitos dos clientes e como tal, provocam uma baixa eficiência operacional do armazém (De Koster et al., 2007; Frazelle, 2016). Entre todas as operações no armazém, o processo de *order picking* pode representar mais de 60% do total de gastos operacionais do armazém (Yu, 2008). Para além disso, este processo é considerado o principal gargalo das operações do armazém.

Por este motivo, a Indústria 4.0 pode trazer mudanças significativas e melhorias na logística tradicional e na sua autopercepção. A integração das tecnologias da Indústria 4.0 é o elemento-chave para alcançar a flexibilidade, adaptabilidade, proatividade e auto-organização (Wang et al., 2016)

Assim, com a aplicação dos conceitos de Indústria 4.0 nas atividades logísticas, a Logística passa a denominar-se de Logística 4.0, também conhecida como *Smart Logistics*. "*Smart Logistics* é um sistema logístico, que pode aumentar a flexibilidade, o ajuste às mudanças de mercado e fará com que a empresa esteja mais próxima das necessidades dos clientes." (Barreto et al., 2017).

(Barreto et al., 2017) afirma que *Smart Logistics* é conduzida de acordo com a tecnologia atual, baseando-se e utilizando as seguintes aplicações tecnológicas: Planeamento de Recursos (ERP), Sistemas de Gestão de Armazéns (WMS), Sistemas de Gestão de Transportes (TMS), Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS) e Informação, Segurança.

2.2. Gestão de Armazéns

2.2.1. Conceitos e objetivos

O conceito de logística foi introduzido como resposta à necessidade crescente de um sistema integrado, que planeia e coordena o fluxo de materiais desde a fonte de abastecimento até ao ponto de consumo. O objetivo da logística é garantir a quantidade e qualidade correta dos

produtos ou serviços, no local certo, no momento certo, para o respetivo cliente e com o preço adequado (Farahani et al., 2011).

Uma das áreas funcionais da logística é o armazenamento. Tendo em conta que a procura de produtos não pode ser prevista com precisão e os produtos não podem ser fornecidos de imediato, o armazenamento de inventário é imprescindível (Farahani et al., 2011).

As empresas armazenam inventário com o objetivo de reduzirem os custos logísticos globais, alcançando níveis mais elevados de serviço ao cliente, através de uma melhor coordenação entre a oferta e a procura (Farahani et al., 2011). Portanto, o armazenamento desempenha um papel crítico nos sistemas logísticos, sendo considerado como uma das principais operações onde as empresas podem fornecer serviços de valor acrescentado aos seus clientes, contribuindo para o alcance de vantagem competitiva (Ramaa A. et al., 2012).

Muitas empresas procuram a automatização das suas funções básicas de armazenamento, para alcançar o aumento nas taxas de rendimento. Uma área vital que determina a eficiência do armazém é a definição dos locais de armazenamento adequados para produtos distintos num armazém (Ramaa A. et al., 2012).

A função de armazenamento é o papel principal dos armazéns, uma vez que estes são considerados como os locais de armazenamento de produtos a longo prazo (Farahani et al., 2011). O armazém é uma instalação na cadeia de abastecimento, que visa o armazenamento de produtos, a fim de reduzir os custos de transporte e o tempo de resposta aos clientes (Bartholdi & Hackman, 2019).

Dentro do armazém, a maior unidade padronizada de armazenamento e movimentação de materiais é geralmente a palete (Farahani et al., 2011). Os modos de armazenamento comuns incluem *racks* de paletes para armazenamento a granel e *racks* para alto e baixo volume de *picking* (Bartholdi & Hackman, 2019).

Como referido por (Žunić et al., 2018), as *racks* ou estantes são normalmente divididas em zonas de *stock* e zonas de *picking*. A zona de *picking* corresponde às prateleiras do armazém de onde os produtos podem ser recolhidos pelo próprio operador e a zona de *stock* corresponde às prateleiras mais altas de uma *rack*. Os produtos armazenados nos níveis superiores, não disponíveis na zona de *picking*, não são acessíveis para que os trabalhadores os recolham à mão e como tal, têm de recorrer à utilização de empilhadores. O

reabastecimento associado à transferência dos produtos do *stock* para a zona de *picking*, consome um tempo adicional ao processo de preparação de encomendas (Žunić et al., 2018).

Geralmente, os pedidos contêm itens diferentes que são colocados em diferentes setores do armazém e como tal, os operadores utilizam os empilhadores para tornar o processo mais rápido e fácil (Bartholdi & Hackman, 2019).

O objetivo da gestão de armazéns é coordenar de forma eficiente e eficaz todos os processos e atividades do armazém. Representa um papel fundamental no desempenho global da cadeia de abastecimento e na gestão da produção, como também no controlo do sistema de inventário e na garantia do nível de serviço elevado (Faber et al., 2013a; Razik et al., 2017). A gestão de armazéns inclui todos os procedimentos de planeamento e controlo para operar o armazém. O planeamento e controlo focam-se na gestão das atividades em curso das operações, de modo a satisfazer a procura dos clientes (Slack & Chambers, 2007). Portanto, é um elemento importante na mitigação das variações da oferta e da procura, fornecendo serviços de valor acrescentado (Sainathuni et al., 2014).

2.2.2. Operações

Há muitas fases na gestão de armazéns, desde a receção de produtos até à sua entrega aos clientes (Farahani et al., 2011). Todo o processo de logística, que lida com a movimentação de produtos para dentro e fora de uma empresa e nela própria, pode ser dividido em três partes:

- Logística de entrada, que representa a movimentação e armazenamento de materiais recebidos de fornecedores;
- Movimentação de materiais, que abrange o armazenamento e os fluxos de materiais dentro de uma empresa;
- Logística de saída, que engloba as movimentações e o armazenamento de produtos, desde o final da produção até ao cliente.

As principais operações de armazém estão associadas aos três domínios mencionados (Farahani et al., 2011). Como tal, apresentam-se, na Figura 2, as operações de armazém, as quais são descritas de seguida:

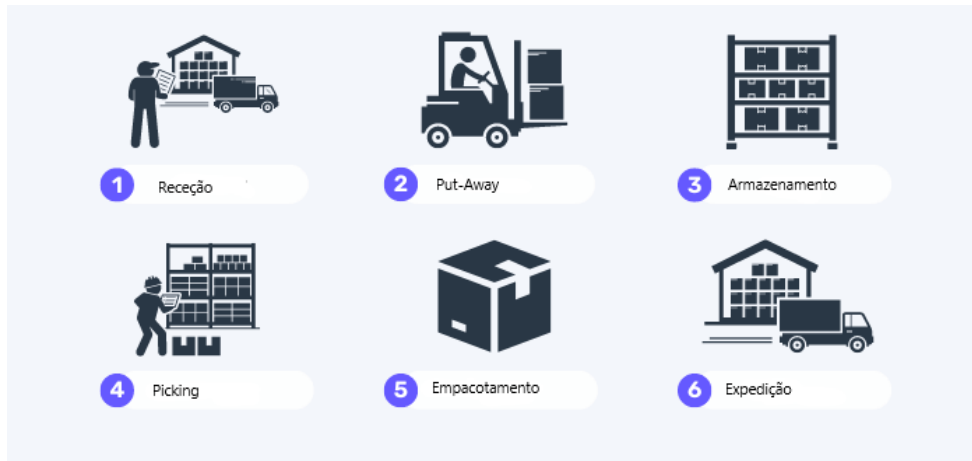


Figura 2 - Operações de armazém, Retirado de Safety Culture 2023 de <https://safetyculture.com/topics/warehouse-management/>

Receção: A fase de receção inclui a parte de recolha do material, o qual passa pelo processo de verificação, inspeção e controlo de qualidade, no momento da sua chegada, de modo a garantir a quantidade e qualidade dos materiais encomendados (Frazelle, 2016). Para além disso, a digitalização do material é feita para efetuar o registo da sua chegada, de modo que a propriedade seja assumida e para que se saiba que esses materiais estão disponíveis para atender à procura do cliente (Bartholdi & Hackman, 2019).

Putaway: É a operação onde os materiais são transferidos para a área de armazenamento, onde serão armazenados (Farahani et al., 2011). Um processo de *putaway* eficiente determina a velocidade e o custo que representa para um cliente, o que significa que deve identificar, a qualquer momento, quais os locais de armazenamento disponíveis, o espaço disponível e o peso correspondente. Deste modo, é possível utilizar essas informações para construir listas de recolha eficientes que guiam os operadores na recolha dos produtos para o cliente (Bartholdi & Hackman, 2019). Esta operação inclui o seu manuseamento, a respetiva arrumação do produto e a verificação da localização (Frazelle, 2016).

Armazenamento: O armazenamento representa a detenção física de bens e materiais, enquanto não existe procura por parte do cliente (Frazelle, 2016). Esta fase é constituinte do fluxo do material nas empresas, sendo que os produtos são mantidos no armazém apenas por um determinado período de tempo.

Picking: É o processo de recolha de produtos do armazenamento, de modo a satisfazer uma procura específica (Frazelle, 2016). De acordo com (Bartholdi & Hackman, 2019), a fase de *picking* é o início do processo de saída, sendo que o mesmo é iniciado pela receção da

encomenda por parte de um cliente. Após a receção da encomenda, o armazém deve efetuar determinadas verificações, incluindo a verificação da disponibilidade de material em *stock* para o posterior envio. O *picking* de encomendas representa a operação mais complexa no armazém e pode ser executada de modos diferentes (Farahani et al., 2011):

1. Na *discreet picking*, um único pedido é executado de cada vez;
2. No *batch picking*, um conjunto de pedidos é preparado por um colaborador;
3. No *zone picking*, cada operador é responsável por uma zona específica do armazém e seleciona os itens que estão nessa zona. Todos os operadores executam as tarefas atribuídas, até que o pedido esteja concluído;
4. No *wave picking*, os pedidos são disponibilizados em ondas, por exemplo, de hora em hora, todas as manhãs ou tardes. Este facto possibilita o controlo do fluxo de mercadorias, o reabastecimento, o *picking*, o empacotamento e a expedição. A sincronização das ondas está associada aos horários de partida das transportadoras.

Preparação: Fase do processo que consiste na preparação dos produtos para a posterior expedição e entrega ao cliente (Farahani et al., 2011). Pode incluir procedimentos como a preparação de documentos de envio (etiquetas de endereço e notas de entrega), pesagem do material e empacotamento (Frazelle, 2016). Esta fase torna-se muito importante, uma vez que é a fase em que o armazém verifica que a encomenda do cliente está completa e precisa.

Expedição: É a fase que envolve a deslocação física e a carga das encomendas nas transportadoras responsáveis pelo transporte das encomendas até ao cliente (Farahani et al., 2011). Inclui a acumulação e atribuição de encomendas às transportadoras e a respetiva carga dos camiões (Frazelle, 2016).

2.2.3. Indicadores de desempenho

A medição de desempenho do armazém é um método que visa medir o desempenho das atividades e dos serviços fornecidos por um armazém (Kusrini et al., 2018). A medição do desempenho do armazém é fundamental para fornecer uma visão clara de possíveis problemas e oportunidades de melhorias, à gestão de topo (Ramaa A. et al., 2012).

Os principais instrumentos de avaliação do desempenho são os indicadores de desempenho, também denominados indicadores-chave de desempenho ou *Key Performance Indicators* (KPIs) (Liviú et al., 2009).

(Frazelle, 2016) utiliza um modelo onde os indicadores são divididos nas principais operações de armazém, as quais são *Receção*, *Putaway*, *Armazenamento*, *Processo de Picking* e *Expedição*. Por sua vez, cada operação também é separada em cinco categorias, incluindo, *Financeira*, *Produtividade*, *Utilização*, *Qualidade* e *Tempo de Ciclo*. Assim, apresenta-se na Tabela 1 o modelo mencionado, estando destacados os indicadores que são analisados e acompanhados pela Saint-Gobain Portugal S.A.

Tabela 1 - KPIs de armazém, adaptado de Frazelle (2016)

| | Financeira | Produtividade | Utilização | Qualidade | Tempo de Ciclo |
|----------------------------|---|--|--|---|---|
| Receção | Custo de receção por linha | Receções por homem/hora | % Utilização da entrada | % Entradas processadas com exatidão | Tempo de processamento por entrada |
| Putaway | Custo de entrada em armazém por linha | Entrada em armazém por homem-hora | % Utilização de mão-de-obra e equipamentos | % Armazenamento perfeito | Tempo de ciclo por entrada em armazém |
| Armazenamento | Custo de armazenamento por item | Inventário por metro quadrado | % Localizações ocupadas | % Localizações sem discrepâncias de inventário | Dias de inventário disponíveis |
| Processo de picking | Custo de <i>picking</i> por linha de pedido | Linhas de pedido executadas por homem-hora | % Utilização de mão-de-obra e equipamentos de <i>picking</i> | % Linhas de <i>picking</i> perfeitas | Tempo de ciclo de preparação de encomendas (por encomenda) |
| Expedição | Custo de expedição por encomenda de cliente | Encomendas preparadas para expedição por homem-hora | % Utilização das áreas de expedição | % Expedições perfeitas | Tempo de ciclo do armazém |

Como citado por (Liviu et al., 2009), outro modelo de estruturação de KPIs é apresentado por John M. Hill no seu livro "Warehouse Performance Measurement" de 2007. Segundo (Liviu et al., 2009; Ramaa A. et al., 2012), os KPIs enquadram-se em três categorias, as quais são gestão de inventário, cumprimento de pedidos e desempenho do armazém, apresentadas nas tabelas 2,3 e 4, respetivamente.

Tabela 2 - KPIs do Armazém: Gestão de Inventário, adaptado de (Ramaa A. et al., 2012)

| Categoria | Indicador | Definição |
|----------------------|---|--|
| Gestão de Inventário | Exactidão do inventário | Quantidade real de inventário em relação à quantidade registada no sistema |
| | Inventário danificado | Avaliação dos danos em % do valor do inventário |
| | Utilização da capacidade de armazenamento | Espaço ocupado (metros quadrados) em % da capacidade de armazenamento (metros quadrados) |
| | Dock to stock time | Tempo médio desde a chegada do transportador até ao momento em que o produto está disponível para o processo de <i>picking</i> de pedido |
| | Visibilidade do inventário | Tempo desde a receção física até ao aviso de disponibilidade do serviço ao cliente |

Tabela 3 - KPIs do Armazém: Cumprimento de pedidos, adaptado de (Ramaa A. et al., 2012)

| Categoria | Indicador | Definição |
|------------------------|-----------------------------------|---|
| Cumprimento de pedidos | Entrega em tempo útil | Encomendas entregues em tempo útil de acordo com a data solicitada pelo cliente |
| | Taxa de satisfação das encomendas | Encomendas totalmente satisfeitas na primeira expedição |
| | Precisão das encomendas | A encomenda preparada e enviada na perfeição |
| | Precisão das linhas | Linhas recolhidas, embaladas e expedidas na perfeição |
| | Tempo de ciclo da encomenda | Tempo desde a colocação da encomenda até à expedição |
| | Conclusão perfeita da encomenda | Encomendas entregues sem alterações, danos ou erros de faturação. |

Tabela 4 - KPIs do Armazém: Desempenho do Armazém, adaptado de (Ramaa A. et al., 2012)

| Categoria | Indicador | Definição |
|-----------------------|-----------------------|--|
| Desempenho do armazém | Encomendas por hora | Número médio de encomendas preparadas e empacotadas por pessoa – hora |
| | Linhas por hora | Número médio de linhas de encomendas preparadas e empacotadas por pessoa – hora |
| | Itens por hora | Número médio de artigos de encomendas processados e empacotados por pessoa – hora |
| | Custo por encomenda | Custos totais de armazenamento - Fixos: espaço, instalações e depreciação Variável: mão-de-obra/fornecimentos |
| | Custo em % das vendas | Custo total de armazenamento como percentagem das vendas totais da empresa. |

2.3. Warehouse Management System (WMS)

2.3.1. Conceitos

Atualmente, as necessidades associadas aos processos logísticos continuam a aumentar, uma vez que a precisão do inventário, a utilização do espaço, a gestão do processo e a otimização do *picking* são os maiores desafios associados à gestão moderna de armazéns. Como parte desse âmbito, o processo de armazenamento está a tornar-se cada vez mais complexo (Faber et al., 2013).

A utilização de ferramentas para a gestão e controlo do manuseamento e armazenamento de materiais é fundamental para um processo logístico rápido e eficiente. A implementação deste tipo de ferramentas contribui para a vantagem competitiva das empresas, uma vez que

a eficiência dos processos logísticos sustenta um melhor nível de serviço. Neste sentido, o uso de ferramentas para a gestão e controlo das operações logísticas é essencial para uma logística ágil e eficiente (De Assis & Sagawa, 2018). Uma dessas ferramentas é o *Warehouse Management System*.

Um *Warehouse Management System* (WMS) ou Sistema de Gestão de Armazém, é um sistema de informação que procura otimizar, controlar e registar o fluxo de materiais e informação, através da utilização de componentes de *hardware* e *software* adequados (De Assis & Sagawa, 2018). Desta forma, apoia o desempenho de tarefas associadas à logística, contribuindo para a maximização da utilização do espaço disponível e satisfação das necessidades dos clientes (De Assis & Sagawa, 2018; Ramaa A. et al., 2012).

O WMS é um elemento crucial do negócio de uma empresa, uma vez que simplifica a rastreabilidade de processos. Qualquer aplicação WMS, independentemente da complexidade do negócio, deve ser capaz de suportar algumas funções logísticas básicas (De Assis & Sagawa, 2018). O WMS deve possuir ferramentas e funções para suportar as principais etapas e processos logísticos de entrada, produção e saída, tais como receção de material, controlo de qualidade no processo de receção, armazenamento, movimentação no armazém, *picking* e expedição (Apak et al., 2016; De Assis & Sagawa, 2018; Žunić et al., 2018). O WMS possui a capacidade de planeamento das atividades diárias do armazém automaticamente, através da alocação e orientação dos operadores nas suas tarefas diárias (De Assis & Sagawa, 2018).

2.3.2. Implementação

Os desafios mais frequentemente citados como justificação para o investimento num WMS incluem erros na receção, *picking* e transporte, tempo excessivo que é desperdiçado à procura de produtos porque não existe gestão de localizações, registo manual de transações, custos de mão-de-obra elevados, baixo volume de negócios, perda de inventário, falta de rastreabilidade do lote, baixa taxa de cumprimento da encomenda, utilização ineficiente do espaço, questões relacionadas com medidas de desempenho e as exigências dos clientes (Min, 2006). Para além disso, a elevada carga de trabalho dos trabalhadores é o problema central. Na operação manual, é muito comum que o trabalhador coloque o produto aleatoriamente no armazém e como tal, o processo de *picking* depende inteiramente da experiência do trabalhador e da sua memória. Assim sendo, o processo de *picking* é muito

demorado e a carga de trabalho do trabalhador é relativamente maior em comparação com um armazém automatizado (De Assis & Sagawa, 2018; Lee et al., 2018).

A implementação de um WMS baseada em tecnologias de IoT tornou-se bastante popular, estabelecendo uma fácil interface entre o sistema e o utilizador (Lee et al., 2018). De acordo com (De Assis & Sagawa, 2018; Lee et al., 2018; Ramaa A. et al., 2012), o WMS utiliza a tecnologia Auto ID Data Capture (AIDC), ou seja, tecnologia de captura de dados de identificação automática. Das tecnologias associadas ao WMS, destacam-se a leitura de códigos de barras, *Radio Frequency Identification* (RFID), redes de sensores e atuadores sem fio (WSANs) e *Cloud computing* (Ramaa A. et al., 2012). Atualmente, nenhuma das tecnologias mencionadas é utilizada na Saint-Gobain Portugal S.A. No entanto, a tecnologia RFID será utilizada nos processos de armazém, aquando da implementação do WMS na empresa.

A leitura de código de barras consiste na utilização de um *scanner* para ler informações a partir de um código de barras, presente na etiqueta. No que diz respeito à tecnologia RFID, esta é amplamente adotada na gestão de armazéns, uma vez que permite rastrear, localizar e identificar objetos específicos, contribuindo para a monitorização eficiente do fluxo de produtos (Lee et al., 2018; Ramaa A. et al., 2012). O RFID pode superar as lacunas dos códigos de barras, tais como erros de digitalização, leituras duplicadas e etiquetas rasgadas que não permitem a leitura do código de barras. É mais simples, rápida e eficiente, sendo capaz de fazer várias leituras ao mesmo tempo (De Assis & Sagawa, 2018). Para além disso, a utilização de dispositivos IoT permite o envio das tarefas, através da rede, para os operadores de armazém e permite direcionar os trabalhadores automaticamente para as localizações de armazenamento de inventário. Isto contribui para a diminuição do tempo associado à preparação de encomendas, permitindo a melhoria da eficiência do processo de *picking* (De Assis & Sagawa, 2018; Lee et al., 2018; Min, 2006).

Para além disso, os documentos em papel são uma das principais fontes de perda de informação, imprecisões e perda de produtividade no processo de *picking*. As tecnologias associadas à Indústria 4.0 podem ser aplicadas, em substituição do papel, para redução dos erros associados ao processo (Farahani et al., 2011).

Segundo (Nee, 2009), a implementação de um WMS permite a rastreabilidade da localização de cada item em tempo real, a fiabilidade dos fluxos de entrada e saída e a monitorização

das operações. Para além disso, proporciona uma maior precisão de inventário, aumento da capacidade de armazenamento, redução das taxas de erro, aumento da produtividade dos operadores e equipamentos, aumento do nível de serviço prestado ao cliente e redução dos custos, através da melhoria da eficiência da mão-de-obra (Min, 2006; Ramaa A. et al., 2012).

No caso de estudo proposto por (Nee, 2009), foi evidenciado que, com a implementação de um WMS, a percentagem de reclamações de clientes devido a erros de armazém diminuiu de 43% para 11% e a precisão do inventário melhorou de 98,34% para 99,52%. Para além disso, o tempo de expedição associado ao transporte foi reduzido de 9,94 dias para 4,29 dias, o que representa uma redução de 57%.

Em suma, para ser bem-sucedido, a implementação de um WMS tem de considerar não só as necessidades do armazém e da empresa, mas também as funcionalidades que a empresa pretende obter do WMS, de modo a satisfazer essas necessidades.

2.3.3. Integração no ERP

À medida que os negócios se tornam mais complexos e o volume de transações aumenta, cria-se a necessidade de sistemas integrados e de sistemas de informação adequados e otimizados, dentro e fora dos armazéns (Apak et al., 2016; Gallmann & Belvedere, 2011).

Um sistema ERP (*Enterprise Resource Planning*) significa “Planeamento de Recursos Empresariais”. É um sistema de *software* que fornece automatização e integração, permitindo a gestão de processos e operações empresariais do quotidiano, de forma eficiente. Estes sistemas permitem que a informação esteja centralizada, apoiando as principais áreas de negócio, como finanças, recursos humanos, produção, marketing, logística, serviços, aprovisionamento, compras, entre outros (SAP Portugal, 2023).

Um sistema ERP é composto por módulos integrados, os quais interagem entre si e partilham uma base de dados comum. Cada módulo está conectado ao sistema ERP, proporcionando a todos os departamentos uma única fonte fidedigna de dados exatos (SAP Portugal, 2023).

Um dos principais produtores mundiais de *software* para gestão de processos de negócios é o SAP (SAP Portugal, 2023). Os sistemas de gestão de armazéns podem ser sistemas autónomos ou módulos de um sistema ERP (Ramaa A. et al., 2012). O SAP *Extended Warehouse Management* (SAP EWM) é um módulo/sistema de gestão de armazém incluído no pacote de soluções SAP *Supply Chain Management* (SAP SCM) (MDP Group, 2023;

SAP Portugal, 2023). O SAP EWM foi desenvolvido, especialmente, para as organizações que lidam com um grande volume de operações. Fornece suporte flexível e automatizado e recursos avançados para o controlo das tarefas de armazém, permitindo o aumento da eficiência das operações no âmbito da produção, armazenamento e logística (MDP Group, 2023; SAP Portugal, 2023).

O SAP EWM atualiza automaticamente os processos do armazém diretamente no SAP, em tempo real, permitindo a visualização de todos os dados de negócio relevantes. Para além disso, os eventos e tarefas do SAP EWM podem ser consultados por dispositivos móveis, o que aumenta a produtividade e potencia a experiência dos operadores (MDP Group, 2023; SAP Portugal, 2023).

2.4. O Problema de Empacotamento

2.4.1. Problemas de Otimização Combinatória

No contexto de otimização dos processos de armazém, surgem os problemas de otimização. Os problemas de otimização consistem em encontrar a melhor combinação dentro de um conjunto de variáveis, com o objetivo de maximizar ou minimizar uma função, denominada de função objetivo. Estes problemas podem ser divididos em três categorias:

1. Problemas cujas variáveis assumem valores reais (ou contínuos).
2. Problemas cujas variáveis assumem valores discretos (ou inteiros).
3. Problemas em que há variáveis inteiras e contínuas.

Estes problemas são classificados, respetivamente, como problemas de Otimização Contínua, Otimização Combinatória ou Discreta e Otimização Mista (Becceneri, 2008).

Relativamente aos Problemas de Otimização Combinatória, estes são muito comuns em processos industriais e atividades de planeamento. São problemas em que uma solução é composta por um conjunto de decisões ou pressupostos discretos fundamentais, sendo que cada decisão pode influenciar a viabilidade da solução (Einstein et al., 2010). Em casos reais, dada a natureza combinatória dos problemas, o número de soluções (viáveis ou impraticáveis) a enumerar para um dado problema é intratável mesmo para computadores muito potentes (Einstein et al., 2010).

A maioria dos problemas de otimização combinatória, como o Problema do Caixeiro Viajante, *Bin Packing Problem* e *Knapsack Problem* são NP-difíceis. Assim, são

apresentadas de seguida as duas abordagens que podem ser consideradas para a resolução deste tipo de problemas, dependendo do tamanho:

Métodos Exatos

Para instâncias pequenas são geralmente utilizados os métodos exatos. Os métodos exatos avaliam todas as soluções possíveis e viáveis dentro de um espaço de procura definido, encontrando a solução ótima. Estes métodos envolvem a avaliação exaustiva de todas as combinações possíveis, o que pode ser computacionalmente complexo e exigente (Jourdan et al., 2009).

Existem diversos métodos exatos, como a família dos algoritmos Branch and X (algoritmo *Branch and Bound*, algoritmo *Branch and Cut* e algoritmo *Branch and Price*), Programação Linear, Programação Dinâmica, entre outros (Jourdan et al., 2009).

Dada a complexidade inerente a muitos problemas de otimização NP-difíceis, nem sempre é possível que estes métodos encontrem a solução ótima em tempo útil (Reis, 2006). De forma a colmatar determinadas lacunas dos métodos exatos, nas últimas três décadas, tem sido dada atenção aos métodos aproximados (Becceneri, 2008).

Métodos Aproximados

Quando as instâncias se tornam muito grandes para a resolução através de métodos exatos, surgem os métodos aproximados (Jourdan et al., 2009). Os métodos aproximados são capazes de encontrar boas soluções, sem exigir tempos computacionais excessivos, embora sem a garantia de otimalidade. Estes encontram soluções aproximadas do problema, ou seja, soluções que são subótimas em relação ao critério usado (Reis, 2006).

Os métodos aproximados são usualmente classificados como heurísticas e meta-heurísticas. Uma heurística é uma técnica que consiste num conjunto de regras, procurando o alcance de boas soluções a um custo computacional razoável (Voß, 2001). Já o termo “meta-heurística” representa um nível superior de procura, a qual visa explorar eficientemente o espaço das soluções viáveis desse problema. É vista como uma ferramenta algorítmica geral que pode ser aplicada a diferentes problemas de otimização, com modificações de forma a torná-la adaptável a um problema específico (Becceneri, 2008). *Local search*, *greedy heuristic*, *simulated annealing*, *tabu search*, algoritmos genéticos e estratégias evolutivas são algumas das técnicas englobadas nos métodos aproximados (Jourdan et al., 2009).

2.4.2. Problemas de Empacotamento

Os problemas de empacotamento procuram uma utilização ótima de recursos que estão representados com a capacidade de utilização do espaço do *bin*, o que está relacionado com o material e a capacidade do transporte. Estes fatores são de grande importância a nível económico, no processo de produção e distribuição, uma vez que todos os fatores podem ser traduzidos em poupanças económicas (Vargas-Osorio & Zúñiga, 2016).

Dada a importância destes problemas e o seu impacto na cadeia de abastecimento, os investigadores estudaram os diferentes problemas de empacotamento, cujas aplicações em Logística são amplamente difundidas, sendo que a sua utilização dependerá do foco da situação. Assim, apresentam-se o *Bin Packing Problem*, *Container Loading Problem* e *Pallet Loading Problem*. Dada a sua natureza, os mais proeminentes no campo logístico são o *Container Loading Problem* e o *Pallet Loading Problem*. No entanto, todos têm a possibilidade de serem aplicados em situações semelhantes (Vargas-Osorio & Zúñiga, 2016).

2.4.2.1. Bin Packing Problem

O *Bin Packing Problem* (BPP) surge quando um conjunto de itens deve ser acomodado num determinado número de objetos grandes (*bins*) do mesmo tamanho, maximizando o espaço utilizado. Este problema pode ser bidimensional e tridimensional (Vargas-Osorio & Zúñiga, 2016).

O *Three Dimensional Bin Packing Problem* (3DBPP) é um problema bem conhecido na investigação de otimização de operações, que modelam diretamente muitas aplicações industriais, entre os quais, empacotamento de contentores e paletes, como também na gestão de cargas e armazéns (Li et al., 2014). O 3DBPP considera o empacotamento de m caixas retangulares em contentores (*bins*) retangulares idênticos, de modo que o número de contentores utilizados seja minimizado, ou de forma equivalente, o rácio de utilização dos *bins* seja maximizado.

O 3DBPP é um problema um problema não-determinístico polinomial-difícil (NP-Difícil) (Li et al., 2014). Os problemas NP-Difícil são considerados computacionalmente intratáveis, o que significa que nenhuma máquina é capaz de encontrar uma solução ideal (Gigerenzer, 2008).

Durante as últimas décadas, foram desenvolvidos algoritmos exatos e heurísticos para este problema. Embora o algoritmo exato possa encontrar a solução ideal, geralmente necessita de um tempo elevado de resolução, mesmo que sejam apenas instâncias de tamanho moderado. O algoritmo heurístico, que não garante a solução ideal, é capaz de providenciar boas soluções com um menor esforço computacional (Vargas-Osorio & Zúñiga, 2016).

2.4.2.2. Container Loading Problem (CLP)

O *Container Loading Problem (CLP)*, denominado como Problema de Empacotamento de Contentores, é um problema tridimensional e é aplicado perante a necessidade de empacotamento de um subconjunto de objetos de tamanhos diferentes num contentor retangular tridimensional com dimensões específicas (Vargas-Osorio & Zúñiga, 2016). Os problemas de empacotamento de contentores são considerados inteiramente como problemas tridimensionais de corte e empacotamento (Bortfeldt & Wäscher, 2012).

É de notar que um objeto grande pode realmente ser um contentor, mas tendo em conta a definição dada, também pode ser o espaço de carga de um camião ou uma palete que pode ser carregada até uma determinada altura (Bortfeldt & Wäscher, 2012).

As restrições associadas ao CLP podem estar relacionadas aos objetos grandes (restrições relacionadas ao contentor) e com os itens pequenos (restrições relacionadas ao item) ou a todo o conjunto ou subconjunto de itens (restrições relacionadas à carga). Além disso, as restrições podem estar relacionadas à relação entre os objetos grandes e os itens pequenos. Por fim, as restrições podem estar relacionadas com o resultado do processo de empacotamento (restrições relacionadas com o arranjo final).

As restrições no PLP podem ser distinguidas como restrições *hard* ou *soft*. As restrições *hard* devem ser satisfeitas, como por exemplo, um padrão de carga que viola uma restrição *hard* não é viável. As restrições *soft* devem ser válidas e neste caso, as violações são toleradas, pelo menos dentro de certos limites (Bortfeldt & Wäscher, 2012).

Em relação às restrições relacionadas ao contentor, estas consideram os limites de peso e a distribuição de peso. Quanto às restrições relacionadas ao item, estas consideram as prioridades de empacotamento, as restrições de orientação e as restrições de empilhamento (produtos que não podem ficar por cima de outros, p.ex.). No que diz respeito às restrições relacionadas à carga, estas consideram restrições de alocação e restrições de posicionamento

(Bortfeldt & Wäscher, 2012). Por fim, em relação às restrições relacionadas com o arranjo final, estas consideram as restrições de estabilidade e restrições de complexidade (Bortfeldt & Wäscher, 2012).

2.4.3.3. *Pallet Loading Problem (PLP)*

O *Pallet Loading Problem (PLP)*, denominado como Problema de Empacotamento de Palete, é bastante frequente a nível logístico e concentra-se na otimização do espaço disponível da paleta, de modo a empacotar a quantidade máxima de produtos, ortogonalmente e sem sobreposição. O PLP é um problema NP-Difícil (Vargas-Osorio & Zúñiga, 2016). É considerado intratável, dado que as possíveis soluções requerem tempo exponencial para ocorrer, para além do consumo de altos recursos computacionais (Alvarez-Valdes et al., 2003; Leyton-Brown et al., 2014).

No que diz respeito aos objetos a serem empacotados, estes podem ser de diferentes tamanhos, natureza, peso e formas (Vargas-Osorio & Zúñiga, 2016). Neste sentido, os Problemas de Empacotamento de Palete podem ser classificados como:

1. O Problema do Produtor, o qual ocorre quando existem itens homogéneos a serem colocados numa paleta.
2. O Problema do Distribuidor surge quando é necessário carregar itens heterogéneos numa paleta (Dell'Amico & Magnani, 2021a).

Ambas as variações de PLP foram extensivamente estudadas. No entanto, o PLP do produtor foi mais amplamente estudado, uma vez que é mais simples do que o PLP do distribuidor. A resolução do PLP do distribuidor apresenta uma maior complexidade, uma vez que tem em consideração um número superior de restrições, tornando a sua solução mais complicada (Vargas-Osorio & Zúñiga, 2016). É de notar que o PLP do distribuidor pode ser visto como um problema do empacotamento de contentores (Morabito & Arenalest, 1994).

O PLP é essencialmente um 3DBPP com requisitos adicionais, de forma a assegurar que as paletes tenham estabilidade e que a carga possa ser manuseada e transportada com segurança. Segundo (Gzara et al., 2020), o PLP sendo uma extensão do 3DBPP, é mais complexo pela consideração de restrições práticas, tais como:

1. Suporte vertical, requer que um item seja bem suportado por ter a maior parte da sua área assegurada nos itens que se encontram por baixo.

2. Suporte de carga, refere-se à capacidade de um determinado item suportar o peso colocado por cima dele próprio.
3. Estabilidade da palete diz respeito à distribuição uniforme de peso na palete, de forma que nenhum lado seja significativamente mais pesado do que os outros.
4. Limite de peso da palete é o limite do peso total dos itens, que determina a capacidade suportada pela palete, o qual é definido internamente pela empresa.

Para além do mencionado, as condições de procura, de colocação e peso, juntamente com a estabilidade, geometria e resistência da palete, constituem as restrições mais importantes no PLP (Scheithauer & Terno, 1999). A ação de empacotamento da palete também exige a possível rotação dos itens, a fim de encontrar a posição mais adequada para uma maior utilização do espaço da palete. Em qualquer uma das variantes, nenhum item pode sobrepor-se a outro na mesma camada. Caso contrário, a solução torna-se inviável, sendo, por isso, descartável (Zúñiga et al., 2011).

Centrando-se no problema de empacotamento de paletes, o processo de *picking* é uma das atividades mais importantes, uma vez que é geralmente o mais demorado, difícil e dispendioso. Como tal, a otimização da ordem de tarefas de *picking* deve ser uma prioridade para qualquer empresa (Zúñiga et al., 2011).

Quanto mais eficientemente as paletes forem utilizadas, menos espaço ocuparão nas cargas. Para além disso, o impacto no transporte e armazenamento é evidente, uma vez que ambos os custos estão diretamente relacionados com a utilização do espaço, bem como com o tipo de paletes e a sua quantidade na conformação de uma carga (Zúñiga et al., 2011). Assim, um processo de paletização eficiente, em qualquer tipo de transporte, contribui para uma poupança direta dos custos logísticos totais. Estas poupanças representam entre 20-25% do custo de armazenamento e até 30% dos custos de transporte (Alvarez-Valdes et al., 2005; Bischoff et al., 1995b; Zúñiga et al., 2011). Obviamente, se o espaço for utilizado de forma eficiente, é viável fornecer uma maior quantidade de produtos com um menor custo e uma maior satisfação de ambas as partes envolvidas, ou seja, clientes e empresa (Vargas-Osorio & Zúñiga, 2016).

A aplicação extensiva do PLP e a utilidade de um empacotamento eficiente das paletes geraram um estudo intenso na área, ao longo do tempo, originando o desenvolvimento de diferentes métodos de resolução. A crescente investigação operacional envolve a

necessidade de desenvolvimento de soluções de elevada qualidade, que se traduzem em extensos e complexos problemas, podendo ser abordados de forma diferente pelos investigadores (Vargas-Osorio & Zúñiga, 2016). Alguns dos métodos de solução utilizaram relaxação Lagrangiana, algoritmos como *Branch and Bound* e *Branch and Cut*, heurísticas como *Tabu Search*, a teoria dos grafos e sistemas de eventos discretos, algoritmos exatos baseados em heurísticas e ainda métodos híbridos que combinam heurísticas com algoritmos genéticos, relaxação Lagrangiana e *Clusters*, entre outras (Bischoff et al., 1995; Vargas-Osorio & Zúñiga, 2016).

3. Caracterização do projeto

No presente capítulo apresenta-se, primeiramente, o Grupo Saint-Gobain em todo mundo, bem como o Grupo Saint-Gobain em Portugal. Seguidamente, é realizada a apresentação da empresa Saint-Gobain em Portugal S.A, bem como a área de *Supply Chain*, onde foi desenvolvido o projeto.

Posteriormente, é feita a apresentação do setor logístico da Saint-Gobain Portugal S.A., assim como os processos associados à gestão de armazém, com foco no processo de preparação de encomendas. Com base na metodologia estabelecida inicialmente, foi efetuado um diagnóstico ao processo preparação de encomendas e ao respetivo empacotamento em palete, com o propósito de identificar os principais problemas, bem como as possíveis oportunidades de melhoria. Assim, na parte final do capítulo, é exposto o diagnóstico efetuado, assim como o plano de ação definido.

3.1. A Saint-Gobain

3.1.1. O Grupo Saint-Gobain em todo o mundo

A Saint-Gobain iniciou a sua atividade no ano 1655, em França, com a produção de Vidros Espelhos para o Palácio de Versailles (Saint-Gobain, 2022). Desde então, a organização alterou a sua estratégia, sendo que passou a apostar nos materiais e serviços para os mercados de habitat e indústria, fornecendo sustentabilidade e desempenho.

O grupo, líder mundial em construção leve e sustentável, encontra-se presente em 76 países e conta 166 mil colaboradores por todo o mundo. Integra diversas marcas nos quatro polos de atividades distintas, nomeadamente, construção, construção e distribuição, mobilidade e indústria. Na Figura 3, estão representadas as principais marcas dos diferentes setores de atuação do Grupo Saint-Gobain.



Figura 3 - Marcas do Grupo Saint-Gobain

Atualmente, a Saint-Gobain projeta, fabrica e distribui materiais e serviços para os mercados anteriormente referidos, que atendem tanto às necessidades de desempenho dos clientes, quanto aos requisitos da sustentabilidade.

Tem como principal objetivo a satisfação dos requisitos individuais da atualidade, no que diz respeito à conveniência, desempenho, segurança e estética. Além disso, pretende oferecer soluções associadas aos grandes desafios da eficiência energética e da proteção do ambiente. Num mundo que caminha para a neutralidade carbónica, a Saint-Gobain pretende fornecer uma gama completa de produtos e soluções que abordam as três grandes questões da atualidade: reduzir drasticamente os 40% das emissões de CO₂ ligadas à construção, proteger os recursos naturais e enfrentar o desafio da rápida urbanização nos países emergentes.

A visão da empresa é tornar-se líder mundial na construção sustentável, estando comprometida em alcançar a neutralidade carbónica até 2050, seguindo o seu propósito “Make the world a better home” (Saint-Gobain, 2022).

3.1.2. O Grupo Saint-Gobain em Portugal

A Saint-Gobain está presente em Portugal desde 1962, quando a Cristaleria Espanhola se estabeleceu em Portugal através de uma participação na Companhia Vidreira Nacional S.A, dedicada ao fabrico de vidro plano. O crescimento e a sólida expansão desenvolvida pela Saint-Gobain desde então, conferiu-lhe o reconhecimento ao nível empresarial e um intenso conhecimento nos mercados da construção, bem como no setor automóvel e industrial.

Atualmente, está presente com marcas para profissionais do setor industrial e profissionais da construção civil. Em Portugal, o grupo totaliza um volume de faturação correspondente a 180 milhões de euros. Conta com cerca de 800 colaboradores e possui 13 empresas, 8 fábricas, 3 centros de distribuição de materiais de construção e 1 centro de Investigação e Desenvolvimento (Saint-Gobain, 2022a). Assim, apresentam-se, na Figura 4, as empresas do Grupo Saint-Gobain e a sua distribuição, em Portugal.



Figura 4 - Distribuição das empresas do Grupo, em Portugal

3.1.3. A empresa Saint-Gobain Portugal S.A.

A Saint-Gobain Portugal S.A. está presente em Portugal desde 1990, com a marca *Weber*. Apresentou um volume de faturação anual de 66 milhões no ano de 2021.

A empresa possui um centro produtivo e um armazém em duas localizações distintas, Aveiro e Carregado. Conta com 160 colaboradores, sendo que 109 correspondem ao centro de Aveiro e 51 ao centro do Carregado. Tendo em conta este valor, apresenta uma percentagem de quadros superiores correspondente a 49%, perfazendo um total de 79 pessoas.

Atualmente, com foco na construção e reabilitação, a Saint-Gobain Portugal S.A. integra as seguintes marcas, apresentadas na Figura 5.



Figura 5 - Marcas da empresa Saint-Gobain Portugal S.A

1. *Isover* - soluções em lã mineral para isolamento térmico, acústico e proteção contra o fogo e soluções de climatização.

2. *Placo*® - sistemas de construção interior e exterior à base de gesso, para edifícios novos ou em reabilitação.
3. *Weber* - soluções em argamassas industriais para diferentes aplicações em construção: colagem e betumação de cerâmica, revestimento e renovação de fachadas, pavimentos, reparação e regularização de betão, impermeabilização e coberturas.

A SGPT é responsável pela produção de argamassas industriais da marca *Weber*. No entanto, a partir de 2020, foi integrada a comercialização das soluções das marcas *Placo* e *Isover*.

A divisão da estrutura organizacional da Saint-Gobain Portugal S.A. é simples e clara, estando dividida em seis departamentos. Cada departamento, por sua vez, é dividido em áreas distintas, como apresentado na Figura 6.

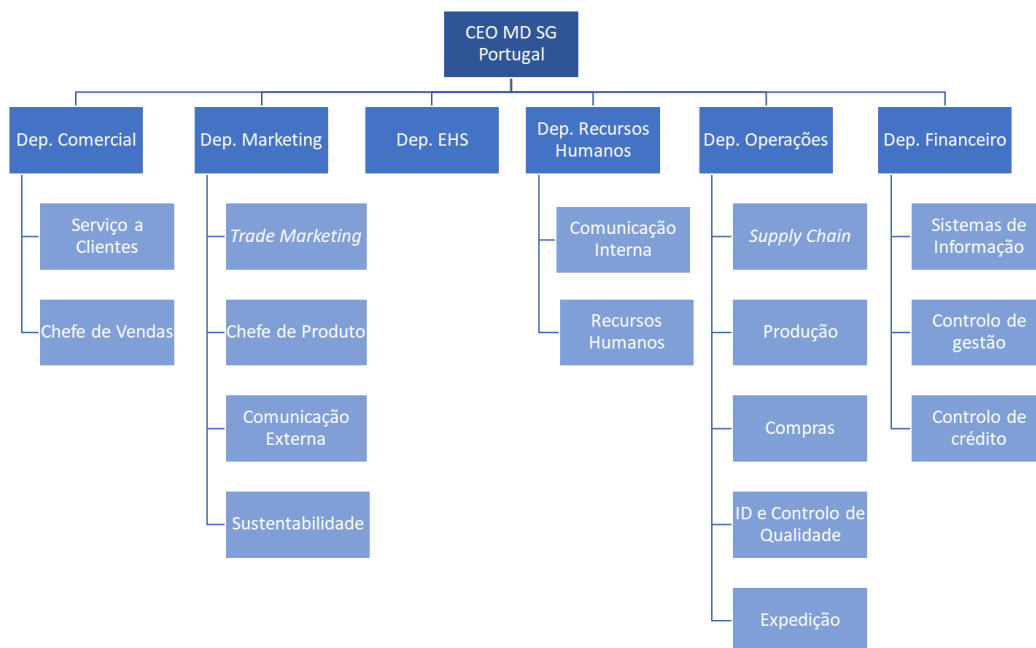


Figura 6 - Organograma da empresa

O projeto foi desenvolvido no âmbito da área de *Supply Chain* (SC), a qual pertence ao Departamento de Operações. O SC é responsável pelo aprovisionamento, pela logística e pela gestão de três módulos no SAP.

i. Aprovisionamento

Uma das funções do SC é o aprovisionamento. Na alçada do SC encontra-se o aprovisionamento das matérias-primas, embalagens e mercadorias, para os centros de Aveiro e do Carregado.

As matérias-primas são os componentes necessários à produção das argamassas industriais. Nas receitas das argamassas industriais podem distinguir-se duas categorias de matérias-primas: os componentes minoritários e os componentes majoritários. Os componentes majoritários englobam areias, cimentos e água, os quais são consumidos em grandes quantidades. Como tal, o aprovisionamento dos componentes majoritários está encarregue na área da produção. Assim, o SC é responsável pelo aprovisionamento dos componentes minoritários, o qual é feito tendo em conta as necessidades dos centros de Aveiro e do Carregado.

As embalagens representam os componentes necessários para o embalamento do produto, sendo que incluem os sacos, baldes, tampas, caixas, mangas e filmes. O aprovisionamento das embalagens é feito tendo em conta a produção e as suas necessidades, nos centros de Aveiro e Carregado.

No que diz respeito às mercadorias, estas são produtos que não sofrem transformação nas instalações da Saint-Gobain, ou seja, não fazem parte do processo produtivo da empresa. O aprovisionamento é feito considerando as mercadorias geridas por *stock* e as mercadorias geridas por encomendas. As mercadorias com maior previsão de vendas são geridas por *stock*, ou seja, é estabelecido um valor de *stock* de segurança, de forma a garantir a satisfação das encomendas dos clientes. As mercadorias com menor previsão de vendas são geridas por encomenda, ou seja, o pedido ao fornecedor é feito quando surgem as encomendas por parte dos clientes. As mercadorias podem ser requisitadas a empresas do Grupo Saint-Gobain de outros países, bem como a empresas que não pertencem ao Grupo. Desta forma, as mercadorias apenas sofrem armazenamento, nos centros de Aveiro e do Carregado. Na Figura 7 apresentam-se alguns exemplos de mercadorias, sendo que o leque de mercadorias comercializadas possui formatos e funções bem distintas, tais como: buchas, spray, placa de lã de vidro, placa de gesso, entre outros.



Figura 7 - Mercadorias

ii. Logística

No que diz respeito à Logística, o SC é responsável pelo processo de logística inversa, controlo de custos de transporte, organização e contratação de transporte de importação, exportação e nacional e ainda, negociação de preços de transporte.

O processo de logística inversa diz respeito ao processo de devolução de materiais e paletes, por parte do cliente. Relativamente ao controlo de custos de transporte, o SC é responsável pela definição das transportadoras que oferecem o melhor valor de serviço, validação dos custos de transporte diário e negociação dos custos de transporte. Por fim, destaca-se a organização e contratação de transporte de importação, exportação e distribuição nacional.

3.1.4. Setor Logístico e Produtivo da Saint-Gobain Portugal S.A.

Os centros produtivos de Aveiro e Carregado são responsáveis pela produção da marca *Weber*, os quais são classificados internamente como produtos acabados. No entanto, há determinados produtos *Weber* que não são produzidos em Portugal e como tal, são requisitados a empresas do grupo Saint-Gobain de outros países.

Como referido anteriormente, desde 2020, a Saint-Gobain comercializa as soluções das marcas *Placo* e *Isover*. Assim, para além de alguns produtos da marca *Weber*, a empresa também requisita as soluções da marca *Placo* e *Isover* a empresas do grupo Saint-Gobain de outros países. Assim, os produtos da marca *Weber*, *Isover* e *Placo* que são adquiridos a empresas do grupo de outros países são categorizados internamente como mercadorias.

Os produtos que são requisitados a empresas do grupo de outros países podem ser distribuídos em Portugal através de duas formas distintas:

1. Entrega direta a partir dos fornecedores (empresas do grupo de outros países) nos clientes em Portugal;

2. Aprovisionamento nos centros de Aveiro e Carregado e posterior distribuição em Portugal;

No caso da entrega direta, existem duas formas distintas no que diz respeito à organização do transporte:

1. O fornecedor organiza o transporte e entrega diretamente no cliente;
2. A empresa organiza o transporte e entrega diretamente no cliente;

No que diz respeito ao aprovisionamento, os pedidos são registados pelo *Supply Chain* e enviados aos fornecedores. O aprovisionamento é feito com regularidade para os produtos com maior previsão de vendas em Portugal e como tal, são mercadorias geridas por *stock*. Para além disso, também é efetuado o aprovisionamento para as matérias-primas e embalagens, consumidas nos dois centros da empresa. Assim, destacam-se as duas formas distintas no que diz respeito à organização do transporte:

1. O fornecedor organiza o transporte e entrega nos centros de Aveiro e do Carregado;
2. A empresa organiza o transporte e a entrega é feita nos centros de Aveiro e do Carregado.

3.2. Implementação de um *Warehouse Management System*

3.2.1. Motivações e objetivos

A integração das marcas *Isover* e *Placo* na Saint-Gobain Portugal S.A. provocou um aumento do número de produtos nos armazéns dos centros operacionais de Aveiro e do Carregado. Esta mudança acarretou diversas exigências e problemas no que diz respeito à gestão do armazém, impactando negativamente a sua organização e produtividade. Para além disso, ao longo dos anos, verificou-se a necessidade de melhoria dos KPIs associados à gestão de armazém e aos processos inerentes, destacando-se a precisão de *stock*, reclamações de clientes, tempo de espera de clientes, diferenças de *stock*, desvalorização de *stock* e produtividade do armazém. Estas lacunas e falhas tornaram evidente a necessidade de implementação de um *Warehouse Management System*.

As motivações e objetivos com a implementação do WMS são inerentes ao âmbito da segurança, serviço ao cliente, gestão de *stocks*, planeamento e desempenho do centro. Após implementação, o WMS terá impacto ao nível dos processos internos, processo da produção,

processos de entrada e saída de material. Assim, apresentam-se na Figura 8, os principais objetivos da empresa com a implementação do WMS:

| Serviço a Cliente | Gestão de <i>Stock</i> | Desempenho & Sustentabilidade |
|--|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Redução de reclamações devido a trocas de material • Rastreabilidade de todos os produtos • Redução do tempo de análise de reclamações • Conhecimento do <i>status</i> da encomenda | <ul style="list-style-type: none"> • Melhoria na utilização e organização do espaço do armazém • Gestão de validades automatizada • Cumprimento do FIFO • Redução de diferenças de inventário • Melhoria da eficiência no processo preparação de encomendas (<i>picking</i>) • Melhoria da precisão do <i>stock</i> | <ul style="list-style-type: none"> • Redução do consumo de papel • Introdução de KPI's de Armazém e Expedição • Agilização de distribuição de produtos em armazém por rotatividade • Redução do consumo energético dos empilhadores |

Figura 8 - Objetivos da implementação do WMS

Dada a complexidade e investimento necessário à implementação do WMS, foi executado um processo de aprovação do projeto, nos investimentos anuais da empresa. Após aprovação, foi iniciado o planeamento do projeto, com a criação da equipa responsável pela sua implementação. Assim, o WMS está centrado numa equipa multidisciplinar da empresa, com apoio e suporte de consultores internos do grupo Saint-Gobain. O papel dos consultores engloba o levantamento dos requisitos, acompanhamento e desenho do projeto, teste e ajustes após implementação.

A implementação foi inicializada em setembro de 2022, com o levantamento de requisitos. Nesta fase, foram realizados *workshops* no âmbito dos processos internos, processo de saída, processo de entrada e produção. Estes *workshops* foram conduzidos pelos consultores, dado o papel que desempenham relativamente à recolha de informação do estado atual dos processos, bem como a exposição do estado futuro dos mesmos, após a implementação do WMS. Assim, nestas ações formativas, foi possível identificar as tarefas que deixarão de ser executadas no futuro e as mudanças que sucederão nos processos, após a integração de dispositivos móveis nos processos inerentes ao armazém.

Neste momento, a equipa responsável pela implementação do projeto encontra-se no processo de desenho das localizações do armazém e respetiva alocação dos produtos. Após a fase de desenho, sucede-se a fase de testes, prevista para agosto e setembro de 2023. O *go-live* do WMS está previsto para novembro de 2023, nos dois centros produtivos, simultaneamente.

3.2.2. Gestão de encomendas no Armazém

3.2.2.1. Organização do Armazém

A equipa de expedição de Aveiro é composta por sete colaboradores, sendo que dois estão alocados ao balcão de expedição e cinco estão divididos entre a carga dos camiões e a execução de *picking*. Existem três turnos distintos na gestão dos colaboradores do armazém: das 6h às 14h, das 8h às 17h e das 14h às 22h.

O centro de Aveiro possui um armazém interior, com cerca de nove estantes, sendo que cada uma possui cinco níveis. Os primeiros dois níveis são destinados ao *picking*, ou seja, armazenam paletes já encertadas que servem para o *picking* de quantidades diferentes de material (por exemplo, dois sacos, cinco baldes, três caixas, entre outros). O terceiro, quarto e quinto nível é destinado ao reabastecimento dos níveis inferiores, ou seja, estes níveis armazenam paletes completas para abastecimento do primeiro e segundo nível, após a finalização do consumo total do material das paletes. Apresenta-se, na Figura 9, a organização das estantes mencionadas, no armazém interior de Aveiro.



Figura 9 - Estantes do armazém interior

O espaço disponível no armazém interior é bastante reduzido para as necessidades de armazenamento do centro de Aveiro e por isso, existe um armazém exterior. O armazém exterior destina-se ao armazenamento de paletes completas de material, o qual pode ser armazenado ao ar livre, sujeito às condições climáticas associadas. Para além disso, o armazém exterior desempenha, também, a função de reabastecimento do terceiro, quarto e quinto nível das estantes do armazém interior. Na Figura 10, apresenta-se o armazém exterior do centro de Aveiro, também conhecido como parque de cargas.



Figura 10 - Parque de cargas do centro de Aveiro

3.2.2.2. Registo de encomendas

A empresa possui quatro canais de distribuição dos seus produtos, os quais são os clientes de exportação, clientes tradicionais (aplicadores), clientes de distribuição (retalho e armazenamento) e Grandes Superfícies de Bricolage (GSB). As encomendas dos clientes apresentados podem surgir de diversas formas:

1. O próprio cliente envia a encomenda por *e-mail*;
2. A encomenda é colocada pelo cliente, via EDI;
3. Os comerciais da Saint-Gobain registam a encomenda do cliente numa plataforma interna da empresa, a qual é introduzida diretamente no SAP;

O registo da encomenda no SAP é feito pelo Serviço a Clientes. No momento da criação da encomenda, é efetuado o registo do material pretendido pelo cliente, sendo gerado um número de encomenda. A Figura 11 representa o processo de gestão de encomendas, na empresa, o qual é inicializado pela criação e registo da encomenda.



Figura 11 – Processo de gestão de encomendas atual

Os produtos das diferentes marcas podem ser comercializados em unidades de venda distintas, sendo que as principais categorias são à palete e à unidade. A unidade de palete

representa uma palete completa de um mesmo produto. No que diz respeito à unidade anteriormente referida, esta inclui as diferentes unidades individuais de produtos, sendo que as unidades elementares incluem: balde, saco, bisnaga, spray, caixa e rolo.

Para além do registo do material requerido, é também registada uma determinada condição de transporte, conforme o que é requisitado pelo cliente. Assim, destacam-se duas condições distintas: Transporte SGPT ou Sem Transporte.

No caso da condição “Transporte SGPT”, o transporte das encomendas é organizado pela empresa, ou seja, a SGPT é responsável pela contratação de empresas de transporte para executarem o serviço. Como tal, as transportadoras incutem custos à empresa, o que representa custos logísticos.

No que diz respeito à condição “Sem Transporte”, o cliente é o responsável pela recolha das suas encomendas, ou seja, ele próprio subcontrata transportadoras para executarem esse serviço. Deste modo, o transporte das encomendas com a condição “Sem Transporte” não representa qualquer custo para a SGPT.

3.2.2.3. Lançamento da Ordem de *Picking*

Após o registo da encomenda, é feita a verificação de disponibilidade do material. Se a totalidade do material da encomenda estiver disponível, é lançada a ordem de *picking*, tendo em conta a data desejada pelo cliente. Caso contrário, aguarda-se pela disponibilidade da totalidade do material, sendo que a ordem de *picking* apenas é lançada após a confirmação.

Se os materiais são requeridos à unidade, deverão, também, ser registadas as paletes necessárias para empacotar os diferentes produtos solicitados à unidade. Este registo é feito no momento de lançamento da ordem de *picking*. Desta forma, é possível dividir as encomendas em duas categorias diferentes: as encomendas com preparação e as encomendas sem preparação.

As encomendas sem preparação representam as encomendas onde a comercialização é apenas feita através de paletes completas de um mesmo material, ou seja, não requerem qualquer tipo de preparação. Deste modo, não é necessário executar o *picking* e o empacotamento de diferentes produtos, na palete. Por outro lado, as encomendas com preparação representam os pedidos onde deve ser executado o *picking* e o empacotamento

dos produtos na palete. Este caso ocorre quando existe combinação de diferentes produtos e respetivas unidades logísticas, a serem expedidas na mesma encomenda.

A ordem de *picking* é criada pelo Serviço a Clientes e a sua impressão é encadeada no escritório da expedição. As ordens de *picking* são separadas manualmente, tendo em conta se são com/sem preparação e com/sem Transporte. Em cada categoria, as ordens de *picking* são colocadas conforme a prioridade da sua preparação, tendo em conta a data desejada pelo cliente. A Figura 12 apresenta o local de armazenamento das ordens de *picking*, no escritório da expedição, até ao seu momento de recolha por parte dos operadores do armazém.



Figura 12 - Local de armazenamento das ordens de *picking*

3.2.2.4. Preparação de encomendas no armazém

Os colaboradores do armazém são os responsáveis pela recolha das ordens de *picking* correspondentes às encomendas com preparação, de cada condição de transporte distinta.

As encomendas com preparação e Transporte SGPT que sejam colocadas até às 12h do próprio dia, são entregues no dia seguinte. As encomendas com preparação e Sem Transporte são preparadas de acordo com a data solicitada pelo cliente, dado que os clientes são os encarregues pela recolha do material. Assim, no momento de recolha das ordens de *picking*, os colaboradores do armazém dão prioridade às encomendas com preparação e Transporte SGPT, uma vez que o seu *lead time* de preparação é mais reduzido. As encomendas com preparação e Sem Transporte são preparadas quando não existem encomendas com Transporte SGPT para executar.

Os colaboradores do armazém iniciam o processo de preparação de encomendas, com a recolha de um bloco de ordens de *picking* em papel, sendo que este é o principal suporte para a execução de *picking*. Após a recolha, dirigem-se ao armazém para iniciarem a preparação das encomendas, sendo que este processo é feito com o auxílio de um empilhador. O

processo é iniciado com a preparação da palete, sendo que a base da mesma é acondicionada com plástico. Posteriormente, é iniciado o *picking* dos produtos presentes na ordem de *picking*. À medida que é efetuado o *picking* dos produtos, o colaborador é o principal responsável pelo papel de tomada de decisão, no que diz respeito ao modo de execução do empacotamento e consolidação dos produtos na palete.

Finalizando a consolidação das paletes, estas são filmadas com plástico. Subsequentemente, são armazenadas numa zona temporária do armazém interior. Os colaboradores responsáveis pela carga dos camiões, os quais laboram no parque de cargas, são os responsáveis pela recolha das paletes no interior. Após executarem esta recolha, as paletes de preparação são armazenadas em estantes específicas, no exterior, enquanto aguardam pela recolha dos operadores logísticos.

O processo de preparação de encomendas implica uma tarefa de tomada de decisão por parte dos colaboradores, no que concerne ao empacotamento e consolidação de diferentes produtos na mesma palete. Isto deve-se ao facto da inexistência de procedimentos e diretrizes que determinem o modo adequado de execução do empacotamento de produtos na palete. Deste modo, evidencia-se a necessidade de avaliação e diagnóstico do processo de preparação de encomendas, especificamente no empacotamento de produtos na palete. Portanto, este processo é o principal objeto de estudo neste trabalho.

3.3. Diagnóstico ao processo de preparação de encomendas

Numa primeira instância do diagnóstico ao processo de empacotamento de diferentes produtos em palete, foi imprescindível a análise da representatividade das encomendas com preparação no setor logístico da empresa. Recorrendo às ferramentas disponibilizadas pelo SAP, foi efetuada uma recolha de dados que possibilitou a análise da representatividade das encomendas com preparação e das encomendas sem preparação. Sabendo que as encomendas com preparação são o foco deste trabalho, foi ainda efetuada a análise da relação das encomendas com preparação com as condições “Sem Transporte” e “Transporte SGPT”. Posteriormente, numa segunda fase do diagnóstico, foi efetuado um estudo de tempos e movimentos ao processo de preparação de encomendas, recorrendo à utilização de um cronómetro. Esta tarefa foi fundamental para a compreensão do processo de preparação de

encomendas, uma vez que permitiu a identificação das principais tarefas envolvidas no processo e os indicadores inerentes ao mesmo.

Numa terceira fase do diagnóstico, foram realizadas entrevistas aos colaboradores do armazém e ao responsável do mesmo, de forma a identificar as regras de empacotamento consideradas por cada um, mediante a sua experiência e *know-how*.

Por fim, foi efetuada uma análise à utilização de paletes de madeira na empresa, recorrendo ao uso de dados e informações internas. Neste âmbito, foram analisados os impactos da sua utilização, na empresa, nomeadamente o impacto ambiental e o impacto financeiro.

3.3.1. Encomendas com preparação e Transporte SGPT

A unidade de faturação das transportadoras à Saint-Gobain é a unidade de palete, ou seja, as transportadoras faturam a empresa por cada palete que transportam nos seus camiões. Como referido anteriormente, o número de paletes que são registadas na encomenda é aleatório, dada a inexistência de uma ferramenta que indique o número exato de paletes que são necessárias para empacotar os produtos de uma encomenda. Assim, no momento de preparação da encomenda, os colaboradores que executam o *picking* e o empacotamento, não possuem recursos nem instruções de como deve ser executado o empacotamento dos diferentes produtos na palete.

Na maioria dos casos, os colaboradores utilizam mais paletes do que aquelas que são necessárias, dado que não estão estabelecidas instruções nem procedimentos deste processo. Os colaboradores executam o empacotamento dos produtos segundo o *know-how* e experiência que adquirem ao longo do tempo. Neste caso, apreendem conhecimento por meio das falhas e problemas ocorridos em empacotamentos anteriores. Cada colaborador possui o seu modo de executar o empacotamento e as respetivas regras, uma vez que não existe uma regra universal e comum para todos. Assim sendo, não existe uniformidade no processo, especificamente no empacotamento dos produtos em palete.

No período de novembro de 2022 a janeiro de 2023, foram registadas 3884 encomendas com ordem de *picking*, sendo que 427 foram encomendas sem preparação e 3457 foram encomendas com preparação. Assim, as encomendas com preparação representam 89% do número total de encomendas. Desta forma, é possível constatar a representatividade das encomendas com preparação na gestão de tempo e recursos do armazém. Na Figura 13,

apresenta-se o gráfico representativo das encomendas com preparação e encomendas sem preparação, no centro de Aveiro, num período de três meses.

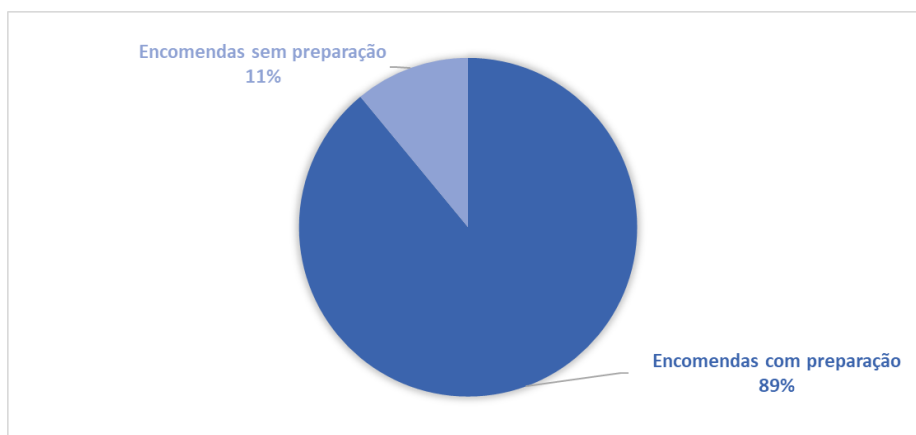


Figura 13 - Representatividade das Encomendas com preparação

Tendo em conta o mencionado anteriormente, cerca de 2433 foram encomendas Sem Transporte e 1454 foram encomendas com Transporte SGPT. Desta forma, as encomendas com Transporte SGPT representam 37% do número total de encomendas. Na Figura 14, apresenta-se o gráfico representativo das encomendas com a condição de Transporte SGPT e com a condição Sem Transporte, no centro de Aveiro, num período de três meses.

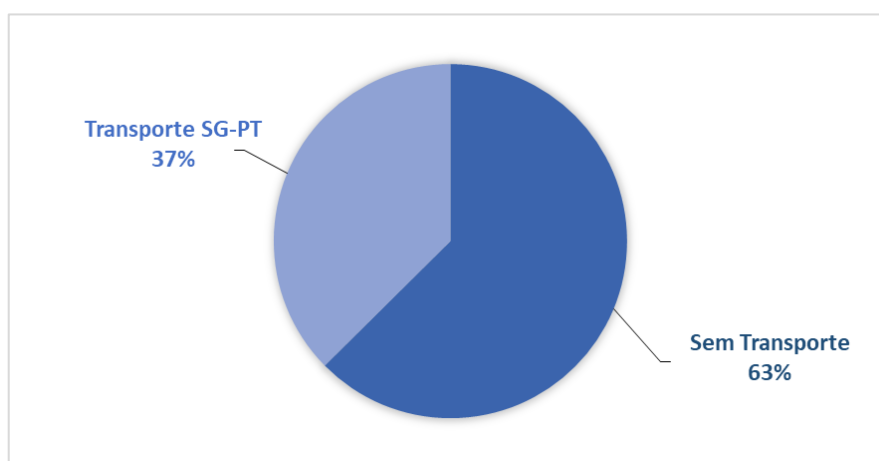


Figura 14 - Representatividade das Encomendas com Transporte SG-PT

Interligando os tópicos anteriores, é possível evidenciar o impacto das encomendas com preparação no serviço das encomendas com Transporte SGPT. Quanto maior for o número de paletes utilizadas na preparação de encomendas, maior será o valor cobrado pela transportadora à SGPT. Apesar de apenas 37% das encomendas serem com Transporte SGPT, este é um serviço que pode variar de 2/3 cargas a cerca de 4/5 cargas, por dia. Os

camhões contratados para este serviço são camiões *standard* TIR (Transporte Internacional Rodoviário), com 13,60 metros de comprimento, 2,44 metros de largura e 2,70 de altura. A capacidade destes camiões é de 24 toneladas e 33 Europaletes, com 1,2 metros de comprimento e 0,8 metros de largura. Os custos associados a este serviço são bastante elevados e têm bastante representatividade nos custos logísticos gerais da empresa. Desta forma, verificam-se custos logísticos desnecessários associados a este serviço, os quais podem e devem ser reduzidos.

3.3.2. Tempos e movimentos do processo de preparação de encomendas

Considerando a relevância das encomendas com preparação, foi efetuada a análise de encomendas com preparação e Transporte SGPT. Num período de 3 meses, de novembro a dezembro de 2023, das 3457 encomendas com preparação, cerca de 2067 são Sem Transporte e 1393 são com Transporte SGPT. Assim, cerca de 40% das encomendas com preparação são com Transporte SGPT. Na Figura 15, apresenta-se o gráfico representativo das encomendas com preparação e a respetiva condição de transporte: Transporte SGPT e Sem Transporte, num período de três meses.

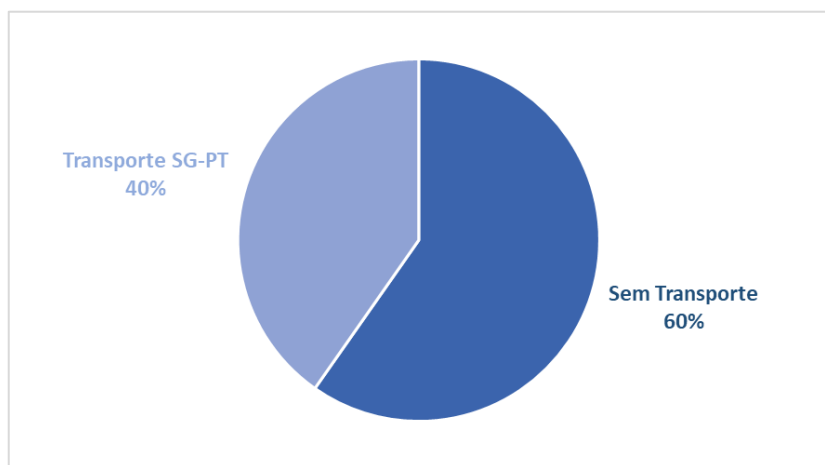


Figura 15 - Encomendas com preparação e condição de transporte

Do mês de dezembro, foram registadas 923 encomendas com preparação. Deste valor, cerca de 557 foram registadas com a condição Sem Transporte e 367 foram registadas com a condição de Transporte SGPT. Das 367 encomendas com preparação e Transporte SGPT, foi realizado o estudo de tempos e movimentos a uma amostra de 25 encomendas. Após a análise do estudo de tempos e movimentos, é possível destacar as tarefas mais frequentes no processo de preparação de encomendas, as quais estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Tarefas do processo de preparação de encomendas

| Principais Tarefas |
|--|
| Preparar palete |
| Movimento até próxima localização |
| Pegar e pôr produtos na paleta |
| Descer paleta dos níveis superiores |
| Abrir paleta |
| Arrumar paleta nos níveis de <i>picking</i> |
| Ida à reciclagem |
| Volta da reciclagem |
| Retirar paleta da estante |
| Pôr paleta na estante |
| Procurar produto |
| Contagem de material |
| Esperar por reabastecimento do exterior |
| Pôr paleta na envolvedora |
| Empacotamento da paleta |
| Deixar paleta na zona de espera |
| Análise e escrita da ordem de <i>picking</i> |

A tarefa de “Preparar paleta” concerne à recolha da paleta, uma vez que esta é o principal elemento para a execução do *picking*. No armazém interior existe um empilhamento de paletes armazenadas, o qual auxilia o processo de preparação de encomendas. Esta tarefa inclui a colocação de um plástico na base da paleta, para proteção dos produtos. A paleta é colocada nos garfos do empilhador e inicia-se a preparação da encomenda, sendo que a mesma permanece no empilhador durante todo o processo de preparação.

A tarefa de “Movimento até próxima localização” diz respeito a todos os movimentos realizados com o empilhador, entre localizações distintas, no armazém interior.

Relativamente à tarefa de “Pegar e pôr produtos na paleta”, esta corresponde a todos os movimentos do colaborador que implicam retirar os produtos da paleta do seu local de armazenamento e a respetiva colocação na paleta.

As tarefas de “Descer paleta dos níveis superiores”, “Abrir paleta” e “Arrumar paleta nos níveis de *picking*” estão associadas ao reabastecimento do primeiro e segundo nível das estantes. As paletes que estão armazenadas no terceiro, quarto e quinto nível encontram-se

filmadas (protegidas com um plástico). Como tal, no final da descida da paleta dos níveis superiores, é retirado o plástico da filmagem, o que diz respeito à tarefa “Abrir paleta”. De seguida o plástico é levado pelo colaborador para a reciclagem, correspondendo à tarefa “Ida à reciclagem”. Sucessivamente a esta tarefa, decorre “Volta da reciclagem”. Quando não existem paletes de reabastecimento nos níveis superiores, é solicitado o reabastecimento aos colaboradores que se encontram no armazém exterior. Assim, o tempo de espera pela paleta do exterior corresponde à etapa “Esperar por reabastecimento do exterior”.

Tendo em conta as regras de segurança da empresa no que concerne à ergonomia, as paletes dos níveis de *picking* (primeiro e segundo) devem ser retiradas das estantes com o empilhador, para que o colaborador possa pegar nos produtos em segurança. Assim, este procedimento diz respeito à tarefa “Retirar paleta da estante”. Após a colocação dos produtos na paleta, sucede a tarefa “Pôr a paleta na estante”.

Relativamente à tarefa de “Análise e escrita da ordem de *picking*”, esta decorre ao longo do processo de preparação da encomenda. A ordem de *picking* em papel é o principal suporte para os colaboradores executarem o *picking* dos produtos. Como tal, os colaboradores têm de analisar constantemente este documento para perceber em que ordem deverão executar o *picking*, ou seja, qual o primeiro produto a colocar na paleta e assim sucessivamente. Para além disso, esta tarefa inclui a realização de cálculos para perceber quantos produtos poderão ser empacotados na mesma paleta, tendo em conta as quantidades respetivas. Inclui, também, a constante verificação do produto na ordem de *picking* e a sua localização no armazém. Dada a inexistência da gestão de localizações, os colaboradores têm conhecimento das localizações dos produtos apenas pela experiência que adquirem ao longo do tempo. No entanto, quando não encontram o produto na localização esperada, deverão procurar a localização do mesmo, correspondendo à tarefa “Procurar produto”.

No fim da preparação das paletes, os colaboradores verificam se executaram o *picking* corretamente, realizando a “Contagem do material”. No final desta tarefa, a paleta é colocada na envolvente, o que diz respeito à tarefa “Pôr paleta na envolvente”. A envolvente é uma plataforma giratória que realiza a filmagem das paletes, relativa à tarefa “Empacotamento da paleta”. Após a filmagem da paleta, esta é colocada na zona intermédia de espera, no armazém interior. Posteriormente, o colaborador do exterior retira a paleta do

armazém interior e coloca-a numa estante específica do armazém exterior, até ao momento da recolha da encomenda pela transportadora.

Após a análise das principais tarefas do processo de preparação de encomendas, apresenta-se, na Tabela 6, uma análise aos tempos recolhidos do estudo de tempos e movimentos do processo em causa.

Tabela 6 - Análise dos dados do estudo de tempos e movimentos

| | |
|--|-------|
| Tempo mínimo de preparação de encomenda [min] | 5,13 |
| Tempo máximo de preparação de encomenda [min] | 72,48 |
| Tempo médio de preparação de encomenda [min] | 21,25 |
| Média percentual do tempo gasto em “Análise e escrita da ordem de <i>picking</i> ” [%] | 20 |
| Média percentual do tempo de Valor Não Acrescentado [%] | 2 |

No que diz respeito às encomendas da amostra selecionada, o tempo de execução do *picking* pode ser bastante variável, como podemos verificar com a tabela apresentada. O tempo de execução de *picking* não está diretamente relacionado com a quantidade de cada material, mas sim com o número de referências diferentes, ou seja, produtos diferentes com localizações distintas. Quanto maior for o número de referências na ordem de *picking*, mais tarefas estão associadas ao processo, dada a repetição de tarefas (mais movimentos no armazém, retirar as paletes da estante para a recolha dos produtos e a posterior colocação, por exemplo).

Apresenta-se na Tabela 7, os dados associados ao número de produtos das encomendas analisadas e respetiva ordem de *picking*.

Tabela 7 - Produtos na ordem de *picking*

| | |
|--------------------|-----|
| Máximo de produtos | 129 |
| Mínimo de produtos | 13 |
| Média de produtos | 40 |

No que respeita à lista de tarefas do processo de preparação de encomendas e após a análise dos tempos despendidos na sua realização, a tarefa de “Análise e escrita de *picking*” destaca-se pela sua representatividade no processo. Esta atividade constitui, em média, cerca de 20% do tempo total de execução de *picking*. No que diz respeito a tarefas de valor não

acrescentado, frequentemente associadas a tempos de espera, representam cerca de 2% do tempo total de execução de *picking*.

3.3.3. Análise da utilização de paletes na empresa e o seu impacto

A paleta de madeira é um bem utilizado internamente na empresa, para expedição de produto acabado em paletes completas e para expedição de encomendas de cliente, com produtos diferentes.

As paletes de madeira ocupam cerca de 90% do mercado mundial de paletes. Este facto pode ser explicado pelas características vantajosas da madeira, que incluem boa resistência mecânica, boa resistência aos agentes atmosféricos, baixo custo relativo e durabilidade (Caldas, 2021).

A madeira mais utilizada na produção de paletes é a de pinheiro (Caldas, 2021). Assim sendo, a fim de evitar a disseminação do nemátodo da madeira do pinheiro (*Bursaphelenchus xylophilus*), a legislação fitossanitária em vigor, em Portugal, estabelece a exigência de submeter toda a madeira de coníferas a tratamento térmico. Esta obrigação destina-se aos Estados-membros da União Europeia e a países terceiros, segundo a Norma Internacional para as Medidas Fitossanitárias (NIMF) n.º 15 do *International Plant Protection Convention* (IPPC) (DGAV, 2020).

No processo de produção de paletes, esta é o item que representa maior participação na pegada de carbono, seguido pelo transporte das paletes até ao seu local de utilização (Caldas, 2021). De acordo com a norma ISO 14067 e segundo (Caldas, 2021), o processo de produção de paletes apresenta uma pegada carbónica de 6,9 kgCO₂-eq/m² para paletes produzidas de acordo com os padrões da União Europeia. Por sua vez, o principal impacto da madeira no seu processo de produção é o consumo de combustíveis fósseis para a sua obtenção e corte (Caldas, 2021). Assim, uma menor produção de paletes novas traduz-se numa menor produção de carbono (CarePack, 2020).

Para além do impacto ambiental da utilização da madeira na empresa, mais especificamente das paletes de madeira, efetuou-se uma análise ao custo de posse de *stock* associado à paleta, através do *Trade Working Capital*.

O *Trade Working Capital* é definido como a diferença entre os ativos correntes e os passivos correntes (Johnson, 2023; Ward, 2023). Os ativos correntes incluem:

- Inventário, o qual representa os produtos não vendidos e que se encontram em armazenamento, na empresa.
- Recebíveis, o que representa o saldo em dinheiro que é devido à empresa por bens ou serviços entregues, mas ainda não pagos pelos clientes.

Já os passivos correntes incluem as obrigações financeiras da empresa com credores dentro de um ano, ou seja, é o valor que a empresa deve (Ward, 2023).

As entradas, como a receita de vendas, aumentam o *Trade Working Capital*. As saídas, como perda de lucro líquido e compras, diminuem o *Trade Working Capital* (Johnson, 2023). Isso demonstra que antecipar os pagamentos a fornecedores, reduzir o nível de *stock* em armazém e diminuir os créditos comerciais concedidos aos clientes, aumenta a rentabilidade da empresa (Helena, 2017).

Considerando o mencionado, o *Trade Working Capital* é um indicador analisado mensalmente pela gestão da Saint-Gobain Portugal S.A. Dentro do *Trade Working Capital*, é também efetuada uma análise às matérias-primas e embalagens em *stock*, especificamente às que mais contribuem para este indicador. Tendo em conta a análise efetuada, constatou-se que a paleta de madeira é um dos produtos que mais contribui para os custos de *stock*, estando constantemente situada no TOP 10.

Na SGPT, a paleta de madeira é adquirida a dois fornecedores distintos: um que fornece paletes recondicionadas e outro que fornece paletes novas. É de salientar que em apenas dois anos, o preço da paleta subiu cerca de 100%, duplicando o seu custo. Tendo em conta o valor de compra da paleta de madeira e o custo associado ao *stock* de paletes, evidencia-se a relevância que este artigo representa para a empresa. Como tal, a paleta de madeira é um objeto de estudo por parte da gestão da empresa, dado o seu impacto financeiro.

3.4. Oportunidades de melhoria e plano de ação

Após a análise dos tópicos anteriores, verifica-se a inexistência de procedimentos e diretrizes universais para a execução do empacotamento dos diferentes produtos na paleta. Para além disso, a paleta representa um dos produtos com maior custo de *stock* para a empresa, o qual a empresa pretende reduzir. Como tal, denota-se a necessidade de otimização do processo de empacotamento de paleta, em todos os canais de distribuição da empresa.

A redução dos custos de *stock* associados à palete e a redução dos custos associados ao transporte são objetivos da empresa e da área de *Supply Chain*, respetivamente. Como tal, reforça-se a necessidade de otimização do processo, dado o impacto financeiro que representa para a organização.

No âmbito do WMS, o principal objetivo do presente projeto prende-se com a melhoria e otimização do processo de empacotamento de palete, o que tal pode beneficiar com o desenvolvimento de um modelo matemático de otimização combinatória. O mesmo será desenvolvido e integrado no sistema ERP da empresa, após a implementação do WMS. O principal objetivo do modelo prende-se com a minimização do número de paletes utilizadas por encomenda, de modo a garantir a racionalização do consumo de paletes a nível interno.

Tendo em conta que o estágio iniciou em outubro de 2022 e terminou em maio de 2023, apresenta-se, na Figura 16, o plano de ação estabelecido e o respetivo cronograma. De acordo com os objetivos definidos, as tarefas a desenvolver são divididas no âmbito do WMS e no âmbito do problema de empacotamento em palete.

| | Dez | Jan | Fev | Mar | Abr | Ma |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| ÂMBITO DO WMS | | | | | | |
| Análise das melhorias previstas nos processos de armazém | | | | | | |
| ÂMBITO DO PROBLEMA DE EMPACOTAMENTO EM PALETE | | | | | | |
| Levantamento das restrições associadas ao processo de carregamento da palete | | | | | | |
| Desenvolvimento de soluções para o problema de empacotamento | | | | | | |
| Estudo do impacto da solução desenvolvida | | | | | | |

Figura 16 – Cronograma do projeto

O primeiro tópico está englobado no âmbito do WMS e diz respeito às mudanças nos processos de armazém, nomeadamente no processo de preparação de encomendas e respetiva execução do *picking*, após a implementação do WMS. Para além disso, será feita uma análise do impacto ambiental do WMS, no quotidiano da empresa.

O segundo, terceiro e quarto tópico estão associados ao problema de empacotamento em palete, o qual é o foco deste projeto. O segundo tópico representa a recolha de dados associada às restrições do problema do empacotamento em palete, no contexto logístico da SGPT. Seguidamente, no terceiro tópico, será apresentado o modelo matemático desenvolvido para o problema de empacotamento em palete e a respetiva implementação e teste no *software* CPLEX.

O quarto tópico engloba a análise realizada ao impacto esperado da implementação de um algoritmo para o problema de empacotamento em palete, no contexto empresarial da SGPT.

4. Resultados do projeto

4.1. Análise das melhorias após o WMS

4.1.1. Impacto no processo preparação de encomendas

Nos momentos formativos dos *workshops* inicialmente realizados, foi exposto pelos consultores o *modus operandi* após a implementação do WMS. Desta forma, foi possível identificar as tarefas que deixarão de ser executadas no processo de preparação de encomendas.

Após a implementação do WMS, o procedimento da gestão de encomendas irá sofrer alterações, comparativamente ao apresentado no Capítulo 3. Assim, apresenta-se o estado futuro do processo de gestão de encomendas, na Figura 16.



Figura 17 - Processo de gestão de encomendas, após WMS

O cliente envia encomenda e o Serviço a Clientes efetua o registo da encomenda no SAP. O Serviço a Clientes envia a disponibilidade de material ao cliente, confirmando a data desejada de entrega. Posteriormente, o responsável de logística faz a planificação das ondas de preparação de *picking* e a ordem de *picking* é emitida diretamente para os dispositivos móveis associados ao WMS. As encomendas serão preparadas com base na data desejada de entrega, tendo em conta o planificado na onda de *picking*. A saída de material manter-se-á como atualmente, ou seja, os clientes organizam a recolha de material ou a SGPT organiza a entrega das encomendas, através da contratação de transportadoras. Acrescenta-se a tarefa de envio dos códigos SSSC (*Serial shipping container code*) aos clientes. Os códigos SSSC representam uma chave de identificação da GS1 para a identificação exclusiva de unidades logísticas, sendo um dos padrões mais importantes na aplicação de um processo de rastreabilidade. A GS1 é uma organização global e sem fins lucrativos, a qual desenvolve e mantém o sistema de padrões de cadeia de abastecimento, mais amplamente utilizado no mundo (GS1 US, 2019).

Uma unidade logística pode ser qualquer combinação de unidades reunidas ou individuais para expedição, transporte e armazenamento, como por exemplo, caixas, paletes,

contentores, entre outros. Este código permite rastrear individualmente uma unidade logística, suportando a rastreabilidade de pedidos e entregas, para além da receção automatizada de produtos e mercadorias (GS1 US, 2019).

Como referido anteriormente, a ordem de *picking* em formato papel é o principal suporte ao processo de preparação de encomendas. No futuro, os colaboradores utilizarão dispositivos móveis eletrónicos, os quais serão o principal suporte ao processo de execução de *picking*. Assim, é apresentado na Figura 18, um exemplo de dispositivo móvel a utilizar pelos operadores do armazém, após a implementação do WMS.

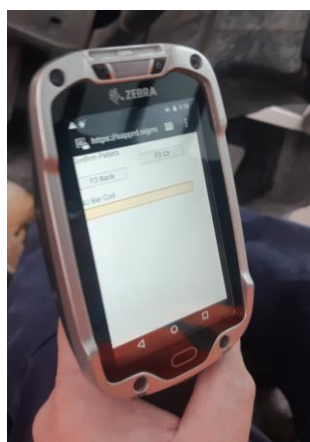


Figura 18 – Exemplo de dispositivo móvel integrado no WMS

Após a implementação do WMS, as encomendas serão planeadas por *wave picking*, também conhecido por ondas de preparação de *picking*. Neste caso, os pedidos serão disponibilizados em “ondas”, todas as manhãs e tardes, tendo em conta a data desejada pelo cliente e o horário de chegada das transportadoras. De acordo com a recolha de dados no estudo de tempos e movimentos e tendo em conta as mudanças após o WMS, é possível destacar as tarefas que deixarão de ser executadas durante o processo de preparação de encomendas e respetiva execução de *picking*. Assim, apresentam-se, de seguida, as tarefas identificadas:

1. Análise e escrita da ordem de *picking*;
2. Descer palete dos níveis superiores;
3. Abrir palete;
4. Arrumar palete nos níveis de *picking*;
5. Procurar produto;
6. Contagem de material.

No que diz respeito à tarefa de “Análise e escrita da ordem de *picking*”, esta deixará de ser executada, uma vez que o documento em papel será substituído pelos dispositivos móveis associados ao WMS. As tarefas de “Descer palete dos níveis superiores”, “Abrir palete” e “Arrumar palete nos níveis de *picking*” estão incluídas no processo de reabastecimento dos níveis inferiores pelos níveis superiores. Como pré-estabelecido pela empresa, a tarefa de reabastecimento será planeada de forma que seja executada antes das ondas de preparação de *picking*, não consumindo tempo ao processo de preparação de encomendas. Relativamente às tarefas de “Procurar produto” e “Contagem de material”, estas deixarão de ocorrer, uma vez que o dispositivo móvel indicará a localização do produto e a sua recolha é registada diretamente no sistema. Como tal, os operadores não terão de procurar um determinado produto no armazém, nem realizar a contagem de todos os produtos, após a consolidação da palete.

Após o pressuposto referido, é possível perceber a otimização de tempo que decorrerá no futuro, dada a eliminação de tarefas do processo. Desta forma, foi possível simular qual seria a otimização de tempo, tendo em conta as tarefas a serem eliminadas. Na Tabela 8, apresenta-se a análise das melhorias no processo de preparação de encomendas e respetivo processo de *picking*.

Tabela 8 - Análise das melhorias ao processo de *picking*

| | |
|--------------------------------------|-----|
| Média percentual de redução de tempo | 39% |
| Maior redução percentual de tempo | 57% |
| Menor redução percentual de tempo | 26% |

Na amostra de 25 encomendas selecionada para o estudo, verifica-se que a média percentual de redução de tempo foi de 39%. É de salientar que a maior redução do tempo associado à execução do *picking* foi de 57%. Neste caso em específico, a duração de execução de *picking* passaria para menos de metade do tempo atual de execução.

Numa fase inicial de implementação do projeto prevê-se um aumento do tempo na execução de *picking*, o que está relacionado com a adaptação dos operadores aos dispositivos móveis e à própria gestão de armazém que será automatizada. No entanto, apesar dos valores de otimização de tempo apresentados serem apenas previsões, é de notar que determinadas atividades serão eliminadas do processo. Como tal, após a fase de formação e adaptação dos

operadores, prevê-se efetivamente uma otimização do tempo associado à execução de *picking*.

4.1.2. Impacto ambiental

Como referido anteriormente, a preparação de encomendas deixará de ser efetuada com o suporte da ordem de *picking* em papel e passará a ser executada com o suporte de dispositivos eletrónicos móveis.

Numa análise efetuada aos dados associados às ordens de *picking*, apresenta-se na Tabela 9, o número de ordens de *picking* emitidas de novembro de 2022 a janeiro de 2023, no centro de Aveiro.

Tabela 9 - Nº de ordens de picking emitidas, no centro de Aveiro

| Novembro | Dezembro | Janeiro |
|----------|----------|---------|
| 1253 | 1053 | 1435 |

Com base nestes valores, o total de ordens de *picking* é 3741 e a média de ordens de *picking* emitidas por mês é cerca de 1247. Tendo em conta este valor, a previsão anual de poupança seria de 14 964 ordens de *picking* em papel. Assim, assume-se a poupança mínima de 14 964 folhas de papel, uma vez que uma ordem de *picking* pode ter mais que uma folha de papel. Considerando uma resma de papel com 500 folhas, a poupança anual seria de 29 resmas de papel, apenas no centro de Aveiro.

Quanto aos valores associados ao centro do Carregado, apresenta-se na Tabela 10, o número de ordens de *picking* emitidas de novembro de 2022 a janeiro de 2023.

Tabela 10 - Nº de ordens de picking emitidas, no centro do Carregado

| Novembro | Dezembro | Janeiro |
|----------|----------|---------|
| 1280 | 1047 | 1351 |

Com base nestes valores, o total de ordens de *picking* é 3687 e a média de ordens de *picking* emitidas por mês é cerca de 1226. Tendo em conta este valor, a previsão anual de poupança seria de 14 712 ordens de *picking* em papel. Desta forma, assume-se que a poupança mínima seria de 14 712 folhas de papel. Considerando uma resma de papel com 500 folhas, a poupança anual seria de 29 resmas de papel, no centro do Carregado.

A implementação do WMS proporciona a redução do consumo de papel, dado que a ordem de *picking* será disponibilizada e apresentada no dispositivo eletrónico. Tendo em conta que a sustentabilidade é uma das áreas de foco da SGPT e do Grupo Saint-Gobain, a nível mundial, evidencia-se o contributo do WMS para o cumprimento dos valores e da missão a que a empresa se compromete.

4.2. Levantamento das restrições associadas ao problema

Para o entendimento do problema em causa, foi crucial a identificação e a compreensão de todas as restrições associadas à consolidação dos produtos na palete. No que diz respeito às restrições associadas à palete, é possível identificar os limites máximos associados à sua capacidade, apresentados de seguida:

1. Peso = 1250 kg
2. Comprimento = 1200mm
3. Largura = 800mm
4. Altura = 1300mm

O comprimento e largura são as limitações físicas da palete. Como tal, são consideradas as dimensões fixas da Euro Palete *standard*, a qual é utilizada na preparação e expedição de encomendas, na empresa.

O peso suportado pela palete deverá ser igual ou inferior a 1250 Kg e a altura da palete consolidada deverá ser igual ou inferior a 1300 mm. Estes valores foram definidos internamente pela equipa de *Supply Chain*, tendo em conta o que já é praticado pela SGPT. O valor do peso foi definido tendo em conta o valor de peso estabelecido pela empresa para as paletes completas de um material. Quanto à altura, foi estabelecido um valor máximo para assegurar a estabilidade de carga no transporte rodoviário, considerando, também, as exigências das transportadoras.

Após o levantamento das restrições associadas à palete, foi efetuado o levantamento da lista de produtos que são consolidados em palete. Tendo em conta que existem produtos que são comercializados apenas por palete completa, foi imperativo fazer o levantamento dos produtos que são comercializados à unidade.

Previamente ao início do presente trabalho, foi efetuada a recolha da identificação dos diferentes produtos comercializados pela empresa, bem como as suas dimensões, num documento *Excel*. Esta recolha de dados foi realizada em setembro de 2022, dada a

necessidade para a implementação do WMS. Após a análise do documento, constatou-se a inexistência de dimensões de determinados produtos, quer de produtos acabados quer de mercadorias. Para colmatar as falhas do documento existente, foi efetuado um cruzamento dos dados presentes no documento *Excel* em questão e do que se encontra registado em SAP. Deste cruzamento de dados foi criado um segundo documento *Excel*.

A partir do segundo documento foram definidas 43 categorias de produtos que são consolidados em palete, como apresentado no Anexo A. As categorias de produtos dizem respeito às diferentes tipologias de produto comercializadas à unidade, as quais são saco, balde, caixa, rolo, spray e bisnaga. Inicialmente foram definidas 46 categorias de produto, que englobavam os Jerrican de 5L, Jerrican de 20L e Caixa Perfil Vertical. No entanto, estas três categorias foram eliminadas devido às suas características físicas.

Os produtos Jerrican de 5L e Jerrican de 20L são uma mercadoria da empresa e são expedidos a partir dos centros de Aveiro e Carregado. No entanto, não são considerados nas categorias de material definidas, uma vez que a embalagem destes produtos é bastante frágil e dada a compreensão e a força que é feita após a filmagem da palete, a embalagem pode quebrar facilmente. Como tal, não são empacotados com outros produtos na mesma palete, uma vez que podem derramar e danificar os restantes produtos. Quanto à Caixa Perfil Vertical, esta apresenta um comprimento de 2,50m e como tal, deverá ser expedida isoladamente, como um volume.

Assim, após a eliminação das 3 categorias mencionadas, apresenta-se um total de 43 categorias de produtos a considerar neste trabalho.

Posteriormente, foi efetuada uma recolha de dados junto do responsável e dos operadores do armazém, no que concerne às regras de empacotamento a considerar em cada produto. Assim, foi possível perceber os produtos que não podem ser empacotados por cima de outros, tendo em conta a fragilidade das embalagens, o peso e as limitações de cada produto e do que este é capaz de suportar. Da análise de dados correspondente, surgiu a matriz de combinações de produtos, como apresentado no Anexo B. A matriz é uma ferramenta de extrema importância, uma vez que permite a identificação das regras de empacotamento a considerar no processo de preparação de encomendas, mais especificamente no empacotamento dos produtos em palete.

4.3. Desenvolvimento de soluções para o problema de empacotamento

O problema de empacotamento de paletes consiste na seleção dos produtos e a respetiva decisão de onde colocá-los na paleta, com o objetivo de minimizar o número de paletes necessárias para a expedição da encomenda desejada pelo cliente.

Dada uma paleta com dimensões e características conhecidas, e vários itens de volumes regulares (produtos) de dimensões inferiores às da paleta e previamente conhecidas, pretende-se minimizar o número de paletes necessárias para expedir as encomendas. Tendo em conta estas premissas, é necessário considerar as restrições a que os produtos e a paleta estão sujeitos. Neste sentido, a restrição do peso para garantir a estabilidade na paleta é uma restrição importante que deve ser considerada na formulação matemática. Para além disso, são consideradas regras de empacotamento, muitas vezes postas como exigências, que asseguram que certos tipos de produtos não podem ser empacotados por cima de outro. Para isso, podemos formular o problema como um problema de otimização inteira, sujeito a:

1. Os volumes empacotados não podem se sobrepor ou transbordar da paleta;
2. Os volumes empacotados devem ser empilhados em camadas paralelas ao plano xy da paleta.

A encomenda enviada pelo cliente é composta por uma lista de produtos, $i \in I$.

Considera-se que os produtos a serem empacotados são volumes regulares, com dimensões $c \times l \times a$. A dimensão de cada categoria de produto i é representado por (c_i, l_i, a_i) com quantidade de n_i unidades e com peso igual a p_i .

A paleta tem dimensões (C, L, A) , onde C , L e A representam o comprimento, largura e altura, respetivamente. O peso máximo suportado pela paleta é representado por P e cada paleta utilizada é representada por k .

As posições dos produtos na paleta são definidas começando da base para o cimo, definindo (p^x, p^y, p^z) as coordenadas dos pontos de inserção de um produto na paleta.

Após o estudo de diferentes modelos matemáticos a serem considerados como suporte para este trabalho, foi selecionado um modelo de Programação Linear Inteira, como descrito no trabalho de (Alonso et al., 2017). Este modelo foi adaptado, de modo a considerar as restrições que devem ser tidas em conta no contexto prático do problema de empacotamento em paleta, na Saint-Gobain Portugal S.A. Como mencionado por (Alonso et al., 2017), os

modelos de Programação Linear Inteira são ferramentas flexíveis para adicionar ou remover restrições de acordo com os requisitos específicos de um determinado problema. Estes modelos têm apresentado um comportamento computacional bastante bom, como evidenciado no trabalho de (Alonso et al., 2017).

O modelo de (Alonso et al., 2017) é tratado como um problema tridimensional na sua formulação matemática. No contexto prático do setor logístico da SGPT, o problema deve ser tratado como um problema tridimensional, uma vez que a dimensão da altura deve ser considerada. A altura dos produtos é diferente, não sendo possível defini-la como uma variável fixa.

Para além do arranjo geométrico dos produtos na palete, existem restrições que devem ser consideradas, nomeadamente, as restrições de limite de peso suportado pela palete e de orientação dos produtos. O peso máximo estabelecido e suportado pela palete não deverá ser ultrapassado. Exceder os limites de peso representa um risco para a segurança de todos os envolvidos nas operações de carga e descarga do transporte, sendo que o objetivo é evitar que a carga seja danificada durante o processo.

Assim, apresenta-se de seguida, os parâmetros definidos e o modelo matemático para o problema de empacotamento em palete, na SGPT:

| Parâmetros | Descrição |
|----------------------------|---|
| I | Conjunto das categorias de produto definidas |
| n_i | Quantidade requerida por produto i |
| p_i | Peso do produto i |
| (c_i, l_i, a_i) | Dimensões do produto i |
| (C, L, A) | Dimensões da palete |
| P | Peso máximo suportado pela palete |
| (p_i^x, p_i^y, p_i^z) | Coordenadas do produto i na palete |
| P_i^x | Conjunto de possíveis coordenadas do produto i no eixo x |
| P_i^y | Conjunto de possíveis coordenadas do produto i no eixo y |
| P_i^z | Conjunto de possíveis coordenadas do produto i no eixo z |
| Q_i | Conjunto de tipos de orientação do produto i na palete |
| c_{iq} | Matriz de avaliação do comprimento dos produtos i na orientação q |
| l_{iq} | Matriz de avaliação da largura dos produtos i na orientação q |
| a_{iq} | Matriz de avaliação da altura dos produtos i na orientação q |
| L_{inf} | Limite inferior do número de paletes necessárias |
| s_i | Variável binária que indica se o produto i é posicionado na palete |
| (x_i, y_i, z_i) | Posicionamento do produto i no canto inferior esquerdo da palete |
| (c_{xi}, c_{yi}, c_{zi}) | Variável binária que indica a que eixo o comprimento do produto i está paralelo |
| (l_{xi}, l_{yi}, l_{zi}) | Variável binária que indica a que eixo a largura do produto i está paralelo |

| | |
|----------------------------|--|
| (a_{xi}, a_{yi}, a_{zi}) | Variável binária que indica a que eixo a altura do produto i está paralelo |
| eij | Variável binária que indica que o produto i está à esquerda do produto j |
| dij | Variável binária que indica que o produto i está à direita do produto j |
| aij | Variável binária que indica que o produto i está à atrás do produto j |
| fij | Variável binária que indica que o produto i está à frente do produto j |
| cij | Variável binária que indica que o produto i está em cima do produto j |
| M | Número arbitrário e grande |

Variáveis:

$$x_{iqp^x p^y p^z k} = \begin{cases} 1, & \text{se o produto do tipo } i \text{ na orientação } q \\ & \text{tem o vértice inferior esquerdo localizado na posição } (p^x, p^y, p^z) \text{ da paleta } k \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$, i \in I, q \in Q, p^x \in P^x, p^y \in P^y, p^z \in P^z, k \in K$$

$$y_k = \begin{cases} 1, & \text{se a paleta é usada} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}, k \in K$$

G_k : número de produtos na última paleta, $k \in K, k \leq L_{inf}$

Restrições:

(1)

Minimizar $Z =$

$$\sum_{k \in K} y_k + \sum_{k \in K; k \geq L_{inf} \cap k < K} G_k$$

Sujeito a:

(2)

$$\sum_{q \in Q_i} \sum_{p^x \in P_i^x} \sum_{p^y \in P_i^y} \sum_{p^z \in P_i^z} \sum_{k \in K} x_{iqp^x p^y p^z k} = n_i, i \in I$$

(3)

$$\sum_{i \in I} \sum_{q \in Q} \sum_{p^x \in P^x} \sum_{p^y \in P^y} \sum_{p^z \in P^z} x_{iqp^x p^y p^z k} \leq G_k + (1 - y_k + y_{k+1}),$$

$$, k \in K: k \geq L_{inf} \cap k \in K$$

(4)

$$\sum_{i \in I} \sum_{q \in Q} \sum_{p^x \in P^x} \sum_{p^y \in P^y} \sum_{p^z \in P^z} p_i x_{iqp^x p^y p^z k} \leq P_{y_k}, k \in K$$

(5)

$$y_k \geq y_{k+1}, k \in |K|$$

(6)

$$y_k = 1, k \in K, k \leq L_{inf}$$

(7)

$$\sum_{i \in I} \sum_{q \in Q} \sum_{p^x \in P^x: p^x - c_{iq} + 1 \leq p_p^x \wedge p_i^x} \sum_{p^y \in P^y: p^y - l_{iq} + 1 \leq p_p^y \wedge p_i^y} \sum_{p^z \in P^z: p^z - a_{iq} + 1 \leq p_p^z \wedge p_i^z} x_{iqp^x p^y p^z k}$$

$$\leq y_k, k \in K$$

(8)

$$x_{iqp^x p^y p^z k} \in \{0; 1\}, i \in I, q \in Q, p^x \in P^x, p^y \in P^y, p^z \in P^z, k \in K$$

(9)

$$y_k \in \{0, 1\}, k \in K$$

(10)

$$G_k \in \mathbb{Z}^+, k \in K$$

(11)

$$\gamma_{ij} = 0, i, j \in I$$

A equação (1) refere-se à função objetivo, sendo que o objetivo é minimizar o número de paletes necessárias para acomodar o máximo de produtos possíveis na paleta. A primeira parcela diz respeito à minimização do número de paletes necessárias e a segunda parcela diz respeito à acomodação do máximo de produtos possíveis na paleta.

A restrição (2) assegura que a quantidade requerida do produto j é satisfeita. O produto i com orientação q , tem vértice inferior esquerdo localizado na posição (p^x, p^y, p^z) da paleta k e a procura do produto i é satisfeita de acordo com o pedido.

A restrição (3) concerne à compactação dos produtos na paleta de forma a evitar espaços vazios, otimizando a capacidade da mesma.

A restrição (4) assegura que a soma dos pesos de todos os produtos empacotados não excede o peso máximo suportado pela paleta, o qual é definido pela organização.

A restrição (5) ordena as paletes, definindo que a paleta $k + 1$ só pode ser utilizada se a paleta k já tenha sido utilizada.

A restrição (6) define como unitária a variável associada às paletes.

A restrição (7) assegura que não há sobreposição de produtos em posição já ocupada por outros produtos.

As restrições (8), (9) e (10) definem o domínio das variáveis do modelo. As variáveis $x_{iqp^y p^z k}$ e y_k são variáveis binárias e a variável G_k apresenta valores inteiros e positivos.

A restrição (11) impede que o produto i seja colocado por cima do produto j .

Tendo em conta que a primeira função objetivo visa a minimização das paletes utilizadas por encomenda, foi idealizada a criação de uma segunda função objetivo, dada a sua correlação à primeira função objetivo. A segunda função objetivo procura minimizar o espaço não utilizado na paleta. Deste modo, esta função complementa a minimização da quantidade de paletes utilizadas, como também contribui para uma melhoria significativa do espaço ocupado pelos produtos na paleta. Assim, aumenta-se a robustez do empacotamento em paleta, diminuindo as reclamações de material danificado e, também, uma melhoria significativa nos custos de transporte.

Função objetivo n° 2:

Minimizar $X =$

(1)

$$C \times L \times A - \sum_{i=1}^N c_i \times l_i \times a_i \times s_i$$

Sujeito a:

(2)

$$x_i + c_i \times c_{xi} + l_i \times l_{xi} + a_i \times a_{xi} \leq x_j + (1 - c_{ij}) \times M, \forall i, k, i < k$$

(3)

$$x_j + c_j \times c_{xj} + l_j \times l_{xj} + a_j \times a_{xj} \leq x_i + (1 - f_{ij}) \times M, \forall i, k, i < k$$

(4)

$$y_i + c_i \times c_{yi} + l_i \times l_{yi} + a_i \times a_{yi} \leq y_j + (1 - e_{ij}) \times M, \forall i, k, i < k$$

(5)

$$y_j + c_j \times c_{yj} + l_j \times l_{yj} + a_j \times a_{yj} \leq y_i + (1 - d_{ij}) \times M, \forall i, j, i < j$$

(6)

$$z_i + c_i \times c_{zi} + l_i \times l_{zi} + a_i \times a_{zi} \leq z_j + (1 - c_{ij}) \times M, \forall i, j, i < j$$

(7)

$$z_j + c_j \times c_{zj} + l_j \times l_{zj} + a_j \times a_{zj} \leq z_i + (1 - d_{ij}) \times M, \forall i, j, i < j$$

(8)

$$e_{ij} + d_{ij} + a_{ij} + f_{ij} + c_{ij} \leq s_i + s_{j-1}, \forall i, j, i < j$$

(9)

$$x_i + c_i \times c_{xi} + l_i \times l_{xi} + a_i \times a_{xi} \leq C + (1 - s_i) \times M, \forall i$$

(10)

$$y_i + c_i \times c_{yi} + l_i \times l_{yi} + a_i \times a_{yi} \leq L + (1 - s_i) \times M, \forall i$$

(11)

$$z_i + c_i \times c_{zi} + l_i \times l_{zi} + a_i \times a_{zi} \leq A + (1 - s_i) \times M, \forall i$$

(12)

$$c_{xi} + c_{yi} + c_{zi} = 1;$$

(13)

$$l_{xi} + l_{yi} + l_{zi} = 1;$$

(14)

$$a_{xi} + a_{yi} + a_{zi} = 1;$$

(15)

$$c_{xi} + l_{xi} + a_{xi} = 1;$$

(16)

$$c_{yi} + l_{yi} + a_{yi} = 1;$$

(17)

$$c_{zi} + l_{zi} + a_{zi} = 1;$$

A equação (1) refere-se à função objetivo e tem como objetivo minimizar o espaço não utilizado da paleta. A primeira parcela diz respeito ao volume da paleta e a segunda parcela diz respeito à soma do volume de todos os produtos empacotados na paleta.

As restrições (2), (3), (4), (5), (6), (7) e (8) garantem que cada produto i se encontra na paleta.

As restrições (8), (9) e (10) asseguram que o posicionamento dos produtos obedece às limitações físicas e dimensionais da paleta.

Por fim, as restrições (12), (13), (14), (15), (16) e (17) dizem respeito ao posicionamento dos produtos em relação aos eixos da paleta.

Como a altura do produto está sempre paralela à altura da paleta podemos supor que $(c_{xi}, c_{yi}, 0)$, $(l_{xi}, l_{yi}, 0)$ e que (h_{xi}, h_{yi}, h_{zi}) é $(0, 0, 1)$, considerando-a uma variável fixa. Como dito anteriormente, partimos do pressuposto que $a_{yi} = a_{zi} = 0$. Assim, temos $(a_{xi}, a_{yi}, a_{zi}) = (0, 0, 1)$. Reformulando as equações (2), (3), (4), (5), (6) e (7), temos:

$$\begin{aligned}
 (18) \quad & x_i + c_i \times c_{xi} + l_i \times l_{xi} \leq x_j + (1 - c_{ij}) \times M, \forall i, j, i < j \\
 (19) \quad & x_j + c_k \times c_{xj} + l_j \times l_{xj} \leq x_i + (1 - f_{ij}) \times M, \forall i, j, i < j \\
 (20) \quad & y_i + c_i \times c_{yi} + l_i \times l_{yi} \leq y_j + (1 - e_{ij}) \times M, \forall i, j, i < j \\
 (21) \quad & y_j + c_j \times c_{yj} + l_j \times l_{yj} \leq y_i + (1 - d_{ij}) \times M, \forall i, j, i < j
 \end{aligned}$$

4.3.1. Modelo matemático no CPLEX

Para testar o modelo matemático apresentado foi utilizado o *software* CPLEX, da IBM. Esta ferramenta permite desenvolver e implementar modelos de otimização, resolvendo problemas de programação matemática (IBM, 2021).

IBM® ILOG® *Optimization Programming Language* (OPL) é a linguagem de modelação usada no CPLEX para traduzir o problema matemático. Nesse contexto, OPL é uma linguagem de modelação para otimização combinatoria, a qual visa simplificar a resolução de problemas de otimização (IBM, 2022b). No CPLEX, o arquivo de dados (.dat) armazena os valores dos dados usados no modelo e o arquivo de modelo (.mod) representa o modelo matemático (GARP, 2023; IBM, 2022a).

Neste trabalho e de acordo com o mencionado anteriormente, no ficheiro “.dat” declararam-se os parâmetros do problema, como apresentado na Figura 19.

Quanto aos restantes parâmetros, apresenta-se:

1. “C”, “L” e “A” representam as dimensões físicas da paleta;
2. “P” representa o peso máximo suportado pela paleta;
3. “q” como o número de orientações a considerar. Neste caso, são consideradas três orientações de modo a contemplar quando o comprimento do produto está paralelo ao comprimento da paleta, quando a largura do produto está paralela ao comprimento da paleta e quando a altura do produto passa a ser o comprimento (ou seja, quando o produto passa da posição vertical para horizontal);
4. “hu” é o número de categorias definidas para os produtos da empresa;

5. “pal” é igual 33, uma vez que esta é a capacidade máxima de um camião TIR *standard*, sendo assim o número máximo de paletes que uma encomenda poderá necessitar para a consolidação dos produtos;
6. “L_inf” é igual a 1, uma vez que é o limite mínimo de paletes necessárias numa encomenda.
7. “M” foi definido como 100 000, uma vez que foi estipulado inicialmente como um número grande e arbitrário.

```

6 //Declarar os parâmetros
7 hu = 43;
8 q = 3;
9 C = 1200; //comprimento da paleta
10 L = 800; //largura da paleta
11 A = 1350; //altura da paleta
12 P = 1250; //peso da paleta
13 pal = 33; //número máx de paletes
14 L_inf = 1; //limite inferior de paletes necessárias
15 M = 100000; //número grande e arbitrário
16
17 //Matriz de avaliação produto 1
18 ciq[1][1] = 500
19 liq[1][1] = 320
20 aiq[1][1] = 110
21 ciq[1][2] = 320
22 liq[1][2] = 500
23 aiq[1][2] = 110

```

Figura 19 – Declaração dos parâmetros no ficheiro “.dat”

Na Figura 19 apenas está apresentada a matriz de avaliação do produto 1, como exemplo. No entanto, foram definidas as matrizes de avaliação dos 42 produtos restantes.

No que diz respeito ao ficheiro “.mod”, é implementado o modelo matemático e as respetivas variáveis. Assim, no ficheiro “.mod”, são definidas:

1. As dimensões dos 43 produtos;
2. As matrizes de avaliação c_{iq} , l_{iq} e a_{iq} ;
3. As variáveis de comprimento, largura e altura representadas por (c_{xi}, c_{yi}, c_{zi}) , (l_{xi}, l_{yi}, l_{zi}) e (a_{xi}, a_{yi}, a_{zi}) , respetivamente.
4. As variáveis binárias de posicionamento e_{ij} , d_{ij} , a_{ij} , f_{ij} e c_{ij} como variáveis de decisão booleanas;
5. As variáveis de posição do canto inferior esquerdo, representada por (x_i, y_i, z_i) ;
6. A variável binária s_i que indica se o produto está na paleta;
7. A variável binária $x_{iqp^x p^y p^z k}$ que indica se o produto do tipo i na orientação q tem o vértice inferior esquerdo localizado na posição (p^x, p^y, p^z) da paleta k ;

8. A variável binária y_k que indica se a paleta k é utilizada;
9. G_k indica o número de produtos na última paleta.

Na Figura 20 apresenta-se a primeira função objetivo e as respectivas equações (2), (3), (4), (5), (6) e (7).

```

94 //Definição da função objetivo
95 minimize sum (k in K) y[k] + sum (k in K: k >= 1 && k < 33) G[k];
96
97 subject to{
98   forall(i in I){
99     sum (q in Q, px in Px, py in Py, pz in Pz, k in K) m[i][q][px][py][pz][k] == n[i];
100  }
101
102   forall (i in I, q in Q, px in Px, py in Py, pz in Pz, k in K: k >= L_inf){
103     sum (i in L_inf..k) (m[i][q][px][py][pz][k]) <= G[k] + (1-y[k] + y[k+1]);
104   }
105
106   forall(i in I, q in Q, px in Px, py in Py, pz in Pz, k in K){
107     sum (k in K)(p[i] * m[i][q][px][py][pz][k]) <= P;
108   }
109
110   forall(k in K){
111     y[k] >= y[k] + 1;
112   }
113
114   forall(k in K: k <= L_inf){
115     y[k] == 1;
116   }
117
118   forall (i in I, j in I: i<j, q in Q, px in Px, py in Py, pz in Pz, k in K){
119     m[i][q][px][py][pz][k] + m[j][q][px][py][pz][k] <= 1;
120   }

```

Figura 20 – Definição da função objetivo e respectivas equações

Para além das restrições anteriores, destacam-se na Figura 21 as regras de empacotamento definidas através da matriz desenvolvida, dada a sua importância no contexto prático do problema.

```

152 //Regras de empacotamento
153 forall(j in 2..43){
154   if (j==2 || (j>=8 && j<=43)){
155     cm[1][j]==0;
156   }
157   else{
158     cm[1][j]==1;
159   }
160 }
161
162 forall(j in 2..43){
163   if (j==2 || (j>=34 && j<=43)){
164     cm[2][j]==0;
165   }
166   else{
167     cm[2][j]==1;
168   }
169 }
170 forall(j in 2..43){
171   if (j==2 || (j>=34 && j<=43)){
172     cm[2][j]==0;
173   }

```

Figura 21 – Declaração das regras de empacotamento

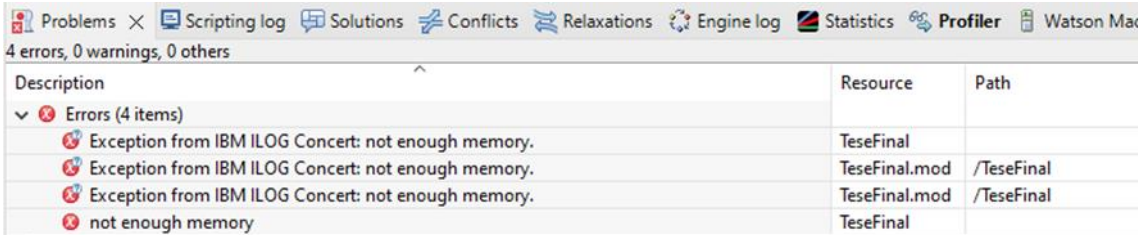
Na Figura 21 estão apresentadas apenas três restrições de regras de empacotamento. No entanto, foram criadas 42 equações que traduzem as interdições de colocação de determinado produto por cima de outro, através da utilização do Anexo B. Por exemplo, como apresentado na primeira regra de empacotamento, o produto 1 não pode ser colocado por cima do produto 2 e do produto 8 ao 43.

Dada a impossibilidade de definição de duas funções objetivo no mesmo modelo matemático, a função objetivo nº 2 é implementada no CPLEX como uma restrição.

As restantes equações da função objetivo nº2 são declaradas seguindo a sintaxe demonstrada nas Figura 20 e 21.

4.3.2. Teste

Os testes ao modelo matemático foram efetuados num computador portátil com as seguintes características: processador AMD A4-6210 APU @ 1.80 GHz, 6 GB RAM e sistema operativo Windows, de 64 bits. No entanto, a fase de teste do modelo não forneceu resultados computacionais, dada a falta de memória para a sua execução e a complexidade inerente ao PLP. Assim, é apresentado na Figura 22 o erro decorrido da execução do modelo.



| Description | Resource | Path |
|---|---------------|------------|
| Exception from IBM ILOG Concert: not enough memory. | TeseFinal | |
| Exception from IBM ILOG Concert: not enough memory. | TeseFinal.mod | /TeseFinal |
| Exception from IBM ILOG Concert: not enough memory. | TeseFinal.mod | /TeseFinal |
| not enough memory | TeseFinal | |

Figura 22 - Erro ocorrido na execução do modelo

Posteriormente, o modelo foi testado em mais dois computadores portáteis com as seguintes características: processador Intel® Core™ i7- 10510U @ 4.90 GHz, 16 GB RAM e sistema operativo Windows, de 64 bits e processador 11th Gen Intel® Core™ i7-11800H @ 2.30 GHz, 16 GB RAM e sistema operativo Windows, de 64 bits. No entanto, o erro apresentado na Figura 2 manteve-se nos testes efetuados em ambos.

Após as tentativas de execução sem sucesso, procedeu-se à simplificação do modelo inicialmente desenvolvido. Como primeiro passo, foram eliminadas as matrizes de avaliação c_{iq} , l_{iq} e a_{iq} e ainda as variáveis de comprimento, largura e altura representadas por (c_{xi}, c_{yi}, c_{zi}) , (l_{xi}, l_{yi}, l_{zi}) e (a_{xi}, a_{yi}, a_{zi}) , respetivamente. Para além disso, a orientação “q” assume apenas um valor, passando a ser uma variável fixa. Assim, apresenta-se o modelo

matemático simplificado, no anexo C. Após a simplificação do modelo matemático inicialmente desenvolvido, procedeu-se à sua implementação e teste no CPLEX. No entanto, o erro apresentado na Figura 22 manteve-se, após a execução do modelo nos três computadores portáteis distintos.

4.4. Estudo do impacto da solução desenvolvida

Um algoritmo de otimização combinatoria é uma ferramenta bastante complexa, dadas as necessidades logísticas da SGPT. Posto isto, era crucial uma boa estruturação do problema, considerando todas as restrições envolvidas no seu contexto.

A nível de resultados, não foi possível concluir o desenvolvimento do modelo matemático para o problema em questão, devido à complexidade intrínseca do PLP. No entanto, foram efetuadas previsões quanto à redução de utilização de paletes, por encomenda.

Numa análise aos dados retirados de SAP, relativos às encomendas com preparação, apresenta-se na Tabela 11 e Tabela 12, o número de encomendas preparadas no mês de maio de 2023, no centro de Aveiro e Carregado, respetivamente.

Tabela 11 - Encomendas preparadas, em maio, no centro de Aveiro

| |
|------|
| Maio |
| 2816 |

Tabela 12 - Encomendas preparadas, em maio, no centro do Carregado

| |
|------|
| Maio |
| 3126 |

Após contacto com o setor logístico e os respetivos responsáveis, é possível salientar que a utilização de um número superior de paletes do que aquelas que seriam necessárias, otimizando o empacotamento da paleta, é uma situação bastante recorrente no quotidiano da empresa. Assim, após discussão entre os principais envolvidos no processo, prevê-se a redução de utilização de uma paleta por encomenda, o que seria alcançado com a implementação da solução desenvolvida neste trabalho. Considerando o mencionado anteriormente e se a solução desenvolvida fosse implementada com sucesso, seriam utilizadas menos 2816 paletes no centro de Aveiro e 3126 paletes no centro do Carregado. Assim, seriam utilizadas menos 5942 paletes, na empresa, no período de um mês.

Uma vez que os valores mencionados anteriormente são apenas previsões e dada a impossibilidade de quantificar o impacto da solução desenvolvida na empresa, são apresentados, de seguida, testemunhos relativos à importância de implementação do mesmo. Estes testemunhos evidenciam o impacto esperado desta ferramenta, em domínios distintos da empresa, incluindo, assim, custos associados ao *stock*, sustentabilidade e impacto ambiental, serviço ao cliente, processo de distribuição logística, processo de preparação de encomendas e execução de *picking*.

Técnica de *Supply Chain* - gestão de transportes SGPT

“Com o desenvolvimento de um algoritmo de otimização de empacotamento da palete conseguir-se-ão alcançar diversos benefícios. Do ponto de vista logístico, e como responsável pela organização de transporte, a redução do número de paletes está diretamente associada à diminuição dos custos de transporte para a empresa, uma vez que a faturação de transporte é feita à palete. Por consequência, haverá também uma redução nos custos de transporte para o cliente, resultando num aumento da sua satisfação. Para além do que foi referido, existirá uma melhoria no serviço de entrega, diminuindo-se a possibilidade de danificar as mercadorias durante o transporte. Dependendo do operador, a sobreposição e disposição dos produtos poderá ser diferente, que nem sempre é a mais correta. Assim, este algoritmo apresentará a correta sobreposição dos produtos, que resultará na diminuição da possibilidade de danos dos mesmos durante o transporte. Mais uma vez, haverá um aumento na satisfação do cliente, reduzindo o número de reclamações. Por estes motivos, eu quantifico a importância deste algoritmo como extremamente importante, uma vez que vai ao encontro de um dos principais objetivos de qualquer empresa, a satisfação do cliente.”

Coordenador de *Supply Chain* – gestão dos processos inerentes à cadeia de abastecimento

“O trabalho desenvolvido está estruturado em três pontos de interesse para as Operações da Saint-Gobain Portugal S.A.: Sustentabilidade, o Nível Serviço e o Nível *stocks*.

A Saint-Gobain pauta-se pelo compromisso sustentável, e está envolvida em diversos projetos atualmente com objetivo de contribuir para o nosso bem-estar. Este projeto impacta diretamente na redução de consumo de paletes de madeira, o qual é atualmente um dos artigos de matérias-primas e embalagens, no topo de *stock* valorizado.

A utilização de paletes na operação de *picking* é realizada com recurso ao *know how* local em *shopfloor*, o que condiciona dois pontos: *forecast* de compra de paletes e curva de aprendizagem aquando da contratação de novos recursos humanos. Com um *output* deste projeto podemos agilizar ambos, sendo possível reduzir o tempo de aprendizagem dos operadores de expedição de ambos os centros e reduzir o nível de *stock* de paletes disponíveis para operação de *picking*.

Acrescento ainda que ao reduzirmos o tempo de aprendizagem de novos recursos na expedição, estamos a fortalecer o nosso nível de serviço, ponto pelo qual nos diferenciamos.”

Responsável de expedição do centro operacional de Aveiro – gestão do armazém e processos inerentes

“Acredito que uma solução deste género, na nossa atividade diária, seria de extrema importância, uma vez que iria contribuir para a redução da utilização de paletes de madeira e o respetivo impacto ambiental. Para além disso, no âmbito da logística e transporte, os clientes pagam pelo transporte das suas encomendas e pelo espaço que as paletes ocupam nos seus camiões. Desta forma, quantas mais paletes forem expedidas, mais o cliente paga pelo transporte. Cada vez mais, os clientes solicitam a redução de utilização de paletes na expedição das encomendas solicitadas, de modo a reduzir os custos de transporte associados às suas encomendas.

No âmbito do processo de *picking*, sendo responsável de armazém, os colaboradores desperdiçam bastante tempo durante este processo porque realizam mentalmente o empacotamento dos produtos na paleta, quais os produtos e a respetiva quantidade a colocar, em cada uma. Como tal, é bastante significativo o tempo que seria otimizado neste processo e uma série de gastos inerentes, através da aplicação desta ferramenta.

Para além disso, saliento o erro humano que iria ser minimizado com a solução desenvolvida, uma vez que esta indicaria o modo lógico e otimizado de executar a consolidação de diferentes produtos na paleta. Tendo em conta os problemas e tópicos que este desenvolvimento poderia melhorar e solucionar, é de frisar a extrema importância da implementação da solução desenvolvida e as respetivas vantagens.”

Finalizando os testemunhos expostos, salienta-se o objetivo da empresa em limitar os impactos negativos das suas atividades, contribuindo para um mundo 100% circular, com zero emissões de carbono e zero resíduos. Tendo em conta as preocupações da Saint-Gobain

no que diz respeito à sustentabilidade e considerando o objetivo da neutralidade carbónica para o ano de 2050, evidencia-se o contributo da solução desenvolvida para os compromissos da empresa, através da racionalização do consumo de paletes de madeira internamente.

5. Conclusão

5.1. Reflexão sobre o trabalho realizado

O projeto desenvolvido na Unidade Operacional da Saint-Gobain Portugal S.A. descrito ao longo deste documento, teve como finalidade o desenvolvimento de um modelo de otimização para o processo de preparação de encomendas, com o intuito de reduzir o número de paletes utilizadas por encomenda.

Numa primeira parte, foi efetuado um diagnóstico e análise ao processo de preparação de encomendas, sendo possível a deteção dos pontos de melhoria. É importante frisar que o plano de ação contempla as oportunidades de melhoria identificadas e que a sua aplicação pode efetivamente contribuir para a otimização do empacotamento em palete. Dada a complexidade do modelo matemático desenvolvido, não foi possível a obtenção de resultados computacionais do CPLEX. Como tal, a programação da solução pretendida não foi desenvolvida nem implementada durante o período de estágio, não tendo sido possível obter dados que quantifiquem a importância e o impacto da solução desenvolvida para o problema identificado.

As principais limitações deste trabalho foram, numa primeira instância, a falta de conhecimento em determinadas linguagens de programação para o desenvolvimento de uma solução mais robusta e capaz de suportar a complexidade do modelo matemático. Uma segunda limitação foi o facto de as dimensões de certos produtos não estarem disponíveis em SAP. Como tal, foi necessário fazer o cruzamento de um documento *Excel*, com as dimensões recolhidas previamente pela empresa com as informações disponíveis em SAP. Uma terceira, e última, limitação foi a falta de domínio da programação linear do *software* CPLEX, utilizado para o teste do modelo matemático.

5.2. Desenvolvimentos Futuros

Considerando as perspectivas de desenvolvimentos futuros, numa primeira instância, é crucial a análise do estado atual do modelo matemático. Posteriormente, é fundamental a resolução dos problemas associados à execução do modelo, de forma que seja possível a obtenção de resultados computacionais do CPLEX.

No que diz respeito às restrições associadas ao problema de empacotamento em palete, foi feito o levantamento das informações associadas à restrição de estabilidade da mesma, a qual é crucial para o problema prático. No entanto, a restrição de estabilidade da paleta não foi considerada no modelo matemático devido à complexidade exuberada do modelo já desenvolvido e também à falta de tempo para o cálculo do centro de gravidade de cada produto. Como tal, como desenvolvimento futuro seria interessante a integração da seguinte restrição no modelo matemático:

1. Restrição de Ponto de Kujala - Estabilidade da paleta

A estabilidade da paleta é crucial para garantir a segurança durante o transporte e armazenamento dos volumes empacotados. Uma das formas de garantir a estabilidade é limitar o peso total da paleta, de forma que o centro de gravidade da carga esteja dentro de uma área segura da base da paleta. O centro de gravidade é calculado como uma média ponderada das coordenadas dos centros de massa de cada volume empacotado, onde o peso de cada volume é usado como peso na média.

Para assegurar que o centro de gravidade de um produto esteja dentro de uma área segura da base da paleta, é necessário considerar as restrições que limitam as coordenadas do centro de gravidade do produto em relação às dimensões da base da paleta. Assim, neste âmbito, surge a restrição de Ponto de Kujala. Esta restrição limita o centro de gravidade a uma área circular que é definida em função das dimensões da base da paleta e do peso total da carga. A restrição pode ser formulada da seguinte forma:

(1)

$$(x_c - x_b)^2 + (y_c - y_b)^2 \leq R^2$$

x_c e y_c representam as coordenadas do centro de gravidade do produto.

x_b e y_b representam as coordenadas da base da paleta.

R representa o raio da área circular de segurança. O raio R é dado por:

(2)

$$R = \frac{W \times \min (C, L)}{2}$$

W representa o fator de segurança, o qual varia entre 0,3 e 0,5.

Assim, pela junção das equações (1) e (2) temos:

$$(x_c - x_b)^2 + (y_c - y_b)^2 \leq \left(\frac{W \times \min(C, L)}{2} \right)^2$$

Para além da restrição da estabilidade da palete a considerar no futuro, foram identificados outros tópicos a ter em conta no contexto do PLP da empresa.

Neste trabalho, foram criadas 43 categorias de produtos, tendo em conta as dimensões *standard* dos produtos considerados no problema. Cada produto pode ser comercializado com dimensões distintas ou cores diferentes. Como tal, um só produto pode ter diferentes referências dadas as suas variantes. Assim, após análise dos dados retirados do SAP, foram identificadas cerca de três milhares de referências de produtos registadas no sistema. Apesar de nem todas as referências de produtos serem consideradas para o empacotamento em palete, representam, ainda assim, um valor elevado de referências a considerar para o problema. Neste sentido, como desenvolvimentos futuros, seria crucial a atualização das dimensões de todos os produtos, em SAP, de forma a ter informação dos produtos atualizada em tempo real. Posteriormente, seria fundamental o desenvolvimento de uma base de dados em SQL Server que interligasse a base dados de SAP diretamente ao desenvolvimento algorítmico. Seria necessário o desenvolvimento de uma interface Web usando a linguagem PHP, para obtenção dos dados de SAP relativos às ordens de *picking*. Assim, na fase de planeamento das ondas de *picking* das encomendas a executar, o algoritmo estaria conectado com SAP, recolhendo as informações necessárias dos produtos presentes nas encomendas, de forma a realizar a otimização do empacotamento da palete. Este seria um ponto crucial para que a solução proposta correspondesse à realidade empresarial da SGPT.

Referências

- Alonso, M. T., Alvarez-Valdes, R., Iori, M., Parreño, F., & Tamarit, J. M. (2017). Mathematical models for multicontainer loading problems. *Omega (United Kingdom)*, 66, 106–117. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2016.02.002>
- Alvarez-Valdes, R., Parreño, F., & Tamarit, J. M. (2003). A tabu search algorithm for the pallet loading problem. *OR Spectrum*, 27, 43–51. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00291-004-0183-5>
- Alvarez-Valdes, R., Parreño, F., & Tamarit, J. M. (2005). A branch and cut algorithm for the pallet loading problem. *Computers & Operations Research*, 32(11), 3007–3029. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cor.2004.04.010>.
- Apak, S., Tozan, H., & Vayvay, O. (2016). A new systematic approach for warehouse management system evaluation. *Tehnicki Vjesnik*, 23(5), 1439–1446. <https://doi.org/10.17559/TV-20141029094700>
- Bag, S., Telukdarie, A., Pretorius, J. H. C., & Gupta, S. (2018). Industry 4.0 and supply chain sustainability: framework and future research directions. In *Benchmarking* (Vol. 28, Issue 5, pp. 1410–1450). Emerald Group Holdings Ltd. <https://doi.org/10.1108/BIJ-03-2018-0056>
- Barreto, L., Amaral, A., & Pereira, T. (2017). Industry 4.0 implications in logistics: an overview. *Procedia Manufacturing*, 13, 1245–1252. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.045>
- Bartholdi, J. J., & Hackman, S. T. (2019). *Warehouse & Distribution Science*. www.warehouse-science.com
- Becceneri, J. C. (2008). *Meta-heurísticas e otimização combinatória: Aplicações em problemas ambientais*.
- Bischoff, E. E., Janetz, F., & Ratcliff, W. (1995). Loading pallets with non-identical items. *European Journal of Operational Research*, 84(3), 681–692. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00031-K](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00031-K)
- Bortfeldt, A., & Wäscher, G. (2012). Container loading problems: A state-of-the-art review. In *European Journal of Operational Research* (No. 7; Vol. 229, Issue 1). <https://doi.org/https://doi.org/10.24352/UB.OVGU-2018-479>

- Caldas, L. R. (2021). Bioeconomia circular e mudanças climáticas: Avaliação da pegada de carbono de paletes de madeira reutilizados. *MIX Sustentável*, 7(2), 27–40. <https://doi.org/10.29183/2447-3073.mix2021.v7.n2.27-40>
- CarePack. (2020). *Benefícios da utilização de paletes usadas com tratamento fitossanitário (HT)*. <https://www.carepack.pt/pt/curiosidades/beneficios-da-utilizacao-de-paletes-usadas-com-tratamento-fitossanitario-ht->
- De Assis, R., & Sagawa, J. K. (2018). Assessment of the implementation of a warehouse management system in a multinational company of industrial gears and drives. *Gestao e Producao*, 25(2), 370–383. <https://doi.org/10.1590/0104-530X3315-18>
- De Koster, R., Le-Duc, T., & Roodbergen, K. J. (2007). Design and control of warehouse order picking: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 182(2), 481–501. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.07.009>
- Dell'Amico, M., & Magnani, M. (2021). Solving a Real-Life Distributor's Pallet Loading Problem. *Mathematical and Computational Applications*, 26(3), 53. <https://doi.org/10.3390/mca26030053>
- DGAV. (2020). *Procedimentos para tratamento térmico madeira e material de embalagem de madeira*.
- Einstein, A., Muritiba, F., Melchiorri, C., & Toth, P. (2010). *Algorithms and models for combinatorial optimization problems*.
- Faber, N., de Koster, M. B. M., & Smidts, A. (2013a). Organizing warehouse management. *International Journal of Operations and Production Management*, 33(9), 1230–1256. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-12-2011-0471>
- Farahani, R., Rezapour, S., & Kardar, L. (2011). *Logistics operations and management* (1st ed.).
- Frazelle, E. (2016). *World-class warehousing and material handling* (Second Edition). McGraw-Hill Education.
- Frazzon, E. M., Rodriguez, C. M. T., Pereira, M. M., Pires, M. C., & Uhlmann, I. (2019). Towards supply chain management 4.0. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, 16(2), 180–191. <https://doi.org/10.14488/BJOPM.2019.V16.N2.A2>
- Gallmann, F., & Belvedere, V. (2011). Linking service level, inventory management and warehousing practices: A case-based managerial analysis. *Operations Management Research*, 4(1–2), 28–38. <https://doi.org/10.1007/s12063-010-0043-1>

- GARP. (2023). *Creating a project and run configuration*.
<https://www.revealedpreferences.org/creatingproject.html>
- Gigerenzer, G. (2008). *Why Heuristics Work*.
- GS1 US. (2019). *An introduction to the Serial Shipping Container Code (SSCC)*.
- Gzara, F., Elhedhli, S., & Yildiz, B. C. (2020). The pallet loading problem: Three-dimensional bin packing with practical constraints. *European Journal of Operational Research*, 287(3), 1062–1074. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.04.053>
- Helena, C. (2017). *A gestão do working capital: Impacto na rentabilidade das PME's na União Europeia* [Instituto Universitário de Lisboa]. <http://hdl.handle.net/10071/16133>
- IBM. (2021). *What is CPLEX?* <https://www.ibm.com/docs/en/icos/20.1.0?topic=mc-what-is-cplex>
- IBM. (2022a). *Data files*. <https://www.ibm.com/docs/en/icos/22.1.1?topic=projects-data-files>
- IBM. (2022b). *Why an optimization programming language?*
<https://www.ibm.com/docs/en/icos/22.1.1?topic=manual-why-optimization-programming-language>
- Johnson, R. (2023). *Trade working capital Vs. total working capital*.
<https://smallbusiness.chron.com/definitions-total-asset-turnover-profit-margin-32936.html>
- Jourdan, L., Basseur, M., & Talbi, E. G. (2009). Hybridizing exact methods and metaheuristics: A taxonomy. *European Journal of Operational Research*, 199(3), 620–629. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.07.035>
- Khan, M. D., Schaefer, D., & Milisavljevic-Syed, J. (2022). Supply chain management 4.0: Looking backward, looking forward. *Procedia CIRP*, 107, 9–14.
<https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2022.04.002>
- Kunrath, T. L., Dresch, A., & Veit, D. R. (2022). Supply chain management and industry 4.0. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, 20(1), 1263–1263.
<https://doi.org/10.14488/BJOPM.1263.2023>
- Kusrini, E., Novendri, F., & Helia, V. N. (2018). Determining key performance indicators for warehouse performance measurement - A case study in construction materials warehouse. *MATEC Web of Conferences*, 154.
<https://doi.org/10.1051/matecconf/201815401058>

- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business and Information Systems Engineering*, 6(4), 239–242. <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>
- Lee, C. K. M., Lv, Y., Ng, K. K. H., Ho, W., & Choy, K. L. (2018). Design and application of internet of things-based warehouse management system for smart logistics. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2753–2768. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1394592>
- Leyton-Brown, K., Hoos, H. H., Hutter, F., & Xu, L. (2014). Understanding the empirical hardness of NP-complete problems. *Communications of the ACM*, 57(5), 98–107. <https://doi.org/10.1145/2594413.2594424>
- Li, X., Zhao, Z., & Zhang, K. (2014). A genetic algorithm for the three-dimensional bin packing problem with heterogeneous bins. *IIE Annual Conference*, 2039. <https://www.researchgate.net/publication/273121476>
- Liviu, I., Crisan, E., Liviu, I., & Ana-Maria, T. (2009a). Warehouse performance measurement: A case study. *Annals of Faculty of Economics*, 4, 307–312. <https://www.researchgate.net/publication/46533440>
- MDP Group. (2023). *What is SAP extended warehouse management (SAP EWM)?* <https://mdpgroup.com/en/blog/what-is-sap-extended-warehouse-management-ewm/>
- Min, H. (2006). The applications of warehouse management systems: An exploratory study. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 9(2), 111–126. <https://doi.org/10.1080/13675560600661870>
- Morabito, R., & Arenalest, M. (1994). An AND/OR-graph Approach to the Container Loading Problem. In *Int. Trans. Opl Res: Vol. I* (Issue 1).
- Nee. (2009). *Warehouse management system and business performance: Case study of a regional distribution centre*.
- Oliveira Da Fonseca, K. H. (2012). Investigação-ação: Uma metodologia para prática e reflexão docente. *Revista Onis Ciência*.
- Ramaa A., Subramanya K.N., & Rangaswamy T.M. (2012). Impact of Warehouse Management System in a Supply Chain. In *International Journal of Computer Applications* (Vol. 54, Issue 1).

- Razik, M., Radi, B., & Okar, C. (2017). Development of a maturity model for the warehousing function in Moroccan companies. *International Journal of Engineering and Technology*, 9(2), 280–290. <https://doi.org/10.21817/ijet/2017/v9i1/170902303>
- Reis, J. (2006). *Uma introdução ao scheduling*. <http://hdl.handle.net/10071/169>
- Sainathuni, B., Parikh, P. J., Zhang, X., & Kong, N. (2014). The warehouse-inventory-transportation problem for supply chains. *European Journal of Operational Research*, 237(2), 690–700. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.02.007>
- Saint-Gobain. (2022a). *Saint-Gobain em Portugal*. <https://www.saint-gobain.pt/companhia/saint-gobain-em-portugal>
- Saint-Gobain. (2022b). *Sobre a Saint-Gobain*. <https://www.saint-gobain.pt/companhia/sobre-saint-gobain>
- SAP Portugal. (2023a). *SAP extended warehouse management*.
- SAP Portugal. (2023b). *What is ERP?* <https://www.sap.com/portugal/products/erp/what-is-erp.html>
- SAP Portugal. (2023c). *What is SAP?* <https://www.sap.com/about/company/what-is-sap.html>
- Scheithauer, G., & Terno, J. (1999). A heuristic approach for solving the multi-pallet packing problem. *Decision Making under Conditions of Uncertainty (Cutting–Packing Problems)*, 140–154. <https://www.researchgate.net/publication/2310553>
- Slack, Nigel., & Chambers, Stuart. (2007). *Operations management*. Prentice Hall/Financial Times.
- Vargas-Osorio, S., & Zúñiga, C. (2016). A literature review on the pallet loading problem. *Lámpsakos*, 15, 69. <https://doi.org/10.21501/21454086.1790>
- Voß, S. (2001). Meta-heuristics: The state of the art. *Lecture Notes in Artificial Intelligence (Subseries of Lecture Notes in Computer Science)*, 2148, 1–23. https://doi.org/10.1007/3-540-45612-0_1
- Wang, S., Wan, J., Zhang, D., Li, D., & Zhang, C. (2016). Towards smart factory for industry 4.0: A self-organized multi-agent system with big data-based feedback and coordination. *Computer Networks*, 101, 158–168. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.comnet.2015.12.017>.
- Ward, L. (2023). *Guide to trade working capital*. <https://lanterncredit.com/small-business/trade-working-capital>

- Yu, M. (2008). *Enhancing warehouse performance by efficient order picking*. www.b-e-n-t.nl
- Žunić, E., Delalić, S., Kerim Hodžić, K., Beširević, A., & Hindija, H. (2018). Smart warehouse management system concept with implementation. *14th Symposium on Neural Networks and Applications (NEUREL)*, 1–5. <https://doi.org/doi:10.1109/NEUREL.2018.8587004>.
- Zúñiga, C., Ángel Piera, M., & Narciso, M. (2011). Revisiting the pallet loading problem using a discrete event system approach to minimise logistic costs. *International Journal of Production Research*, 49(8), 2243–2264. <https://doi.org/10.1080/00207541003702234>

Anexos

Anexo A

| Tipo Produto | Descrição | C [mm] | L [mm] | A [mm] | Peso [Kg] |
|--------------|----------------------------|--------|--------|--------|-----------|
| 1 | Sacos 30L | 500 | 320 | 110 | 4,6 |
| 2 | Sacos 5kg | 380 | 190 | 100 | 5 |
| 3 | Sacos 10kg | 410 | 190 | 110 | 10 |
| 4 | Sacos 12,5kg | 550 | 230 | 100 | 12,5 |
| 5 | Sacos 15kg | 550 | 220 | 110 | 15 |
| 6 | Sacos 20kg | 580 | 240 | 110 | 20 |
| 7 | Sacos 25kg | 580 | 240 | 110 | 25 |
| 8 | Baldes 2kg Tipo I | 135 | 135 | 195 | 2 |
| 9 | Baldes 2kg Tipo II | 198 | 198 | 110 | 2 |
| 10 | Baldes 3kg | 210 | 130 | 210 | 3 |
| 11 | Baldes 5kg Tipo I | 280 | 280 | 215 | 5 |
| 12 | Baldes 5kg Tipo II | 286 | 198 | 150 | 5 |
| 13 | Baldes 8kg | 180 | 180 | 210 | 8 |
| 14 | Baldes 10kg Tipo I | 285 | 285 | 265 | 10 |
| 15 | Baldes 10kg Tipo II | 372 | 240 | 203 | 10 |
| 16 | Baldes 12,5 L | 240 | 240 | 350 | 10,7 |
| 17 | Baldes 15kg Tipo I | 290 | 290 | 220 | 15 |
| 18 | Baldes 15kg Tipo II | 315 | 315 | 350 | 15 |
| 19 | Baldes 20kg Tipo I | 330 | 330 | 310 | 20 |
| 20 | Baldes 20kg Tipo II | 280 | 280 | 350 | 20 |
| 21 | Baldes 25kg Tipo I | 305 | 305 | 450 | 25 |
| 22 | Baldes 25kg Tipo II | 275 | 275 | 360 | 25 |
| 23 | Baldes 25kg Tipo III | 315 | 315 | 300 | 25 |
| 24 | Baldes 30L | 360 | 380 | 380 | 19,5 |
| 25 | Caixa com 4 baldes de 1kg | 285 | 280 | 135 | 4 |
| 26 | Caixa com 4 sacos de 5kg | 520 | 280 | 270 | 20 |
| 27 | Caixa de Bisnagas | 170 | 210 | 240 | 6 |
| 28 | Caixa de Acessórios Tipo I | 390 | 300 | 270 | 5,5 |
| 29 | Caixa de Acessórios Tipo I | 285 | 260 | 150 | 2,5 |
| 30 | Caixa de Spray | 180 | 170 | 310 | 4 |
| 31 | Caixa de Kit's | 690 | 245 | 90 | 3 |
| 32 | Caixa de Jerricans | 380 | 285 | 290 | 20 |
| 33 | Caixa de Rolos Tipo I | 380 | 260 | 130 | 4 |
| 34 | Caixa de rolos Tipo II | 200 | 195 | 125 | 1 |
| 35 | Caixa Perfil Horizontal | 170 | 90 | 60 | 6 |
| 36 | Pacote | 390 | 245 | 290 | 0,8 |
| 37 | Rolos 15M2 | 150 | 150 | 1040 | 7,5 |
| 38 | Rolos 25M2 | 105 | 105 | 1010 | 2,5 |
| 39 | Rolos 50M2 | 180 | 180 | 1040 | 7,7 |
| 40 | Rolo 10M | 85 | 85 | 125 | 0,42 |
| 41 | Rolo 50M | 205 | 205 | 125 | 1,82 |
| 42 | Spray | 75 | 75 | 300 | 1 |
| 43 | Bisnaga | 50 | 50 | 230 | 0,5 |

Anexo C

Variáveis:

$$x_{ip^x p^y p^z k} = \begin{cases} 1, & \text{se o produto do tipo } i \\ & \text{tem o vértice inferior esquerdo localizado na posição } (p^x, p^y, p^z) \text{ da paleta } k \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$, i \in I, p^x \in P^x, p^y \in P^y, p^z \in P^z, k \in K$$

$$y_k = \begin{cases} 1, & \text{se a paleta é usada} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}, k \in K$$

G_k : número de produtos na última paleta, $k \in K, k \leq L_{inf}$

Restrições:

(1)

Minimizar $Z =$

$$\sum_{k \in K} y_k + \sum_{k \in K; k \geq L_{inf} \cap k < K} G_k$$

Sujeito a:

(2)

$$\sum_{p^x \in P_i^x} \sum_{p^y \in P_i^y} \sum_{p^z \in P_i^z} \sum_{k \in K} x_{ip^x p^y p^z k} = n_i, i \in I$$

(3)

$$\sum_{i \in I} \sum_{p^x \in P^x} \sum_{p^y \in P^y} \sum_{p^z \in P^z} x_{ip^x p^y p^z k} \leq G_k + (1 - y_k + y_{k+1})$$

$, k \in K: k \geq L_{inf} \cap k \in K$

(4)

$$\sum_{i \in I} \sum_{p^x \in P^x} \sum_{p^y \in P^y} \sum_{p^z \in P^z} p_i x_{ip^x p^y p^z k} \leq P_{y_k}, k \in K$$

(5)

$$y_k \geq y_{k+1}, k \in |K|$$

(6)

$$y_k = 1, k \in K, k \leq L_{inf}$$

(7)

$$\sum_{i \in I} \sum_{p^x \in P^x: p^x+1 \leq p_p^x \wedge p_i^x} \sum_{p^y \in P^y: p^y+1 \leq p_p^y \wedge p_i^y} \sum_{p^z \in P^z: p^z+1 \leq p_p^z \wedge p_i^z} x_{ip^x p^y p^z k} \leq y_k, k \in K$$

(8)

$$x_{ip^x p^y p^z k} \in \{0; 1\}, i \in I, p^x \in P^x, p^y \in P^y, p^z \in P^z, k \in K$$

(9)

$$y_k \in \{0, 1\}, k \in K$$

(10)

$$G_k \in \mathbb{Z}^+, k \in K$$

(11)

$$\gamma_{ij} = 0, i, j \in I$$

Função objetivo n° 2:

Minimizar X =

(1)

$$C \times L \times A - \sum_{i=1}^N c_i \times l_i \times a_i \times s_i$$

Sujeito a:

(2)

$$x_i + c_i + l_i + a_i \leq x_j + (1 - c_{ij}) \times M, \forall i, k, i < k$$

(3)

$$x_j + c_j + l_j + a_j \leq x_i + (1 - f_{ij}) \times M, \forall i, k, i < k$$

(4)

$$y_i + c_i + l_i + a_i \leq y_j + (1 - e_{ij}) \times M, \forall i, k, i < k$$

(5)

$$y_j + c_j + l_j + a_j \leq y_i + (1 - d_{ij}) \times M, \forall i, j, i < j$$

(6)

$$z_i + c_i + l_i + a_i \leq z_j + (1 - c_{ij}) \times M, \forall i, j, i < j$$

(7)

$$z_j + c_j + l_j + a_j \leq z_i + (1 - d_{ij}) \times M, \forall i, j, i < j$$

(8)

$$e_{ij} + d_{ij} + a_{ij} + f_{ij} + c_{ij} \leq s_i + s_{j-1}, \forall i, j, i < j$$

(9)

$$x_i + c_i + l_i + a_i \leq C + (1 - s_i) \times M, \forall i$$

(10)

$$y_i + c_i + l_i + a_i \leq L + (1 - s_i) \times M, \forall i$$

(11)

$$z_i + c_i + l_i + a_i \leq A + (1 - s_i) \times M, \forall i$$