



instituto
superior de
engenharia
de lisboa

Certificação da estabilidade de paletes de produto acabado como ferramenta de gestão do risco logístico no transporte rodoviário

CARMINDA ISABEL DE CARVALHO COSTA FIALHO MARQUES
(Licenciada em Engenharia Mecânica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial

ORIENTADOR
Doutor Vítor Manuel Rodrigues Anes

Julho de 2026



instituto
superior de
engenharia
de lisboa

Certificação da estabilidade de paletes de produto acabado como ferramenta de gestão do risco logístico no transporte rodoviário

CARMINDA ISABEL DE CARVALHO COSTA FIALHO MARQUES
(Licenciada em Engenharia Mecânica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial

ORIENTADOR

Doutor Vítor Manuel Rodrigues Anes, ISEL/IPL

JÚRI

Presidente

Doutora Ana Sofia Martins da Eira Dias, ISEL/IPL

Vogais

Doutora Helena Victorovna Guitiss Navas, FCT/UNL

Doutor Vítor Manuel Rodrigues Anes, ISEL/IPL

Julho de 2026

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, aos meus queridos avós, **Alcino e Alda de Carvalho**, cuja presença e influência foram determinantes no meu percurso pessoal e profissional. Foi através do meu avô que entrei no setor industrial, iniciando uma jornada que se estendeu por cerca de quarenta anos e que contribuiu de forma decisiva para a profissional e para a pessoa que sou hoje.

Aos meus queridos pais, **Afonso, o meu eterno herói, e Idalina Fialho**, agradeço os valores, os princípios, a força de caráter e o sentido de responsabilidade que me transmitiram ao longo da vida. Muito do que sou hoje resulta da educação, do exemplo e do apoio que sempre me proporcionaram.

Manifesto igualmente o meu reconhecimento ao **meio fabril**, onde desenvolvi cerca de quarenta anos da minha carreira profissional. Foi neste ambiente que adquiri conhecimentos, enfrentei desafios, desenvolvi competências e construí experiências que contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional. Muitas das reflexões que deram origem a esta dissertação nasceram precisamente da realidade vivida ao longo deste percurso.

Ao **Eng.º Rui Mendes**, expresso o meu agradecimento pela disponibilidade para partilhar ideias e reflexões sobre a temática da estabilidade e certificação de paletes. As conversas realizadas ao longo do tempo constituíram uma fonte de inspiração e incentivo para aprofundar o estudo deste tema.

Ao meu orientador, **Professor Doutor Vítor Manuel Rodrigues Anes**, agradeço a orientação académica, os contributos técnicos, a exigência construtiva e a disponibilidade demonstrada ao longo da elaboração desta dissertação.

Por fim, dirijo um agradecimento muito especial ao meu marido, **Luís**, meu companheiro de todas as horas, pelo apoio incondicional, pela confiança que sempre depositou em mim e por acreditar nas minhas capacidades, mesmo nos momentos mais desafiantes. A sua presença constante, compreensão e incentivo foram essenciais para que este trabalho chegasse ao fim.

Aos meus filhos, **Luís Miguel e Clarisse**, seres humanos extraordinários que representam uma das maiores alegrias e realizações da minha vida, agradeço o amor, o apoio e a compreensão demonstrados ao longo desta jornada.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro que esta dissertação é o resultado da minha investigação pessoal e independente. O seu conteúdo é original e todas as fontes listadas nas referências bibliográficas foram consultadas e estão devidamente mencionadas no texto. Mais declaro que todas as referências científicas e técnicas relevantes para o desenvolvimento do trabalho estão devidamente citadas e constam das referências bibliográficas.

O autor

Carminada Costa Lúcio Marques

Lisboa, 16 de Junho de 2026

Certificação da estabilidade de paletes de produto acabado como ferramenta de gestão do risco logístico no transporte rodoviário

RESUMO

O transporte rodoviário de mercadorias paletizadas apresenta desafios relevantes ao nível da segurança e da eficiência logística, sendo frequentes situações de instabilidade das paletes que podem originar danos materiais, perdas de produto e riscos para a segurança rodoviária. Apesar da relevância do problema, no contexto da empresa em estudo, a avaliação da estabilidade das paletes à saída das unidades industriais baseia-se predominantemente em critérios empíricos, não existindo abordagens normalizadas que permitam a sua validação objetiva.

O presente trabalho tem como objetivo analisar a estabilidade das paletes de produto acabado no transporte rodoviário, enquanto fator de risco logístico, e avaliar a viabilidade da certificação interna da estabilidade das paletes como instrumento de apoio à gestão do risco logístico e à melhoria do desempenho das operações de transporte.

A investigação adota uma abordagem conceptual e analítica, suportada por revisão da literatura científica e técnica nas áreas da logística, embalagem, paletização e gestão do risco, bem como na análise dos principais fatores técnicos que influenciam a estabilidade.

Como principal contributo, é proposto um modelo conceptual de certificação interna da estabilidade das paletes, baseado em critérios técnicos mensuráveis, que permite estruturar a sua avaliação à saída de fábrica.

Os resultados sugerem que a implementação de um sistema de certificação interna poderá contribuir para a redução de incidentes, melhoria da eficiência logística e clarificação de responsabilidades entre os intervenientes da cadeia de transporte, reforçando a segurança rodoviária e a sustentabilidade das operações logísticas.

Palavras-chave: estabilidade de paletes; transporte rodoviário; logística; gestão do risco; certificação interna.

Certification of Finished Product Pallet Stability as a Logistics Risk Management Tool in Road Transport

ABSTRACT

The road transport of palletized goods presents significant challenges in terms of safety and logistics efficiency, with frequent occurrences of pallet instability leading to material damage, product losses, and risks to road safety. Despite the relevance of this issue, in the context of the company under study, the assessment of pallet stability at dispatch is predominantly based on empirical criteria, with no standardized approaches available for objective validation.

This study aims to analyse the stability of finished product pallets in road transport as a logistical risk factor and to assess the feasibility of an internal pallet stability certification process as a tool to support logistics risk management and improve the performance of transport operations.

This research adopts a conceptual and analytical approach, supported by a review of scientific and technical literature in the fields of logistics, packaging, palletization and risk management, as well as by an analysis of the main technical factors influencing pallet stability.

The main contribution of this work is the proposal of a conceptual model for an internal pallet stability certification process, based on measurable technical criteria, providing a structured framework for assessing pallet stability at the point of dispatch.

The results suggest that the implementation of such an internal certification process may contribute to reducing incidents, improving logistics efficiency, and clarifying responsibilities among stakeholders in the transport chain, thereby enhancing road safety and the sustainability of logistics operations.

Keywords: pallet stability; road transport; logistics; risk management; internal certification process.

ÍNDICE

Agradecimentos.....	i
Declaração de integridade	iii
Resumo	v
Abstract.....	vii
Índice	ix
Índice de figuras	xi
Índice de tabelas	xiii
Lista de Siglas	xv
1 Introdução	1
1.1 Contextualização do tema	1
1.2 Apresentação do Problema	3
1.3 Definição Detalhada do Problema	4
1.4 Objetivos do Trabalho	4
1.5 Metodologia Resumida	5
2 Revisão da Literatura	9
2.1 Metodologia de Pesquisa Bibliográfica	9
2.2 Estado de Arte: Conceitos Chave.....	10
2.2.1 Conceitos Fundamentais do Domínio de Estudo	10
2.2.2 Modelos Conceptuais Relevantes	12
2.2.3 Evolução Histórica das Abordagens Relevantes	13
2.3 Enquadramento Teórico	15
2.3.1 Teorias e Princípios Fundamentais	15
2.3.2 Abordagens Teóricas e Implicações Conceptuais	16
2.3.3 Integração Conceptual das Perspectivas Existentes	17
2.4 Literatura e Aplicações Industriais	19
2.4.1 Evidência Empírica sobre Desempenho Logístico e Risco	19
2.4.2 Estudos sobre Estabilidade de Cargas e Segurança no Transporte	20
2.4.3 Limitações, Contradições e Tendências Identificadas.....	22
2.5 Lacunas da Literatura e Implicações para a Investigação.....	24
2.5.1 Análise Crítica dos Resultados da Revisão.....	24
2.5.2 Identificação das Lacunas de Investigação	24
2.5.3 Implicações para os Objetivos da Investigação	25

2.6	Conclusão da Revisão da Literatura	26
2.6.1	Principais Contributos da Revisão	26
3	Estudo de Caso	29
3.1	Caracterização do Contexto	29
3.2	Identificação e Caracterização do Problema	31
3.3	Análise de Causas e Fatores Contributivos	36
3.4	Impactos e Relevância da Resolução do Problema	38
3.5	Recolha e Tratamento de Dados	40
3.6	Delimitação do Âmbito e Pressupostos	43
4	Proposta de Melhoria.....	45
4.1	Enquadramento da Proposta	45
4.2	Revisão de Abordagens Alternativas	46
4.3	Arquitetura da Proposta	48
4.3.1	Indicadores de Desempenho	59
5	Validação da Proposta de Melhoria	65
5.1	Enquadramento da Validação	65
5.2	Apresentação dos Resultados.....	66
5.3	Discussão dos Resultados.....	72
5.4	Análise de Sensibilidade e Robustez.....	74
5.5	Resumo da Validação	77
6	Conclusões e trabalho futuro.....	79
6.1	Conclusões Principais.....	79
6.1.1	Resposta às Perguntas de Investigação.....	81
6.2	Contribuições do Trabalho	83
6.3	Limitações do Trabalho	84
6.4	Trabalho Futuro	86
6.5	Considerações Finais.....	88
	Referências bibliográficas	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 – instabilidade de unidades de carga durante o transporte.	32
Figura 3.2 – Inclinação das unidades de carga paletizadas.....	33
Figura 3.3 – Envolvimento insuficiente da base da palete.	33
Figura 3.4 - Diagrama de Ishikawa - Análise de causas-raíz.....	38
Figura 4.1 - Fluxograma do modelo proposto.	55
Figura 5.1 - Evolução estimada da taxa de paletes instáveis	69
Figura 5.2 - Comparação entre valores de referência, objetivos e resultados obtidos	70

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Contributos principais dos conceitos fundamentais da literatura	11
Tabela 2.2 - Contributos dos Estudos Empíricos Relevantes	18
Tabela 4.1 - Comparação das abordagens de avaliação da estabilidade de paletes.....	48
Tabela 4.2 - Critérios de Avaliação da Estabilidade da Paleta	50
Tabela 4.3 - Sistema de pontuação da configuração de paletização.....	51
Tabela 4.4 - Sistema de classificação e decisão da estabilidade da paleta	53
Tabela 5.1 - Síntese dos resultados da validação.....	67
Tabela 5.2 - Comparação entre valores de referência, objetivos e resultados obtidos	71
Tabela 5.3 - Impacto dos cenários de sensibilidade nos indicadores de desempenho	75

LISTA DE SIGLAS

EU	European Union
EUMOS	European Safe Logistics Association
FCT/UNL	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa
IPL	Instituto Politécnico de Lisboa
ISEL	Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
ISO	International Organization for Standardization
KPI	Key Performance Indicator
TFM	Trabalho Final de Mestrado

1 Introdução

O presente capítulo introduz o tema da investigação, enquadrando o problema em estudo, os objetivos, as perguntas de investigação, a metodologia adotada e a estrutura da dissertação.

1.1 Contextualização do tema

As empresas produtoras e embaladoras de bens de consumo desempenham um papel central ao longo da cadeia de abastecimento e distribuição, sendo responsáveis por assegurar a integridade e a segurança dos produtos, alimentares e não alimentares, desde o processo produtivo até à entrega ao cliente ou consumidor final, mesmo quando a fase logística final é subcontratada.

Ao longo deste percurso, que inclui operações como enchimento, embalagem, paletização e transporte, são tomadas diversas decisões que influenciam diretamente a eficiência técnica e operacional, bem como a segurança do produto. Neste contexto, o desenvolvimento da embalagem assume particular relevância, uma vez que deve assegurar a proteção adequada do produto, a compatibilidade com os equipamentos e processos industriais e, simultaneamente, contribuir para a eficiência produtiva e logística.

Neste enquadramento, a paletização do produto acabado, realizada na fase final das operações de enchimento e embalamento, antes do armazenamento e da distribuição, assume especial importância. A paleta constitui atualmente a forma mais comum de acondicionamento para o transporte rodoviário de mercadorias, particularmente na indústria alimentar e de bebidas.

Atualmente, as empresas enfrentam também pressões crescentes relacionadas com a competitividade e com preocupações ambientais, nomeadamente associadas à redução da pegada de carbono (Speranza, 2018). Neste contexto, as organizações procuram reduzir custos e melhorar a eficiência dos processos, mantendo ou aumentando a qualidade dos materiais e serviços utilizados. Este desafio implica encontrar um equilíbrio entre desempenho técnico, qualidade e custo dos materiais que compõem a embalagem e os sistemas de acondicionamento do produto.

Apesar destas exigências, as organizações procuram garantir elevados níveis de desempenho em cada fase do processo produtivo e logístico, desde as linhas de enchimento até às operações de paletização e transporte, com o objetivo de assegurar a qualidade do produto e evitar reclamações por parte de clientes ou consumidores finais.

No entanto, continuam a verificar-se ocorrências associadas ao transporte de mercadorias paletizadas, nomeadamente situações em que as cargas perdem estabilidade durante o transporte. Estas situações podem manifestar-se através do deslocamento ou tombamento das paletes no interior dos veículos ou, em casos mais graves, na via pública, podendo originar danos materiais, perdas de produto e riscos para a segurança rodoviária (Christopher, 2016; European Commission, 2018).

Para as empresas produtoras ou embaladoras, a ocorrência destes incidentes nem sempre é de fácil interpretação, uma vez que o transporte rodoviário envolve múltiplos fatores externos ao processo industrial, como as condições das infraestruturas rodoviárias, o comportamento de condução ou outras variáveis operacionais. No entanto, a estabilidade das paletes à saída da unidade industrial constitui um fator crítico que pode influenciar significativamente o comportamento da carga durante o transporte (Ballou, 2004; Christopher, 2016).

Neste contexto, a análise da estabilidade das paletes de produto acabado assume particular relevância para os responsáveis das áreas de qualidade e logística das empresas. A inexistência de critérios normalizados para avaliar a estabilidade das paletes, bem como a dificuldade em clarificar responsabilidades entre produtores, embaladores e transportadores, levanta a possibilidade de desenvolver abordagens mais estruturadas de avaliação (European Commission, 2014, 2018).

A implementação de um processo de certificação interna da estabilidade das paletes poderá contribuir para reduzir desperdícios de produto, minimizar danos materiais, melhorar a eficiência do transporte e reforçar a segurança rodoviária. No contexto da presente dissertação, a certificação interna corresponde a um processo formal de avaliação realizado pela própria organização, baseado em critérios técnicos mensuráveis e regras de decisão previamente definidas, destinado a avaliar, de forma objetiva e estruturada, se a unidade de carga reúne condições adequadas para expedição. Não se trata, por isso, de uma certificação

emitida por uma entidade acreditada, mas de um mecanismo interno de apoio à decisão e à gestão do risco logístico. Além disso, um processo desta natureza poderá facilitar a análise e interpretação de incidentes associados ao transporte, incluindo situações com impacto em terceiros.

1.2 Apresentação do Problema

O transporte rodoviário de mercadorias paletizadas, em particular na indústria alimentar e de bebidas, apresenta desafios relevantes em termos de segurança, eficiência logística e controlo de custos. Um dos problemas mais significativos prende-se com a ocorrência de situações em que paletes de produto acabado perdem estabilidade durante o transporte, originando cargas tombadas, danos materiais, perdas de produto e potenciais riscos para terceiros.

Estas situações podem ocorrer tanto no interior dos veículos de transporte como na via pública, tendo impacto direto na segurança rodoviária e na imagem das empresas envolvidas.

Embora fatores externos, como as condições das infraestruturas rodoviárias, o tráfego ou o comportamento do condutor possam influenciar a ocorrência destes incidentes, a estabilidade da paleta à saída da unidade industrial constitui um elemento crítico que se encontra sob controlo direto do produtor ou embalador.

No contexto da empresa em estudo, a avaliação da estabilidade das paletes baseia-se predominantemente em critérios empíricos e na experiência operacional das equipas envolvidas, não existindo um processo sistemático, objetivo e normalizado que permita comprovar a estabilidade das paletes antes da sua expedição.

A inexistência de critérios normalizados para avaliar a estabilidade das paletes dificulta a gestão do risco logístico e torna mais complexa a atribuição de responsabilidades entre produtores, transportadores e seguradoras. Esta lacuna evidencia a necessidade de investigar soluções que permitam avaliar e garantir, de forma objetiva, a estabilidade das paletes de produto acabado à saída do processo de enchimento e embalamento.

1.3 Definição Detalhada do Problema

No contexto descrito, o problema em análise pode ser formalmente definido como a inexistência de um modelo estruturado, suportado por critérios técnicos mensuráveis, que permita avaliar de forma objetiva e sistemática a estabilidade das paletes de produto acabado à saída da unidade industrial.

Esta ausência de um referencial técnico limita a capacidade das organizações para validar a conformidade das unidades de carga face às exigências do transporte rodoviário, comprometendo a consistência do desempenho logístico.

Adicionalmente, a inexistência de métodos de avaliação padronizados dificulta a quantificação do risco associado à instabilidade das paletes, bem como a identificação objetiva das suas causas, condicionando a definição de medidas preventivas eficazes.

Neste sentido, o problema central reside na falta de um modelo que permita não só avaliar, mas também analisar de forma estruturada a estabilidade das paletes, assegurando a sua adequação às condições reais de transporte e apoiando a gestão do risco ao longo da cadeia logística.

1.4 Objetivos do Trabalho

O objetivo geral deste trabalho consiste em analisar a estabilidade das paletes de produto acabado no transporte rodoviário enquanto fator de risco logístico, operacional e económico, e desenvolver um modelo conceptual de certificação interna da estabilidade das paletes à saída de fábrica, baseado em critérios técnicos mensuráveis.

Para atingir este objetivo geral, definem-se os seguintes objetivos específicos:

1. Caracterizar o processo de paletização de produto acabado, identificando os principais fatores técnicos que influenciam a estabilidade das paletes;
2. Analisar os riscos associados à instabilidade das paletes durante o transporte rodoviário;
3. Identificar as limitações dos métodos atualmente utilizados na avaliação da estabilidade das paletes;
4. Definir critérios técnicos mensuráveis que permitam a avaliação objetiva da estabilidade das paletes;

5. Desenvolver um modelo conceptual de certificação interna da estabilidade das paletes;
6. Avaliar o potencial impacto e a viabilidade da aplicação do modelo no contexto logístico.

Face ao problema identificado e aos objetivos definidos para o presente estudo, formulam-se as seguintes perguntas de investigação:

1. Quais são os principais fatores técnicos que influenciam a estabilidade das paletes de produto acabado à saída de fábrica?
2. De que forma a instabilidade das paletes contribui para o aumento do risco logístico, da sinistralidade rodoviária e dos custos associados ao transporte?
3. Quais são os principais constrangimentos dos métodos atualmente utilizados pelas empresas produtoras de bens de consumo para avaliar a estabilidade das paletes antes da expedição?
4. Que critérios técnicos mensuráveis podem ser utilizados para avaliar a estabilidade das paletes de produto acabado à saída de fábrica?
5. Que condições ou critérios permitiriam que a certificação interna da estabilidade das paletes se constituísse como uma ferramenta eficaz de apoio à gestão do risco logístico e à clarificação de responsabilidades entre os intervenientes da cadeia de transporte?

1.5 Metodologia Resumida

A presente investigação adota uma abordagem de estudo de caso aplicado, de natureza analítica, conceptual e empírica, enquadrada no domínio da Engenharia e Gestão Industrial com foco na análise da estabilidade das paletes de produto acabado no transporte rodoviário.

A metodologia desenvolve-se em três componentes complementares.

Numa primeira componente, de natureza conceptual, é realizada uma revisão da literatura científica e técnica relevante nas áreas da logística, transporte rodoviário, embalagem, paletização e gestão do risco. Esta etapa permite enquadrar teoricamente o problema, identificar os principais fatores que influenciam a estabilidade das paletes e sustentar o desenvolvimento da proposta.

Numa segunda componente, de natureza empírica qualitativa, é desenvolvido um estudo de caso numa empresa do setor das bebidas, com base na observação direta dos processos de paletização e expedição, complementada pela análise de ocorrências operacionais observadas no contexto estudado. Esta fase permite caracterizar as práticas existentes, identificar limitações dos métodos atuais e compreender as condições reais associadas à instabilidade das paletes.

Numa terceira componente, de natureza propositiva, é desenvolvido um modelo conceptual de certificação interna da estabilidade das paletes, baseado em critérios técnicos mensuráveis, estruturado com base nos contributos da literatura e nos resultados do estudo de caso.

A avaliação da proposta é realizada através de uma abordagem qualitativa, baseada na análise da sua coerência conceptual, aplicabilidade prática e alinhamento com os fatores críticos identificados na literatura e no contexto industrial em estudo.

Adicionalmente, a validação é complementada pela definição de indicadores de desempenho (*KPI*), que permitem avaliar de forma estruturada a eficácia do modelo proposto, conforme detalhado no Capítulo 4.

O presente estudo centra-se na análise da estabilidade das paletes de produto acabado no contexto do transporte rodoviário de mercadorias, aplicado a empresas produtoras de bens de consumo, com particular incidência na indústria alimentar e de bebidas.

A investigação incide especificamente sobre a fase final do processo de enchimento e embalagem, nomeadamente as operações de paletização e expedição das paletes à saída da unidade industrial, consideradas pontos críticos de controlo sob responsabilidade do produtor ou embalador.

O trabalho não contempla a análise detalhada de fatores relacionados com o transporte, como rotas específicas, tipos de veículos, estilos de condução ou características das infraestruturas rodoviárias. Também não inclui a implementação prática do modelo proposto em ambiente industrial nem a realização de ensaios experimentais ou testes físicos.

O estudo assume, assim, uma abordagem conceptual e analítica baseada na literatura técnica, em normas aplicáveis e em boas práticas da indústria, tendo

como objetivo propor um modelo de certificação interna aplicável a diferentes contextos industriais.

A presente dissertação encontra-se organizada em seis capítulos, estruturados de forma a assegurar uma progressão lógica desde o enquadramento do problema até às conclusões do estudo.

O Capítulo 1 apresenta a introdução, incluindo a contextualização do tema, o problema em estudo, os objetivos, as perguntas de investigação, a metodologia e a delimitação do estudo.

O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura, enquadrando os principais conceitos e abordagens relevantes para a estabilidade de paletes e gestão do risco logístico.

O Capítulo 3 descreve o estudo de caso, caracterizando o contexto organizacional e identificando o problema em análise.

O Capítulo 4 apresenta a proposta de melhoria, consistindo no desenvolvimento de um modelo estruturado de avaliação e certificação interna da estabilidade das paletes.

O Capítulo 5 apresenta a validação da proposta, com base em indicadores de desempenho, análise comparativa e discussão dos resultados obtidos.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho, as suas principais contribuições, limitações identificadas e propostas de trabalho futuro.

2 Revisão da Literatura

O presente capítulo tem como objetivo, através da análise crítica da literatura científica, técnica e normativa relevante, enquadrar teoricamente a problemática em estudo. A revisão da literatura centra-se nos conceitos, modelos, evidência empírica e referenciais relacionados com a estabilidade das paletes, a logística, a gestão do risco logístico e o transporte rodoviário, procurando sintetizar criticamente o conhecimento existente e identificar as principais lacunas do conhecimento que fundamentam o desenvolvimento da proposta apresentada nesta dissertação (Webster & Watson, 2002).

2.1 Metodologia de Pesquisa Bibliográfica

A metodologia de pesquisa bibliográfica adotada teve como objetivo identificar, selecionar e analisar a literatura científica e técnica relevante para fundamentar teoricamente a problemática em estudo, seguindo os princípios recomendados para revisões estruturadas da literatura (Hart, 1998). A pesquisa foi realizada com base em fontes científicas, técnicas e normativas reconhecidas, assegurando a qualidade e pertinência dos conteúdos analisados.

Foram especificamente consultadas bases de dados académicas como Scopus, Web of Science, ScienceDirect e Google Scholar, bem como repositórios institucionais relevantes. Para a identificação da literatura, foram utilizados termos de pesquisa como "pallet stability", "load stability", "unit load", "palletization", "transport packaging", "road freight transport", "cargo securing" e "logistics risk management", bem como combinações destes termos. A seleção das fontes teve como critérios a relevância temática, a atualidade e a aplicabilidade ao contexto das empresas produtoras de bens de consumo. A pesquisa bibliográfica foi conduzida de forma estruturada, procurando assegurar transparência e rigor na identificação, seleção e análise da literatura, em conformidade com os princípios metodológicos descritos por Booth *et al.* (2016) e com as boas práticas recomendadas para revisões estruturadas (Kitchenham, 2004; Tranfield *et al.*, 2003).

2.2 Estado de Arte: Conceitos Chave

A compreensão da estabilidade das paletes no transporte rodoviário exige o enquadramento de um conjunto de conceitos fundamentais que sustentam a investigação. Neste contexto, procede-se à análise dos principais conceitos identificados na literatura, nomeadamente a cadeia de abastecimento, a logística, a embalagem, a paletização e a gestão do risco logístico, por constituírem a base conceptual necessária para compreender os fatores que influenciam a estabilidade das unidades de carga e fundamentar o desenvolvimento da proposta apresentada nesta dissertação.

2.2.1 Conceitos Fundamentais do Domínio de Estudo

A cadeia de abastecimento pode ser definida como o conjunto integrado de organizações, recursos e processos envolvidos no fluxo de produtos, serviços e informação desde a origem até ao consumidor final, com o objetivo de melhorar o desempenho global do sistema (Christopher, 2016; Mentzer *et al.*, 2001).

Neste contexto, a logística constitui o conjunto de atividades responsáveis pelo planeamento, implementação e controlo eficiente do fluxo e armazenamento de bens e da informação associada ao longo da cadeia de abastecimento, assegurando a eficiência das operações e o cumprimento dos requisitos operacionais (Ballou, 2004).

Entre estas atividades incluem-se o transporte, o armazenamento, o manuseamento de materiais e o acondicionamento das paletes, elementos que influenciam diretamente a estabilidade das paletes durante o transporte rodoviário (Singh *et al.*, 2014; Yam, 2009).

A embalagem desempenha um papel determinante neste processo, assumindo funções de proteção, contenção, conservação e facilitação do transporte, influenciando diretamente a estabilidade e a integridade da carga (Twede *et al.*, 2000; Yam & Lee, 2012).

A paletização consiste na organização estruturada de embalagens sobre uma palete segundo padrões definidos, com o objetivo de garantir estabilidade, segurança e eficiência no manuseamento e transporte (Yam, 2009). Neste contexto, distingue-se estabilidade estática, associada à integridade da carga em repouso, e estabilidade dinâmica, relacionada com a capacidade de resistência a

forças variáveis típicas das condições reais de transporte (European Commission, 2018).

Por fim, o risco logístico pode ser entendido como a probabilidade de ocorrência de eventos que comprometam a segurança, a integridade do produto ou o desempenho operacional das atividades logísticas, resultando da interação entre fatores técnicos, humanos e organizacionais (Aven, 2016; Wagner & Bode, 2008).

No âmbito da gestão do risco, destaca-se ainda o modelo *Swiss Cheese* proposto por Reason (1997), que permite compreender a ocorrência de falhas em sistemas complexos como resultado da interação entre múltiplas vulnerabilidades. Este modelo será aprofundado em secções posteriores, no contexto do enquadramento teórico da gestão do risco logístico.

A tabela 2.1 apresentada sintetiza os principais conceitos teóricos identificados na literatura e evidencia a relação entre logística, embalagem, paletização e gestão do risco no contexto do transporte de mercadorias paletizadas.

Tabela 2.1 - Contributos principais dos conceitos fundamentais da literatura

Conceito	Autor(es)	Contributo principal	Relevância para a tese
Cadeia de abastecimento	Mentzer <i>et al.</i> (2001); Christopher (2016)	Definição de cadeia de abastecimento como rede de organizações que gerem fluxos de produtos e informação.	Enquadra o sistema logístico onde ocorre o transporte de mercadorias.
Logística	Ballou (2004)	Planeamento, implementação e controlo do fluxo de bens e informação.	Fundamenta as atividades logísticas que influenciam o transporte.
Unidade de carga	Yam (2009)	Estruturação de produtos para movimentação como um único elemento.	Base operacional do transporte paletizado.
Paletização	Yam (2009)	Organização das embalagens sobre paletes para transporte eficiente.	Determina a estabilidade estrutural da carga.
Segurança da carga	European Commission (2018)	Diretrizes técnicas para fixação de cargas no transporte rodoviário.	Define critérios físicos para estabilidade.
Risco logístico	Wagner & Bode (2008); Aven (2016)	Identificação e gestão de riscos nas cadeias de abastecimento.	Permite enquadrar a instabilidade das paletes como risco logístico.

2.2.2 Modelos Conceptuais Relevantes

A análise da estabilidade das paletes e da segurança no transporte logístico tem sido abordada na literatura através de diferentes modelos conceptuais e enquadramentos teóricos provenientes das áreas da logística, engenharia de embalagem, gestão do risco e segurança no transporte (Christopher, 2016; Mentzer *et al.*, 2001). Estes modelos fornecem estruturas analíticas que permitem compreender a interação entre variáveis físicas, operacionais e organizacionais que influenciam o desempenho das operações de movimentação e transporte.

No domínio da gestão da cadeia de abastecimento, diversos autores propõem modelos sistémicos que analisam o fluxo de materiais e informação como um sistema integrado (Lambert & Cooper, 2000), enfatizando a interdependência entre processos logísticos e a necessidade de coordenação entre intervenientes. Estas perspetivas sistémicas contrastam com abordagens mais tradicionais centradas em variáveis isoladas, evidenciando a evolução conceptual da literatura no sentido de modelos integrados de análise logística. Estas abordagens demonstram que o desempenho logístico depende da interação dinâmica entre características do produto, condições de transporte, práticas operacionais e requisitos de serviço.

No contexto específico da estabilidade das paletes, a literatura técnica apresenta modelos baseados em princípios de mecânica e engenharia de materiais. Estes modelos analisam o comportamento estrutural das cargas sob diferentes condições de esforço, considerando variáveis como a distribuição de peso, o mosaico de empilhamento, as propriedades da embalagem, o coeficiente de atrito e a intensidade das forças dinâmicas geradas durante o transporte (European Commission, 2018; European Safe Logistics Association (EUMOS), 2017; Yam, 2009). Adicionalmente, normas técnicas como a EUMOS 40509 estabelecem métodos de ensaio baseados na simulação de forças dinâmicas representativas das condições reais de transporte, incluindo acelerações e desacelerações. Estes testes permitem avaliar o comportamento estrutural da carga e a sua capacidade de resistir a esforços típicos do transporte rodoviário (EUMOS, 2017).

Enquanto estas abordagens privilegiam a análise quantitativa de forças e propriedades físicas, outras correntes teóricas enfatizam dimensões organizacionais e comportamentais, demonstrando que a estabilidade da unidade

de carga não constitui apenas um problema técnico, mas também um fenómeno sistémico. A análise integrada destes fatores permite avaliar de forma sistemática a resistência estrutural da unidade de carga e prever o risco de colapso ou deslocamento.

Paralelamente, abordagens oriundas da engenharia de segurança e da gestão do risco propõem modelos probabilísticos que permitem estimar a probabilidade de ocorrência de falhas logísticas e avaliar as suas consequências operacionais e económicas (Aven, 2016). Esta perspetiva complementa as abordagens determinísticas da engenharia estrutural, permitindo integrar incerteza e variabilidade operacional na avaliação do desempenho logístico, particularmente em contextos de transporte rodoviário sujeitos a forças dinâmicas.

Adicionalmente, a literatura recente tem enfatizado modelos integrados que combinam variáveis técnicas e organizacionais (Hollnagel, 2014), reconhecendo que a estabilidade da unidade de carga depende não apenas de parâmetros físicos, mas também de fatores humanos, práticas de manuseamento, formação dos operadores e políticas de controlo de qualidade. Estas abordagens sistémicas reforçam a importância de metodologias estruturadas de avaliação capazes de garantir níveis consistentes de desempenho e segurança ao longo da cadeia logística.

A diversidade de enquadramentos teóricos identificados demonstra que não existe um modelo único capaz de explicar isoladamente o fenómeno da estabilidade das paletes, sendo necessária uma abordagem multidisciplinar que integre contributos da engenharia, logística e gestão do risco.

No conjunto, os modelos e abordagens teóricas identificados convergem na ideia de que a estabilidade das paletes constitui um fenómeno de natureza sistémica, resultante da interação entre fatores físicos, operacionais e organizacionais (Reason, 1997). A compreensão integrada destes modelos constitui um fundamento essencial para o desenvolvimento de instrumentos de análise e propostas metodológicas orientadas para a mitigação do risco logístico e para a melhoria da eficiência e segurança das operações de transporte.

2.2.3 Evolução Histórica das Abordagens Relevantes

A análise da estabilidade das paletes tem evoluído ao longo do tempo (Christopher, 2016) em paralelo com o desenvolvimento das operações logísticas

e das exigências associadas à segurança no transporte de mercadorias. Inicialmente, as preocupações centrais das organizações incidiam sobretudo na eficiência do acondicionamento e na maximização do aproveitamento do espaço de carga, sendo a estabilidade considerada um requisito implícito decorrente da correta disposição das embalagens.

Nas primeiras abordagens, predominavam perspectivas essencialmente empíricas (Mentzer *et al.*, 2001), baseadas na experiência operacional e em práticas consolidadas no contexto industrial. A estabilidade das paletes era frequentemente avaliada de forma visual ou através de testes informais, não existindo critérios técnicos padronizados que permitissem medir de forma objetiva o comportamento estrutural das paletes durante o transporte. Esta fase caracterizou-se por uma predominância de conhecimento tácito e por uma reduzida formalização metodológica.

Com a intensificação das cadeias de abastecimento globais e o aumento da complexidade das operações logísticas, tornou-se progressivamente evidente a necessidade de abordagens mais sistemáticas e fundamentadas. A investigação passou então a incorporar princípios da mecânica, da engenharia de materiais e da análise estrutural, permitindo compreender de forma mais rigorosa o comportamento físico das cargas sujeitas a forças externas.

Neste contexto, surgiram estudos experimentais focados na medição de forças de contenção, resistência estrutural e estabilidade dinâmica das paletes, incluindo ensaios laboratoriais e testes de simulação de transporte que permitem avaliar o comportamento das paletes em condições reais de operação (European Commission, 2018; EUMOS, 2017; Yam, 2009).

Posteriormente, o desenvolvimento de normas técnicas e diretrizes internacionais, incluindo recomendações da Comissão Europeia e normas específicas como a EUMOS 40509 (European Commission, 2018; EUMOS, 2017), veio introduzir maior uniformização nos critérios de avaliação, promovendo a adoção de procedimentos de ensaio e metodologias comparáveis entre organizações e setores industriais.

Estas iniciativas contribuíram para a transição de abordagens baseadas exclusivamente na experiência para modelos fundamentados em evidência técnica e científica.

Mais recentemente, a literatura tem vindo a enfatizar abordagens integradas (Hollnagel, 2014), que reconhecem a natureza sistémica da estabilidade das paletes. Estas abordagens consideram simultaneamente fatores físicos, operacionais e humanos, reconhecendo que a segurança no transporte resulta da interação entre características da carga, condições de movimentação, comportamento dos operadores e práticas organizacionais. A evolução do conhecimento nesta área reflete, assim, uma passagem progressiva de perspetivas isoladas para modelos sistémicos de análise.

Em suma, a evolução histórica das abordagens demonstra um movimento contínuo no sentido da formalização científica e da padronização metodológica, evidenciando uma crescente preocupação com a medição objetiva, a comparabilidade de resultados e a mitigação do risco logístico. Esta trajetória evidencia a importância de desenvolver instrumentos estruturados de avaliação que permitam garantir níveis consistentes de estabilidade e segurança ao longo das operações de transporte. Esta evolução mostra a necessidade de abordagens estruturadas de avaliação da estabilidade das paletes à saída da unidade industrial, alinhando-se com o problema de investigação definido no presente estudo.

2.3 Enquadramento Teórico

Após a análise dos conceitos fundamentais e dos principais modelos identificados na literatura, torna-se necessário aprofundar o enquadramento teórico que sustenta a investigação. Neste contexto, apresentam-se as principais teorias e princípios científicos que permitem compreender a estabilidade das paletes como um fenómeno resultante da interação entre fatores técnicos, logísticos e organizacionais, constituindo a base conceptual para a análise desenvolvida nos capítulos seguintes.

2.3.1 Teorias e Princípios Fundamentais

A análise do desempenho logístico e da estabilidade das paletes fundamenta-se num conjunto de referenciais teóricos provenientes da gestão da cadeia de abastecimento, da engenharia de embalagem e da gestão do risco. A literatura evidencia que as cadeias logísticas devem ser analisadas como sistemas integrados, caracterizados pela interdependência entre fluxos de materiais,

informação e recursos (Christopher, 2016; Mentzer *et al.*, 2001). Nesta perspectiva sistêmica, o desempenho operacional resulta da coordenação entre agentes, da qualidade da informação e da robustez dos processos.

No domínio da gestão da cadeia de abastecimento, modelos conceituais estruturantes defendem que a eficiência e a resiliência dependem da integração entre processos logísticos e da capacidade de adaptação a condições variáveis (Lambert & Cooper, 2000). Apesar da relevância destes modelos, a sua aplicação direta a contextos operacionais específicos revela limitações quando não são consideradas variáveis físicas e técnicas associadas à carga. Paralelamente, a literatura sobre gestão do risco evidencia que as cadeias modernas estão expostas a múltiplas fontes de vulnerabilidade, incluindo riscos de fornecimento, procura, infraestruturas e eventos disruptivos externos (Wagner & Bode, 2008). Estas abordagens demonstram que a segurança logística depende da antecipação sistemática de falhas e da implementação de mecanismos preventivos (Hohenstein *et al.*, 2015; Sahab & Oulfarsi, 2024).

No contexto específico da estabilidade das paletes, estudos experimentais recentes evidenciam que a estabilidade das paletes é fortemente influenciada pela força de contenção do filme estirável, sendo a sua aplicação um fator determinante no desempenho estrutural da paleta durante o transporte (European Commission, 2018; EUMOS, 2017; Tkaczyk, 2025; Yam, 2009). Assim, a estabilidade deve ser entendida como um processo dependente da articulação entre variáveis técnicas e operacionais, e não como uma propriedade isolada do produto ou da embalagem.

2.3.2 Abordagens Teóricas e Implicações Conceptuais

A literatura apresenta diferentes abordagens teóricas para interpretar o desempenho logístico e a segurança no transporte, podendo distinguir-se perspectivas sistêmicas, mecânicas e organizacionais. As abordagens sistêmicas enfatizam a interdependência entre processos e demonstram que a performance global resulta da coordenação entre intervenientes da cadeia logística. Já os modelos de natureza técnica concentram-se na análise física da estabilidade e na resistência estrutural das unidades de carga, permitindo avaliar riscos de colapso ou deslocamento.

Por outro lado, abordagens oriundas da gestão organizacional e da engenharia de segurança destacam o papel dos fatores humanos e das práticas operacionais

na ocorrência de falhas logísticas. Estudos empíricos demonstram que cadeias mais integradas apresentam níveis superiores de desempenho e resiliência, evidenciando a importância da coordenação entre fornecedores, operadores logísticos e distribuidores (Duong & Ha, 2021).

Mais recentemente, a incorporação de tecnologias digitais, sistemas de monitorização e ferramentas de análise de dados tem vindo a introduzir novas perspetivas teóricas centradas na visibilidade e controlo das operações. Estas abordagens defendem que a digitalização e a rastreabilidade aumentam a capacidade de resposta a perturbações e reduzem a incerteza associada ao transporte de mercadorias (Ivanov *et al.*, 2020; Panigrahi *et al.*, 2025).

2.3.3 Integração Conceptual das Perspetivas Existentes

A análise integrada das diferentes correntes teóricas demonstra que o desempenho logístico e a estabilidade das unidades de carga resultam da interação entre fatores técnicos, organizacionais e contextuais. Embora os modelos tradicionais tenham privilegiado a eficiência operacional e a utilização eficiente de recursos, a literatura recente evidencia a necessidade de abordagens integradas que considerem simultaneamente variáveis físicas, práticas operacionais e mecanismos de gestão do risco.

Apesar dos avanços conceptuais existentes, verifica-se ainda uma lacuna na literatura relativamente a enquadramentos analíticos que articulem de forma integrada estes diferentes níveis de análise. Em particular, permanece limitada a investigação que relacione diretamente parâmetros estruturais de estabilidade com variáveis organizacionais e práticas de controlo operacional em contextos reais de transporte. Verifica-se, assim, uma insuficiente articulação entre abordagens técnicas e organizacionais na literatura existente.

Neste sentido, a construção de um enquadramento conceptual integrador constitui um passo essencial para compreender de forma sistemática os fatores que influenciam a estabilidade das unidades de carga e para sustentar o desenvolvimento de modelos analíticos orientados para a mitigação do risco logístico e para a melhoria da segurança e eficiência das operações.

A Tabela 2.2 sintetiza os principais contributos da literatura científica relevante para a compreensão da estabilidade das unidades de carga.

Tabela 2.2 - Contributos dos Estudos Empíricos Relevantes

Autor	Foco do estudo	Fatores analisados	Método	Contributo para estabilidade
Mentzer <i>et al.</i> (2001)	Cadeia de abastecimento	Integração de processos	Modelo conceptual	Demonstra que desempenho logístico depende de coordenação sistémica
Christopher (2016)	Logística e Cadeia de Abastecimento	Fluxos e eficiência	Modelo conceptual	Mostra relação entre decisões operacionais e desempenho
Ballou (2004)	Gestão logística	Fluxos físicos e informacionais	Modelo teórico	Define princípios de controlo e eficiência logística
Tkaczyk (2025)	Estabilidade de unidades de carga	força de contenção, filme estirável	estudo experimental	Demonstra influência direta da contenção na estabilidade
Yam (2009)	Paletização	Organização de cargas	Modelo técnico	Relaciona padrões de empilhamento com estabilidade
Aven (2016)	Gestão do risco	Probabilidade de falhas	Modelo probabilístico	Permite avaliar risco logístico
Wagner & Bode (2008)	Risco na cadeia logística	Interrupções e falhas	Modelo analítico	Mostra impacto do risco no desempenho operacional
Hollnagel (2014)	Sistemas socio-técnicos	Fatores humanos e organizacionais	Modelo sistémico	Demonstra natureza multidimensional da segurança
Reason (1997)	Segurança organizacional	Falhas humanas e sistémicas	Modelo teórico	Explica acidentes como interação de fatores

A análise comparativa dos estudos sintetizados evidencia que a estabilidade das unidades de carga constitui um fenómeno de natureza sistémica, resultante da interação entre fatores físicos, operacionais e organizacionais. A convergência dos contributos teóricos e empíricos demonstra que abordagens baseadas numa única dimensão analítica são insuficientes para explicar a ocorrência de falhas estruturais durante o transporte. Assim, a literatura sustenta a necessidade de modelos integrados que articulem variáveis técnicas, práticas operacionais e mecanismos de gestão do risco, permitindo uma compreensão mais robusta do fenómeno e suportando o desenvolvimento de metodologias sistemáticas de avaliação da estabilidade.

Apesar da diversidade e complementaridade dos contributos identificados, verifica-se que a literatura ainda carece de enquadramentos operacionais

integrados que traduzam estes fundamentos teóricos em critérios sistemáticos de avaliação aplicáveis à estabilidade das paletes em contexto industrial real. Esta lacuna reforça a pertinência do presente estudo e fundamenta a necessidade de desenvolver um modelo estruturado orientado para a certificação interna da estabilidade das unidades de carga à saída de fábrica.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver e propor um modelo estruturado de avaliação da estabilidade das unidades de carga que permita operacionalizar os princípios teóricos identificados na literatura e responder às limitações atualmente existentes nas práticas industriais.

2.4 Literatura e Aplicações Industriais

Após o enquadramento conceptual e teórico apresentado anteriormente, importa agora analisar a evidência empírica disponível na literatura e as suas aplicações em contexto industrial. Este sub-capítulo reúne estudos experimentais, investigações aplicadas e contributos técnicos que explicam de que forma diferentes fatores influenciam o desempenho logístico, a estabilidade das unidades de carga e a gestão do risco logístico.

2.4.1 Evidência Empírica sobre Desempenho Logístico e Risco

A literatura tem demonstrado de forma consistente que o desempenho das cadeias de abastecimento está diretamente relacionado com a capacidade de antecipar, monitorizar e mitigar riscos operacionais. Estudos quantitativos indicam que diferentes categorias de risco, incluindo riscos de fornecimento, procura e infraestruturas, exercem impactos diferenciados no desempenho organizacional, evidenciando a necessidade de abordagens sistemáticas de gestão do risco (Crespo Pereira *et al.*, 2019; Wagner & Bode, 2008).

Investigação recente tem igualmente evidenciado que a integração entre intervenientes da cadeia de abastecimento constitui um fator determinante para o desempenho logístico. Resultados empíricos demonstram que níveis elevados de integração interna e externa estão associados a melhorias significativas de eficiência operacional e resiliência, reforçando a importância da coordenação inter-organizacional (Duong & Ha, 2021).

Adicionalmente, estudos centrados na resiliência logística demonstram que cadeias de abastecimento modernas apresentam elevada exposição a perturbações devido à sua complexidade estrutural e dependência global, sendo necessária a adoção de estratégias proativas de gestão do risco (Sahab & Oulfarsi, 2024). Estes resultados sustentam a relevância de modelos analíticos capazes de identificar vulnerabilidades e antecipar falhas.

No domínio técnico, Estudos experimentais demonstram que a estabilidade das unidades de carga depende de variáveis físicas mensuráveis, nomeadamente forças de contenção, propriedades dos materiais e configuração estrutural (Tkaczyk, 2025).

Por outro lado, abordagens recentes têm explorado o papel das tecnologias digitais na melhoria do desempenho logístico, demonstrando que ferramentas de monitorização, rastreabilidade e análise de dados permitem reduzir incerteza operacional e aumentar a capacidade de resposta a eventos disruptivos (Ivanov *et al.*, 2020; Panigrahi *et al.*, 2025).

Em suma, a evidência empírica existente converge na demonstração de que o desempenho logístico e a segurança das operações dependem de fatores interdependentes de natureza técnica, organizacional e tecnológica, reforçando a necessidade de abordagens integradas de análise que sustentem a tomada de decisão em contextos reais de transporte e movimentação de mercadorias.

2.4.2 Estudos sobre Estabilidade de Cargas e Segurança no Transporte

A estabilidade das unidades de carga constitui um tema de crescente relevância na literatura científica e técnica, particularmente no contexto do transporte rodoviário de mercadorias, onde as cargas estão sujeitas a forças dinâmicas variáveis, vibrações, acelerações e movimentos laterais (European Commission, 2018). Estudos experimentais recentes evidenciam que pequenas variações na configuração da unidade de carga e na aplicação de sistemas de contenção podem gerar diferenças significativas na estabilidade estrutural durante o transporte (Tkaczyk, 2025). Estes resultados evidenciam que a estabilidade não deve ser interpretada como uma característica estática, mas como um fenómeno dinâmico e dependente do contexto operacional.

Investigações técnicas têm igualmente demonstrado que pequenas variações na configuração da unidade de carga podem originar diferenças significativas na

resistência estrutural e na probabilidade de ocorrência de falhas, o que reforça a importância de procedimentos sistemáticos de avaliação e validação. Neste sentido, ensaios laboratoriais e testes de simulação têm sido amplamente utilizados para medir parâmetros como força de contenção, deslocamento relativo entre embalagens e resistência a vibração, permitindo quantificar níveis de estabilidade e estabelecer critérios comparáveis entre diferentes configurações de carga (Bisha & Mrówczyński, 2021).

Paralelamente, estudos sobre segurança no transporte evidenciam que a instabilidade da carga constitui um dos principais fatores de risco logístico (Wagner & Bode, 2008), podendo originar danos materiais, perdas económicas e riscos para a segurança rodoviária. A literatura demonstra que a ocorrência de falhas estruturais em unidades de carga resulta frequentemente da combinação de fatores técnicos e operacionais, incluindo práticas inadequadas de acondicionamento, ausência de procedimentos normalizados e variabilidade nas condições reais de transporte. Este entendimento é consistente com a perspetiva sistémica dos acidentes organizacionais, segundo a qual falhas críticas resultam da interação de vulnerabilidades distribuídas ao longo do sistema (Reason, 1997).

As diretrizes europeias para a fixação de cargas no transporte rodoviário constituem um referencial técnico amplamente reconhecido para a avaliação da estabilidade e segurança das unidades de carga. Este documento estabelece princípios físicos e operacionais destinados a prevenir deslocamentos, tombamentos e colapsos estruturais durante o transporte, enfatizando que a carga deve permanecer estável em todas as condições normais de circulação, incluindo travagens, acelerações e manobras laterais (European Commission, 2018). O guia assenta numa abordagem baseada em princípios de mecânica aplicada, considerando variáveis como massa total, posição do centro de gravidade, coeficientes de atrito, forças inerciais e métodos de fixação. Estes parâmetros são utilizados para determinar requisitos mínimos de contenção e selecionar dispositivos adequados de estabilização, permitindo avaliar de forma objetiva o risco de deslocamento da carga.

Adicionalmente, investigações recentes têm destacado o papel da gestão do risco e da monitorização operacional (Sahab & Oulfarsi, 2024) na prevenção de incidentes associados à instabilidade de cargas. Estas abordagens enfatizam a necessidade de integrar variáveis físicas, organizacionais e tecnológicas num

enquadramento analítico comum, capaz de apoiar a tomada de decisão e reduzir a incerteza operacional. Tal perspectiva encontra suporte na literatura sobre segurança organizacional, que evidencia o papel das condições latentes e das fragilidades estruturais na gênese de falhas sistêmicas (Reason, 1997). Nesse contexto, ferramentas de análise de dados e sistemas de rastreabilidade têm sido apontados como instrumentos relevantes para melhorar a visibilidade e controle ao longo das operações logísticas.

A análise conjunta da literatura científica e dos referenciais técnicos evidencia que a compreensão da estabilidade das unidades de carga exige a articulação entre conhecimento acadêmico e normativo. Enquanto os estudos empíricos fornecem modelos explicativos e evidência quantitativa sobre fatores de risco e variáveis estruturais, as normas técnicas traduzem esse conhecimento em critérios operacionais e procedimentos padronizados aplicáveis em contexto real. Esta complementaridade demonstra que a segurança no transporte não resulta apenas de princípios teóricos, mas da integração entre investigação científica, validação experimental e enquadramento regulatório. Consequentemente, a utilização combinada destas abordagens constitui um requisito essencial para o desenvolvimento de metodologias robustas orientadas para a mitigação do risco logístico e para a melhoria da segurança e eficiência das operações de transporte.

2.4.3 Limitações, Contradições e Tendências Identificadas

A literatura empírica e técnica analisada evidencia limitações metodológicas recorrentes. Em primeiro lugar, verifica-se heterogeneidade significativa nos desenhos de estudo e nos indicadores utilizados para avaliar estabilidade, o que dificulta a comparabilidade entre resultados e a generalização de conclusões para diferentes configurações de carga e contextos industriais. Mesmo quando se recorrem a ensaios e simulações, a diversidade de condições operacionais (ex.: perfis de aceleração, vibração, manobras laterais e variabilidade do acondicionamento) introduz níveis elevados de variabilidade, tornando difícil estabelecer referenciais universais. Esta limitação é particularmente evidente quando se tenta transpor evidência experimental para práticas sistemáticas de avaliação em ambiente real, onde a variabilidade operacional é inerente ao sistema (European Commission, 2018; Tkaczyk, 2025).

Em segundo lugar, a literatura evidencia divergências na forma como a instabilidade das unidades de carga é interpretada e abordada. Parte dos estudos privilegia explicações predominantemente técnicas, centradas em parâmetros físicos mensuráveis, como a configuração estrutural da carga, as propriedades dos materiais ou os sistemas de contenção. Outras abordagens, contudo, salientam que falhas críticas raramente resultam de um único fator técnico, sendo frequentemente consequência da interação entre aspetos técnicos e fragilidades organizacionais, como a ausência de procedimentos normalizados, decisões operacionais inadequadas ou a existência de condições latentes no sistema.

Esta perspetiva é consistente com abordagens de segurança organizacional e socio-técnica, segundo as quais incidentes e falhas emergem da combinação de vulnerabilidades distribuídas ao longo do sistema e não de um fator isolado (Hollnagel, 2014; Reason, 1997). De forma complementar, a literatura sobre gestão do risco e resiliência das cadeias de abastecimento reforça que a instabilidade deve ser analisada no contexto mais amplo das perturbações e interdependências existentes ao longo da cadeia logística (Sahab & Oulfarsi, 2024; Wagner & Bode, 2008).

Apesar destas limitações e divergências, a investigação recente evidencia algumas tendências claras. Por um lado, observa-se um reforço das abordagens orientadas para a medição objetiva e validação experimental de parâmetros associados aos sistemas de estabilização, em particular a influência da força de contenção e da forma de aplicação do filme estirável, o que aponta para a procura de critérios cada vez mais quantificáveis e reproduzíveis (Tkaczyk, 2025). Por outro lado, verifica-se uma crescente integração de tecnologias digitais e ferramentas de monitorização, rastreabilidade e análise de dados, que contribuem para aumentar a visibilidade operacional e melhorar a capacidade de resposta a perturbações nas operações logísticas (Ivanov *et al.*, 2020; Panigrahi *et al.*, 2025).

Em suma, a evidência analisada sugere que a compreensão da estabilidade das unidades de carga exige abordagens integradas, capazes de combinar métricas físicas de estabilidade com mecanismos organizacionais de controlo e gestão do risco. Esta integração constitui um passo fundamental para o desenvolvimento de metodologias estruturadas de avaliação aplicáveis a contextos industriais reais.

2.5 Lacunas da Literatura e Implicações para a Investigação

A revisão da literatura permitiu identificar contributos relevantes para a compreensão da estabilidade das unidades de carga e da gestão do risco logístico. Contudo, a análise crítica dos estudos evidencia limitações, que justificam o desenvolvimento da presente investigação. Assim, este sub-capítulo sintetiza as principais lacunas identificadas na literatura e aborda as suas implicações para os objetivos e para a proposta conceptual apresentada nesta dissertação.

2.5.1 Análise Crítica dos Resultados da Revisão

A análise da literatura evidencia que o desempenho logístico e a estabilidade das unidades de carga têm sido estudados a partir de múltiplas perspetivas teóricas e empíricas, incluindo abordagens sistémicas, técnicas e organizacionais (Christopher, 2016; Mentzer *et al.*, 2001). Os modelos conceptuais existentes demonstram que a eficiência operacional depende da integração entre processos logísticos, da qualidade da informação e da capacidade de resposta a perturbações (Lambert & Cooper, 2000). Paralelamente, estudos experimentais confirmam que a estabilidade das unidades de carga resulta da interação de parâmetros físicos mensuráveis associados à configuração da carga e à sua contenção estrutural (Tkaczyk, 2025).

Contudo, a análise crítica revela que a maioria dos estudos tende a privilegiar dimensões isoladas do fenómeno, abordando separadamente fatores técnicos, organizacionais ou tecnológicos. Embora estes contributos sejam relevantes para a compreensão parcial do problema, verifica-se uma limitada articulação entre estes níveis de análise, situação já identificada na literatura sobre risco e resiliência logística (Sahab & Oulfarsi, 2024; Wagner & Bode, 2008).

2.5.2 Identificação das Lacunas de Investigação

A revisão da literatura evidencia a existência de lacunas relevantes que justificam a realização do presente estudo.

Em primeiro lugar, observa-se escassez de investigações que integrem simultaneamente variáveis físicas de estabilidade, práticas operacionais e mecanismos de gestão do risco num mesmo enquadramento analítico. A literatura

técnica tende a concentrar-se em análises experimentais de natureza mecânica e estrutural (Tkaczyk, 2025).

Em segundo lugar, verifica-se uma limitada aplicação de modelos estruturados de avaliação da estabilidade das unidades de carga em contextos industriais reais, sendo frequente a utilização de procedimentos empíricos ou critérios não normalizados. Esta ausência de referenciais sistemáticos dificulta a comparabilidade de resultados e a implementação de práticas consistentes entre organizações, aspeto já referido em estudos sobre integração e desempenho logístico (Duong & Ha, 2021).

Por fim, a literatura apresenta reduzida evidência relativa ao desenvolvimento de metodologias integradas de certificação da estabilidade de unidades de carga que possam apoiar a tomada de decisão técnica e a mitigação do risco logístico. Esta lacuna revela uma oportunidade de investigação relevante, particularmente em contextos industriais onde a segurança e a eficiência do transporte assumem papel crítico (Panigrahi *et al.*, 2025; Wagner & Bode, 2008).

2.5.3 Implicações para os Objetivos da Investigação

As lacunas identificadas fundamentam diretamente os objetivos do presente estudo e justificam a sua pertinência científica e prática. A ausência de modelos integrados que articulem fatores físicos, operacionais e organizacionais evidencia a necessidade de desenvolver um enquadramento conceptual estruturado que permita analisar a estabilidade das unidades de carga de forma sistemática e integrada.

Neste contexto, a investigação proposta visa contribuir para o avanço do conhecimento através da sistematização conceptual dos fatores determinantes da estabilidade e da proposta de um modelo estruturado de avaliação e certificação aplicável a contextos industriais reais. Este contributo pretende não apenas colmatar lacunas identificadas na literatura, mas também apoiar a tomada de decisão técnica e a melhoria das práticas logísticas, reforçando simultaneamente a segurança e a eficiência das operações de transporte.

2.6 Conclusão da Revisão da Literatura

Concluída a análise crítica da literatura e identificadas as principais lacunas que fundamentam a presente investigação, importa agora abordar os principais contributos da revisão realizada. Esta conclusão reúne os principais conhecimentos obtidos, evidenciando os conceitos, abordagens e evidências que sustentam o desenvolvimento do modelo conceptual proposto e estabelecem a ligação entre o enquadramento teórico e o estudo de caso apresentado no capítulo seguinte.

2.6.1 Principais Contributos da Revisão

A revisão da literatura permitiu consolidar os conceitos fundamentais associados à estabilidade das unidades de carga e enquadrar o fenómeno no contexto mais amplo do desempenho logístico e da gestão do risco. Os contributos teóricos analisados evidenciam que as cadeias de abastecimento devem ser compreendidas como sistemas interdependentes, nos quais decisões operacionais, práticas de coordenação e qualidade da informação influenciam o desempenho global. Em paralelo, a literatura técnica e empírica demonstra que a estabilidade das paletes depende de parâmetros físicos mensuráveis (ex.: configuração da carga e sistemas de contenção), sendo particularmente relevante a influência do processo de estabilização e da sua aplicação na resistência estrutural durante o transporte (Tkaczyk, 2025). Adicionalmente, referenciais técnicos europeus reforçam que as cargas estão sujeitas a forças dinâmicas que exigem critérios de contenção e práticas de segurança consistentes ao longo do transporte (European Commission, 2018)

A análise crítica revelou limitações relevantes na literatura, nomeadamente a tendência para abordar separadamente dimensões técnicas e organizacionais, bem como a insuficiência de enquadramentos operacionais integrados que traduzam conhecimento técnico em critérios sistemáticos de avaliação aplicáveis à expedição de paletes em contexto industrial. Persistem, assim, lacunas quanto à operacionalização de critérios consistentes e verificáveis à saída de fábrica, capazes de apoiar a prevenção de falhas, a mitigação do risco logístico e a clarificação de responsabilidades entre intervenientes. Estas lacunas fundamentam a pertinência científica e prática da investigação proposta, orientada para o

desenvolvimento de um modelo estruturado de avaliação e certificação interna da estabilidade das paletes, alinhado com contributos científicos e referenciais técnicos existentes (European Commission, 2018; Tkaczyk, 2025)

Com base no enquadramento desenvolvido neste capítulo, o capítulo seguinte apresenta a abordagem metodológica e a análise do contexto de aplicação do estudo, descrevendo o processo de paletização e expedição, os fatores técnicos relevantes e as práticas atuais de avaliação da estabilidade. Esta transição permite ligar os contributos da literatura à realidade operacional, criando condições para a construção e fundamentação do modelo de certificação interna proposto.

3 Estudo de Caso

Concluído o enquadramento teórico, apresenta-se neste capítulo o estudo de caso em contexto industrial e sua caracterização. O objetivo consiste em identificar o problema em análise, compreender os fatores que influenciam a estabilidade das unidades de carga e recolher evidências que fundamentam o desenvolvimento do modelo conceptual proposto.

3.1 Caracterização do Contexto

O presente estudo de caso desenvolve-se no contexto de uma empresa industrial do setor das bebidas, localizada em Portugal. A organização assume uma posição relevante no mercado nacional, dedicando-se à produção, enchimento, acondicionamento e distribuição de cervejas, sidras, águas e refrigerantes. A empresa emprega entre 1.000 e 1.400 colaboradores e apresenta uma operação industrial e logística de elevada complexidade, sustentada por processos produtivos automatizados e por um portefólio de produtos de elevada notoriedade. Por motivos de confidencialidade, a identidade da empresa não é divulgada no presente estudo.

No âmbito da sua atividade industrial, o processo produtivo inicia-se com a produção (de cerveja, sidra e refrigerantes) prossegue com o enchimento das garrafas, seguindo-se a sua organização em unidades de embalagem, sob a forma de caixas ou tabuleiros ou envolvidas em filme retráctil. Estas unidades são posteriormente agrupadas em unidades de carga paletizadas, que constituem a base das operações logísticas subsequentes.

Na fase final da linha de produção, as embalagens são encaminhadas para sistemas automatizados de paletização, onde robôs industriais realizam a disposição das unidades de embalagem sobre paletes. Esta operação segue padrões previamente definidos, designados por mosaicos de paletização, que determinam a forma como as embalagens são organizadas em cada camada. Estes padrões podem assumir configurações alinhadas ou desencontradas, sendo esta última frequentemente utilizada com o objetivo de melhorar a estabilidade da carga, promovendo uma maior interligação entre as embalagens.

Em determinadas situações, são ainda utilizados separadores em cartão entre as camadas de produto. Estes elementos têm como principal função reduzir o deslizamento entre níveis da paleta, contribuindo para o aumento da coesão da unidade de carga e para a melhoria da sua estabilidade global. A utilização destes separadores depende das características do produto, do tipo de embalagem e das decisões operacionais adotadas ao longo do processo produtivo.

Após a conclusão da paletização, as unidades de carga são encaminhadas para uma máquina envolvente, onde é aplicado filme estirável em torno da paleta. Este processo tem como objetivo assegurar a contenção da carga, garantindo que as embalagens permanecem estáveis durante as operações de manuseamento, armazenamento e transporte. A eficácia do envolvimento depende de vários fatores, em particular a quantidade de filme aplicada, o número de voltas, a tensão do filme e a correta aplicação ao longo da altura da paleta, incluindo a sua base.

Importa referir que, na prática operacional, a aplicação do filme estirável pode apresentar alguma variabilidade. Esta variabilidade pode resultar tanto dos parâmetros definidos nos equipamentos como da intervenção dos operadores, conduzindo a diferenças na qualidade do envolvimento entre diferentes paletes. Esta situação assume particular relevância, uma vez que a correta fixação da carga ao estrado da paleta é fundamental para garantir a estabilidade da unidade de carga.

Após a fase de envolvimento, as paletes são encaminhadas para o armazém ou diretamente para expedição, sendo posteriormente transportadas por via rodoviária até ao destino final. Durante estas etapas logísticas, as unidades de carga estão sujeitas a diversas solicitações físicas, incluindo vibrações, acelerações, travagens e forças laterais, que podem comprometer a sua estabilidade caso não tenham sido devidamente preparadas na origem.

Neste contexto, a estabilidade das paletes assume um papel crítico para garantir a integridade dos produtos e a eficiência das operações logísticas. A ocorrência de falhas na estabilidade pode conduzir a situações como deslocamento das embalagens, deformação da carga ou tombamento da paleta, resultando em perdas de produto, custos adicionais e impactos negativos na operação e na satisfação do cliente.

Assim, o contexto analisado caracteriza-se por um sistema produtivo altamente automatizado, inserido numa organização de grande dimensão e relevância no

setor, mas que apresenta variabilidade em etapas críticas do processo logístico, nomeadamente na configuração da paletização e na aplicação do filme estirável. Esta variabilidade, aliada às exigências do transporte, justifica a necessidade de uma análise detalhada das condições de estabilidade das unidades de carga, constituindo a base para o desenvolvimento do presente estudo.

3.2 Identificação e Caracterização do Problema

Apesar da existência de um processo produtivo automatizado e estruturado, a análise do contexto operacional evidencia a ocorrência recorrente de problemas relacionados com a estabilidade das unidades de carga paletizadas, com impacto direto na eficiência operacional, nos custos logísticos e na segurança das operações, justificando a necessidade de intervenção.

Estes problemas manifestam-se sobretudo nas fases de manuseamento, armazenamento e transporte, onde as paletes estão sujeitas a diferentes tipos de solicitações físicas que podem comprometer a integridade da carga.

A situação atual caracteriza-se por uma elevada variabilidade nos processos de paletização e, em particular, na aplicação do filme estirável. Embora existam configurações definidas para o arranjo das embalagens (mosaicos de paletização), a eficácia destas depende da correta execução das operações subsequentes, nomeadamente do envolvimento da carga. No entanto, a aplicação do filme estirável, sendo uma etapa crítica para a estabilidade da unidade de carga, não apresenta um mosaico uniforme, podendo variar em função dos parâmetros definidos nos equipamentos ou da intervenção dos operadores.

No contexto analisado, verificou-se que os problemas de estabilidade não constituem situações pontuais, mas sim ocorrências frequentes, verificando-se com regularidade tanto no transporte como no armazém.

Embora não existam registos quantitativos sistemáticos que permitam determinar com precisão a frequência destas ocorrências, a evidência empírica disponível e a observação contínua das operações indicam que se trata de um problema recorrente e com impacto relevante no contexto analisado, sendo os dados quantitativos detalhados considerados confidenciais pela organização.

Em diversas situações, as paletes apresentam instabilidade significativa, resultando em deslocamento de embalagens ou mesmo no tombamento total ou parcial da carga.

Uma das falhas mais críticas observadas refere-se ao envolvimento insuficiente da base da paleta, comprometendo a ligação entre a carga e o estrado de madeira. As Figuras 3.1 a 3.3 documentam ocorrências registadas em ambiente operacional real, revelando distintas formas de comprometimento da estabilidade das unidades de carga e sublinhando a importância de mecanismos de monitorização e controlo ao longo da cadeia logística.



Figura 3.1 – instabilidade de unidades de carga durante o transporte.

Fonte: Registos fotográficos da organização (adaptado e anonimizado pela autora).



Figura 3.2 – Inclinação das unidades de carga paletizadas.

Fonte: Registos fotográficos da organização (adaptado e anonimizado pela autora).



Figura 3.3 – Envolvimento insuficiente da base da paleta.

Fonte: Registos fotográficos da organização (adaptado e anonimizado pela autora).

As situações ilustradas nas Figuras 3.1 a 3.3 constituem exemplos observados em contexto operacional real e evidenciam diferentes manifestações da instabilidade das unidades de carga, reforçando a necessidade de sistemas de avaliação e controlo da estabilidade das paletes ao longo da cadeia logística.

Quando o filme não assegura a ligação entre a carga e o estrado de madeira, a unidade de carga perde a sua integridade estrutural. Adicionalmente, verificou-se que, em determinadas situações, o filme estirável pode perder aderência ou desprender-se parcialmente da base da paleta durante a movimentação e transporte, reduzindo assim, progressivamente a estabilidade da unidade de carga, passando a comportar-se como um conjunto de elementos sobrepostos sem coesão suficiente. Esta condição reduz significativamente a resistência da paleta a esforços dinâmicos, como vibrações, acelerações e forças laterais, frequentemente presentes durante o transporte rodoviário.

Do ponto de vista operacional, este tipo de falha traduz-se em sintomas observáveis claros, tais como o deslizamento das embalagens, a deformação da carga ou, em casos mais críticos, o tombamento da paleta. Estes eventos podem ocorrer durante a movimentação interna, no armazém, ou durante o transporte, sendo frequentemente associados a perdas de produto e a dificuldades operacionais.

A análise das causas aparentes destes problemas aponta para um conjunto de fatores interligados. Em primeiro lugar, destaca-se a variabilidade na aplicação do filme estirável, que pode resultar da ausência de parâmetros rigorosamente definidos ou da falta de uniformidade na sua execução. Em segundo lugar, a configuração da paletização, incluindo a disposição das embalagens e a utilização de separadores, pode influenciar a coesão da carga, contribuindo para uma maior ou menor resistência ao deslizamento entre camadas. Por último, fatores externos associados ao transporte, como as condições da estrada, travagens bruscas ou acelerações, podem amplificar fragilidades existentes na unidade de carga.

Adicionalmente, este problema pode ser enquadrado numa perspetiva sistémica, onde não se trata de uma falha isolada, mas sim do resultado da interação entre fatores técnicos, humanos e organizacionais. A ausência de procedimentos padronizados para a validação da estabilidade das paletes, bem como a inexistência de critérios objetivos para avaliar a qualidade do envolvimento, contribuem para a persistência destas ocorrências. Assim, o

problema pode ser interpretado como uma fragilidade no controlo do processo logístico, na medida em que não são asseguradas condições consistentes de estabilidade à saída da fábrica.

A relevância deste problema é particularmente significativa. A instabilidade das paletes tem impacto direto na eficiência operacional, podendo originar perdas de produto, aumento de custos associados a retrabalho, devoluções ou substituições, bem como atrasos na distribuição. Para além disso, estas situações afetam a qualidade do serviço prestado e podem comprometer a satisfação do cliente. Importa ainda salientar que o colapso de cargas representa um risco acrescido para a segurança dos operadores, podendo originar acidentes durante as operações de manuseamento.

Do ponto de vista técnico e operacional, a estabilidade das unidades de carga constitui um fator crítico no desempenho dos sistemas logísticos. A literatura evidencia que a integridade da carga durante o transporte depende da adequada conceção da embalagem, da configuração da unidade de carga e das condições de manuseamento e transporte. Neste enquadramento, a falta de controlo sobre variáveis críticas, como a aplicação do filme estirável, constitui um fator de risco relevante que deve ser analisado e mitigado.

Face ao exposto, torna-se evidente que a situação atual apresenta fragilidades que justificam a necessidade de intervenção. A inexistência de mecanismos sistemáticos para avaliar e garantir a estabilidade das paletes à saída da fábrica constitui uma lacuna significativa no processo logístico. Assim, coloca-se como questão central compreender de que forma as práticas atuais influenciam a estabilidade das unidades de carga e identificar soluções que permitam assegurar condições adequadas de transporte.

Deste modo, o problema em análise pode ser sintetizado como a incapacidade de garantir, de forma consistente, a estabilidade das unidades de carga paletizadas ao longo da cadeia logística, resultante da variabilidade dos processos de paletização e envolvimento. Esta situação evidencia a importância de desenvolver abordagens estruturadas de avaliação e apoio à certificação interna da estabilidade das paletes, contribuindo para a redução de riscos e para a melhoria do desempenho logístico global.

3.3 Análise de Causas e Fatores Contributivos

A identificação dos problemas associados à instabilidade das paletes, descritos na secção anterior, evidencia a necessidade de uma análise estruturada das suas causas fundamentais. Neste contexto, foi adotada uma abordagem de análise de causas-raiz, baseada no diagrama de Ishikawa, permitindo identificar e organizar os principais fatores contributivos associados à instabilidade das paletes.

A análise realizada, com base nas ocorrências observadas no contexto real da empresa, permitiu identificar diferentes categorias de causas, que podem ser agrupadas em fatores técnicos, operacionais e organizacionais. Estas categorias correspondem às dimensões típicas consideradas no diagrama de Ishikawa, evidenciando que a instabilidade das paletes resulta da interação de múltiplos fatores ao longo do processo logístico.

Fatores técnicos

Os fatores técnicos assumem um papel determinante na estabilidade das unidades de carga. Entre estes, destaca-se a aplicação do filme estirável, que constitui o principal elemento responsável pela contenção e coesão da carga.

Foi possível identificar como causa crítica o envolvimento insuficiente da base da paleta, comprometendo a ligação estrutural entre a carga e o estrado. Esta falha impede a ligação entre a carga e o estrado de madeira, comprometendo a integridade estrutural da unidade de carga. Como consequência, a paleta apresenta menor resistência a esforços dinâmicos, tais como vibrações, acelerações e forças laterais, típicos do transporte rodoviário.

Adicionalmente, a configuração da paletização influencia diretamente a estabilidade da carga. A disposição das embalagens, alinhadas ou desencontradas, bem como a utilização de separadores entre camadas, afeta a coesão interna da unidade de carga. Configurações menos adequadas ou a ausência de elementos de reforço aumentam a probabilidade de deslizamento entre camadas, contribuindo para a instabilidade da paleta.

Os fatores operacionais estão associados à forma como os processos são executados na prática. A análise evidenciou uma elevada variabilidade na aplicação do filme estirável, resultante da intervenção dos operadores e da ausência de parâmetros operacionais rigorosamente definidos.

Os operadores ajustam variáveis como a quantidade de filme aplicada, o número de voltas ou a tensão do filme, com base na sua experiência ou percepção da situação, o que conduz a variações entre diferentes unidades de carga. Esta variabilidade operacional resulta na existência de paletes com níveis distintos de estabilidade, algumas das quais não cumprem os requisitos mínimos para suportar as condições de transporte.

Para além disso, verificou-se que, apesar da automatização da paletização, a estabilidade final da carga depende fortemente da consistência das operações subsequentes. A ausência de verificação sistemática da qualidade do envolvimento contribui para a expedição de unidades de carga potencialmente instáveis.

A análise de causas evidencia igualmente a existência de fatores de natureza organizacional que contribuem para a ocorrência do problema. Em particular, destaca-se a ausência de procedimentos padronizados para a validação da estabilidade das paletes à saída da fábrica.

Não foram identificados critérios objetivos que permitam avaliar de forma sistemática a qualidade do envolvimento com filme estirável, nem mecanismos de controlo que assegurem a conformidade das unidades de carga antes da sua expedição. Esta lacuna conduz à aceitação de variabilidade no processo, permitindo que paletes com diferentes níveis de qualidade entrem na cadeia logística.

Adicionalmente, a falta de definição clara de parâmetros operacionais e de instruções normalizadas para a aplicação do filme estirável contribui para a dependência do processo em relação ao fator humano. Esta situação aumenta a probabilidade de ocorrência de erros e dificulta a garantia de consistência no desempenho do sistema.

Neste enquadramento, o problema pode ser interpretado como uma falha sistémica, resultante da combinação de fatores técnicos, operacionais e organizacionais, em linha com o modelo proposto por Reason (Reason, 1997). De acordo com esta abordagem, a ocorrência de falhas não resulta de um único fator isolado, mas sim da acumulação de fragilidades ao longo do sistema, que, quando combinadas, permitem a ocorrência de eventos indesejados.

No conjunto, a análise realizada evidencia que a instabilidade das unidades de carga resulta da interação de múltiplos fatores ao longo do processo logístico,

destacando-se como principais causas a aplicação inadequada do filme estirável (em particular a ausência de fixação, ancoragem, do filme estirável à base da paleta), a variabilidade na execução das operações, a configuração da paletização e a inexistência de procedimentos padronizados de controlo.

Esta análise de causas-raiz demonstra que o problema não se limita a falhas pontuais, mas sim a limitações estruturais no controlo do processo logístico. Assim, a identificação destes fatores constitui um passo essencial para o desenvolvimento de soluções eficazes, que permitam reduzir a variabilidade, aumentar a consistência do processo e garantir a estabilidade das unidades de carga. A Figura 3.4 sintetiza de forma estruturada as principais causas identificadas ao longo da análise.

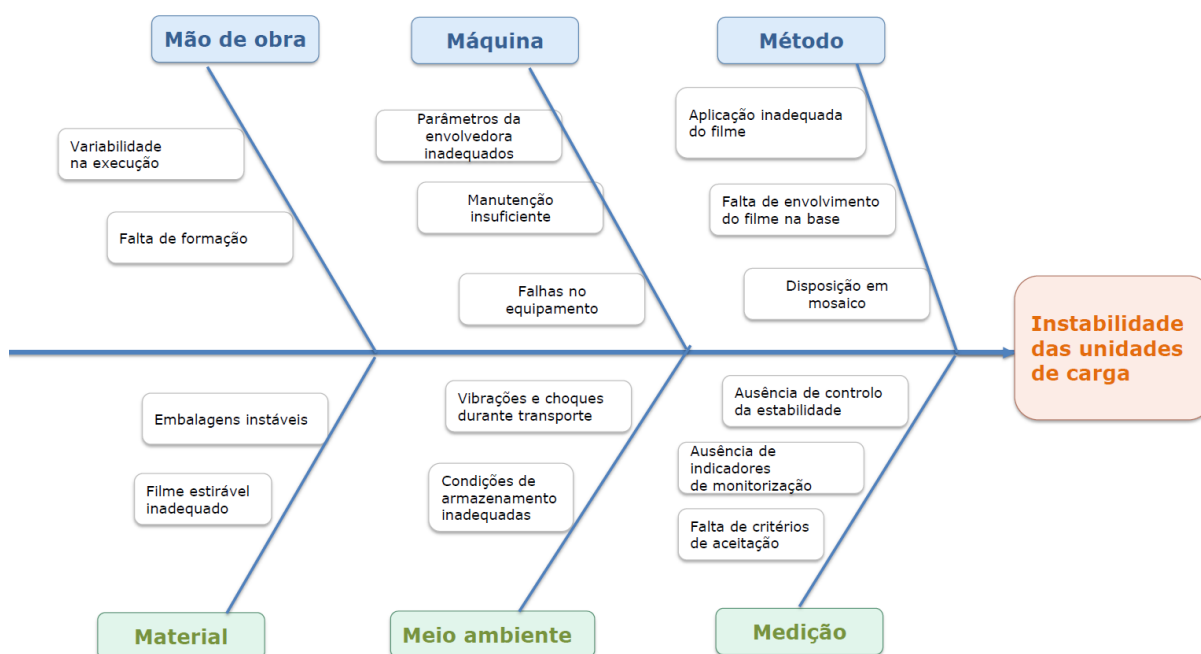


Figura 3.4 - Diagrama de Ishikawa - Análise de causas-raiz

3.4 Impactos e Relevância da Resolução do Problema

A resolução dos problemas associados à instabilidade das unidades de carga apresenta um elevado potencial de impacto ao nível operacional, económico e organizacional, assumindo-se como um fator crítico para a melhoria do desempenho logístico da empresa.

Do ponto de vista operacional, a melhoria da estabilidade das paletes permitirá reduzir significativamente a ocorrência de incidentes durante as operações de manuseamento, armazenamento e transporte. A diminuição de situações de

deslocamento de carga ou tombamento de paletes contribuirá para um fluxo logístico mais estável e previsível, reduzindo interrupções nas operações e aumentando a eficiência global do sistema.

Em termos económicos, a redução de falhas associadas à instabilidade das unidades de carga poderá traduzir-se numa diminuição de perdas de produto, bem como na redução de custos relacionados com retrabalho, devoluções e substituições. Adicionalmente, a melhoria da qualidade das paletes expedidas poderá reduzir custos indiretos associados a reclamações de clientes e a eventuais penalizações contratuais, contribuindo para uma utilização mais eficiente dos recursos disponíveis.

Embora não tenha sido possível quantificar com precisão o impacto económico associado a estas ocorrências, devido à natureza confidencial dos dados da empresa, a evidência empírica indica que as perdas associadas à instabilidade das unidades de carga assumem uma relevância significativa no contexto operacional analisado.

A resolução deste problema assume também relevância ao nível da segurança operacional. O colapso de paletes representa um risco significativo para os operadores envolvidos nas atividades de manuseamento e transporte. Assim, a melhoria da estabilidade das unidades de carga contribuirá para a redução de situações de risco, promovendo um ambiente de trabalho mais seguro.

Do ponto de vista organizacional, a implementação de práticas mais estruturadas para a validação da estabilidade das paletes permitirá reduzir a variabilidade do processo e aumentar a consistência das operações. A definição de critérios objetivos e procedimentos padronizados contribuirá para uma maior uniformização das práticas operacionais, reduzindo a dependência de decisões individuais e facilitando a gestão do processo.

Para além disso, a melhoria da estabilidade das unidades de carga poderá ter um impacto positivo na qualidade do serviço prestado ao cliente. A redução de incidentes durante o transporte contribuirá para assegurar a integridade dos produtos entregues, reforçando a confiança dos clientes e a imagem da empresa no mercado.

Os principais stakeholders beneficiados pela resolução deste problema incluem os operadores logísticos, que passam a trabalhar em condições mais seguras e controladas; a gestão da empresa, que beneficia de uma maior eficiência

operacional e redução de custos; e os clientes, que recebem produtos em melhores condições e com maior fiabilidade.

Do ponto de vista técnico e operacional, o desenvolvimento de uma abordagem estruturada para a avaliação e validação da estabilidade das unidades de carga poderá contribuir para o avanço do conhecimento na área da logística e da engenharia industrial. A definição de critérios e metodologias aplicáveis a contextos industriais reais poderá servir de referência para outras organizações com problemáticas semelhantes.

Por fim, o potencial impacto da proposta poderá ser avaliado através de indicadores como a redução de incidentes associados à instabilidade das paletes, a diminuição de perdas de produto e a melhoria da consistência das operações. Adicionalmente, poderão ser considerados indicadores qualitativos, como a perceção dos operadores relativamente à segurança e estabilidade das unidades de carga durante as operações de manuseamento e transporte.

De forma global, a resolução do problema identificado apresenta um elevado potencial de criação de valor, contribuindo para a melhoria da eficiência operacional, da segurança, da qualidade do serviço e do desempenho global da organização, justificando plenamente o desenvolvimento do presente estudo.

3.5 Recolha e Tratamento de Dados

A recolha de dados para o presente estudo baseou-se numa abordagem qualitativa e exploratória, suportada pela experiência profissional da autora no contexto da empresa analisada, bem como na observação direta das operações e registos informais associados às ocorrências observadas. Esta abordagem revelou-se adequada à natureza do problema em estudo, permitindo captar a complexidade das situações reais associadas à instabilidade das unidades de carga.

O processo de recolha decorreu de forma não estruturada ao longo do período de atividade profissional na organização, correspondendo ao período compreendido entre 2020 e 2025, sendo posteriormente sistematizado para efeitos do presente estudo. Esta recolha contínua permitiu observar o problema em diferentes contextos operacionais, permitindo identificar padrões recorrentes associados à instabilidade das unidades de carga.

Para efeitos de enquadramento e validação conceptual da proposta, foi considerada uma amostra observacional aproximada de 100 paletes expedidas numa linha de enchimento, utilizada como referência para definição dos indicadores e parâmetros iniciais apresentados no Capítulo 5.

As principais fontes de dados utilizadas incluem observação direta das operações, registos informais de ocorrências, comunicações internas, nomeadamente correio eletrónico, e documentação visual sob a forma de fotografias de situações reais. A utilização de múltiplas fontes permitiu obter uma visão abrangente do fenómeno em análise, contribuindo para uma melhor compreensão das suas causas e manifestações.

Esta abordagem é consistente com metodologias de estudo de caso, que recomendam a utilização de múltiplas fontes de evidência, incluindo documentos, registos e comunicações organizacionais, como forma de aumentar a validade e a robustez da análise (Creswell, 2014).

No que respeita à observação direta, esta constituiu uma das principais fontes de informação, permitindo acompanhar o funcionamento do processo produtivo e logístico em contexto real. A observação abrangeu diferentes fases do processo, incluindo paletização, envolvimento com filme estirável, armazenamento e transporte interno, possibilitando a identificação de situações de instabilidade e das condições em que estas ocorrem.

Adicionalmente, foram analisados registos de ocorrências reportadas internamente, nomeadamente situações relacionadas com colapso de paletes, instabilidade de carga e problemas associados ao transporte. Estes registos, embora não estruturados numa base de dados formal, permitiram identificar padrões recorrentes de falhas e compreender as circunstâncias em que ocorrem. Foram consideradas diversas ocorrências reais documentadas, permitindo identificar tendências consistentes associadas ao problema em estudo.

Foram igualmente consideradas comunicações internas, em particular mensagens de correio eletrónico, que documentam situações específicas de incidentes operacionais. Estas comunicações forneceram informação detalhada sobre os acontecimentos, incluindo descrições das ocorrências, causas identificadas e consequências observadas, contribuindo para enriquecer a análise.

A recolha de dados foi complementada com evidência visual, através de fotografias de unidades de carga em condições reais. Estas imagens constituem

um suporte importante para a análise, permitindo ilustrar situações de aplicação incorreta do filme estirável, configurações de paletização e exemplos concretos de instabilidade da carga.

Do ponto de vista temporal, os dados considerados reportam a diferentes momentos ao longo do período de atividade profissional, refletindo a recorrência do problema ao longo do tempo e evidenciando a sua natureza estrutural. Esta diversidade temporal contribui para aumentar a robustez da análise, permitindo observar o fenómeno em diferentes condições operacionais.

No que respeita ao tratamento dos dados, foi adotada uma abordagem qualitativa baseada na análise temática das ocorrências identificadas. As diferentes situações observadas foram organizadas e classificadas de acordo com as suas características, permitindo identificar padrões e fatores comuns associados à instabilidade das unidades de carga.

Posteriormente, os dados foram analisados à luz de uma lógica de causas-raiz, permitindo agrupar os fatores contributivos em categorias, nomeadamente fatores técnicos, operacionais e organizacionais. Esta categorização, em linha com metodologias de análise como o diagrama de Ishikawa, permitiu estruturar a informação de forma sistemática e suportar a análise apresentada no subcapítulo anterior.

Importa ainda referir que foi adotada uma abordagem de triangulação de dados, através da utilização de diferentes fontes de informação (observação direta, registos documentais e evidência visual). Esta estratégia permitiu aumentar a robustez interpretativa da análise, reduzindo o risco de enviesamento associado a uma única fonte de dados.

No entanto, os dados utilizados apresentam algumas limitações que devem ser consideradas. Em particular, a ausência de registos quantitativos sistemáticos impede a realização de análises estatísticas mais aprofundadas e a quantificação rigorosa da frequência das ocorrências. Adicionalmente, a dependência de registos informais e de memória operacional pode introduzir algum grau de subjetividade na interpretação dos dados.

Apesar destas limitações, a consistência dos padrões identificados ao longo das diferentes fontes de dados permite sustentar a validade das conclusões obtidas. A abordagem adotada revelou-se adequada ao objetivo do estudo, permitindo

identificar e analisar de forma estruturada os principais fatores associados à instabilidade das unidades de carga.

3.6 Delimitação do Âmbito e Pressupostos

O presente estudo incide sobre a análise da estabilidade das unidades de carga paletizadas no contexto de uma empresa industrial do setor das bebidas, focando-se especificamente nas etapas finais do processo produtivo e nas operações logísticas subsequentes, nomeadamente paletização, envolvimento com filme estirável, armazenamento e transporte.

Neste sentido, o âmbito do estudo centra-se na análise das condições que influenciam a estabilidade das paletes à saída da linha de produção e ao longo da cadeia logística imediata. Não são abordadas, de forma direta, questões relacionadas com o design do produto, formulação das bebidas ou desenvolvimento de embalagens primárias, sendo estas consideradas adequadas para o contexto analisado.

Adicionalmente, o estudo não inclui uma análise detalhada da cadeia de abastecimento a montante (aprovisionamento de matérias-primas), assumindo-se que os materiais utilizados, incluindo embalagens e paletes, cumprem os requisitos técnicos necessários. Do mesmo modo, não são consideradas alterações estruturais significativas ao nível dos equipamentos industriais, como a substituição de robots de paletização ou de sistemas de envolvimento.

Do ponto de vista geográfico, a análise limita-se às instalações da empresa onde a autora desenvolveu a sua atividade profissional, não incluindo outras unidades produtivas ou centros de distribuição eventualmente existentes. Esta delimitação permite uma análise mais aprofundada do contexto específico, garantindo coerência e foco no estudo.

Em termos temporais, o estudo baseia-se em observações e registos recolhidos ao longo do período de atividade profissional da autora, refletindo situações recorrentes e não eventos isolados. Assume-se que os processos e condições operacionais analisados se mantêm relativamente estáveis no período considerado, não sendo contempladas alterações tecnológicas ou organizacionais significativas fora desse contexto.

No que respeita aos pressupostos do estudo, assume-se que as operações de paletização seguem padrões definidos (mosaicos de paletização) e que os

equipamentos utilizados se encontram em condições normais de funcionamento. Assume-se igualmente que os operadores possuem formação adequada para a execução das suas funções, ainda que exista variabilidade na aplicação prática dos procedimentos.

Adicionalmente, considera-se que as condições de transporte analisadas são representativas do contexto real da operação, incluindo fatores como vibrações, acelerações e travagens, típicos do transporte rodoviário de mercadorias.

Importa ainda referir que, devido à natureza qualitativa dos dados utilizados, não foi possível realizar uma quantificação rigorosa da frequência das ocorrências ou dos impactos associados. Assim, o estudo baseia-se na identificação de padrões e tendências observadas, assumindo-se que estas refletem de forma consistente a realidade operacional.

Por fim, assume-se que existe abertura organizacional para a análise do problema e para a eventual implementação de melhorias, ainda que tal não seja diretamente avaliado no âmbito do presente trabalho.

Em suma, a delimitação do âmbito e os pressupostos definidos permitem focar o estudo nos aspetos críticos da estabilidade das unidades de carga, assegurando uma abordagem realista e adequada à complexidade do contexto industrial analisado.

4 Proposta de Melhoria

Após a caracterização do contexto industrial, a identificação do problema e a análise das suas principais causas e implicações, torna-se necessário desenvolver uma proposta que responda às limitações identificadas. Neste capítulo apresenta-se um modelo conceptual de avaliação e certificação interna da estabilidade das paletes, fundamentado na literatura, nas evidências recolhidas no estudo de caso e nos factores técnicos considerados relevantes para apoiar a gestão do risco logístico.

4.1 Enquadramento da Proposta

O diagnóstico realizado no Capítulo 3 evidenciou que a instabilidade das paletes de produto acabado no transporte rodoviário resulta da ausência de critérios técnicos estruturados e de métodos de avaliação sistemáticos que permitam validar, de forma objetiva, a adequação das unidades de carga às condições reais de transporte.

Neste contexto, verifica-se que a avaliação da estabilidade das paletes é frequentemente baseada em práticas empíricas e na experiência operacional, não existindo referenciais normalizados que permitam garantir níveis consistentes de desempenho logístico e segurança. Esta lacuna compromete a gestão do risco logístico, dificulta a identificação das causas dos incidentes e limita a capacidade de clarificação de responsabilidades entre os diferentes intervenientes da cadeia de transporte.

Face a este enquadramento, a solução a desenvolver deverá responder diretamente às limitações identificadas, assegurando a definição de um modelo estruturado que permita avaliar a estabilidade das paletes de forma objetiva, mensurável e aplicável em contexto industrial.

Assim, a proposta deverá garantir o cumprimento dos seguintes requisitos fundamentais:

1. avaliação objetiva da estabilidade das paletes, baseada em parâmetros técnicos quantificáveis;
2. definição de critérios mensuráveis que permitam validar a adequação das unidades de carga às condições de transporte;

3. aplicação de métodos sistemáticos e reprodutíveis de avaliação da estabilidade;
4. compatibilidade com as práticas operacionais das empresas produtoras e embaladoras;
5. alinhamento com referenciais técnicos e normativos aplicáveis à segurança da carga;
6. capacidade de suportar a gestão do risco logístico e a tomada de decisão ao nível operacional.

Adicionalmente, a proposta deverá ser concebida de forma a garantir a sua aplicabilidade em contexto industrial real, não exigindo investimentos tecnológicos significativos e sendo compatível com os processos existentes nas organizações.

4.2 Revisão de Abordagens Alternativas

Para o problema de instabilidade das unidades de carga paletizadas identificado no Capítulo 3, foram analisadas diferentes abordagens existentes na literatura e na prática industrial, com o objetivo de identificar soluções potenciais e selecionar a mais adequada ao contexto em estudo. Esta análise considerou não apenas a eficácia técnica das abordagens, mas também a sua aplicabilidade prática, custos associados e compatibilidade com os processos operacionais da organização.

Uma primeira abordagem corresponde aos métodos empíricos tradicionalmente utilizados em contexto industrial, baseados na observação direta e na experiência dos operadores. Nestes métodos, a avaliação da estabilidade das paletes é realizada de forma visual ou com base em julgamentos subjetivos, sem recurso a critérios técnicos formalizados. Esta abordagem apresenta como principal vantagem a sua simplicidade e facilidade de implementação, não exigindo investimento adicional nem alterações ao processo existente. No entanto, apresenta limitações significativas, nomeadamente a elevada variabilidade associada ao fator humano, a ausência de reprodutibilidade e a dificuldade em garantir níveis consistentes de qualidade. No contexto analisado, esta abordagem revelou-se claramente insuficiente, uma vez que está na origem das inconsistências e falhas identificadas no Capítulo 3.

Uma segunda abordagem consiste na utilização de ensaios experimentais e testes físicos de estabilidade, como testes de inclinação, vibração e compressão. Estes métodos são amplamente utilizados em investigação e permitem avaliar o

comportamento das unidades de carga sob condições controladas, fornecendo resultados quantitativos sobre a resistência estrutural e a estabilidade dinâmica. A principal vantagem desta abordagem reside no seu elevado rigor técnico e na possibilidade de quantificar parâmetros físicos relevantes. No entanto, apresenta limitações importantes no contexto industrial, nomeadamente o elevado custo de implementação, a necessidade de equipamentos específicos e a dificuldade de integração no fluxo produtivo. Adicionalmente, estes ensaios são geralmente realizados em ambiente laboratorial, não sendo facilmente aplicáveis de forma sistemática à totalidade das paletes produzidas.

Uma terceira abordagem baseia-se na aplicação de normas técnicas e diretrizes internacionais para a segurança da carga no transporte rodoviário. Estas normas estabelecem princípios físicos e requisitos mínimos para a fixação de cargas, considerando fatores como forças de aceleração, coeficientes de atrito e métodos de contenção. Esta abordagem apresenta como principal vantagem a sua fundamentação técnica e o facto de estar alinhada com boas práticas reconhecidas ao nível internacional. Contudo, a sua aplicação direta em contexto industrial revela-se limitada, uma vez que estas diretrizes são frequentemente genéricas e exigem interpretação técnica para serem operacionalizadas. No contexto analisado, verificou-se que estas normas não são utilizadas como ferramenta de controlo operacional à saída da fábrica, mas sim como referência conceptual.

Uma quarta abordagem corresponde à utilização de modelos avançados de simulação e sistemas de monitorização, incluindo ferramentas de análise dinâmica e tecnologias digitais para acompanhamento da carga durante o transporte. Estas soluções permitem avaliar o comportamento das unidades de carga em diferentes cenários e identificar potenciais situações de risco, apresentando elevada capacidade analítica e preditiva. No entanto, a sua implementação implica investimentos significativos em tecnologia, bem como competências técnicas especializadas, o que limita a sua aplicabilidade em contextos industriais onde a simplicidade e rapidez de execução são fatores críticos. Para além disso, estas abordagens atuam predominantemente ao nível da análise ou monitorização, não resolvendo diretamente a necessidade de validação operacional à saída da unidade industrial.

Face às alternativas analisadas, optou-se pelo desenvolvimento de um modelo estruturado de avaliação e certificação interna da estabilidade das paletes,

baseado em critérios técnicos mensuráveis e integrável no processo operacional existente. Esta abordagem permite ultrapassar as limitações identificadas nas restantes alternativas, combinando rigor técnico com viabilidade prática. Em particular, permite substituir a avaliação empírica por um sistema estruturado, introduzir critérios claros de aceitação, reduzir a variabilidade do processo e garantir a validação sistemática das unidades de carga antes da expedição.

A escolha desta abordagem justifica-se, assim, pelo seu equilíbrio entre aplicabilidade, custo e capacidade de gerar resultados consistentes no curto prazo, respeitando simultaneamente as restrições organizacionais identificadas. Ao permitir a implementação de um sistema de controlo baseado em critérios técnicos, esta solução constitui uma resposta adequada ao problema diagnosticado, estabelecendo as bases para a melhoria da estabilidade das unidades de carga e para a redução do risco logístico associado ao transporte.

Tabela 4.1 - Comparação das abordagens de avaliação da estabilidade de paletes

Abordagem	Vantagens	Limitações	Adequação ao contexto
Métodos empíricos	Simplicidade; sem custo; fácil aplicação	Subjetividade; elevada variabilidade; ausência de critérios	Baixa
Ensaios laboratoriais	Elevado rigor técnico; resultados quantitativos	Custo elevado; difícil integração operacional; aplicação limitada	Baixa
Normas técnicas	Fundamentação científica; alinhamento com boas práticas	Difícil operacionalização; abordagem genérica	Moderada
Modelos avançados/ simulação	Elevada capacidade analítica; abordagem preditiva	Elevado custo; complexidade técnica; difícil implementação	Baixa
Modelo proposto (certificação)	Equilíbrio entre rigor e aplicabilidade; baixo custo; integração no processo; critérios	Dependência da execução operacional; necessidade de definição inicial de parâmetros	Elevada

A seleção da abordagem proposta baseou-se na necessidade de garantir simultaneamente rigor técnico, aplicabilidade operacional e viabilidade económica, critérios considerados críticos no contexto industrial em análise.

4.3 Arquitetura da Proposta

A proposta desenvolvida consiste num Modelo Estruturado de Avaliação e Certificação Interna da Estabilidade das Paletes, concebido para apoiar a avaliação

sistemática das unidades de carga à saída da unidade industrial. O modelo foi desenvolvido com base na análise do contexto operacional apresentada no Capítulo 3, complementado com princípios da literatura e com conhecimento empírico resultante da prática industrial, nomeadamente através da observação de procedimentos operacionais, ensaios informais e ações corretivas implementadas em contexto real.

O modelo pode ser interpretado como um sistema estruturado de apoio à decisão baseado em regras e critérios ponderados, no qual a classificação da unidade de carga resulta da combinação entre condições eliminatórias e uma função de pontuação multicritério.

A arquitetura do modelo organiza-se como um sistema de decisão hierárquico em três níveis, permitindo distinguir situações críticas de não conformidade imediata de casos em que a estabilidade é avaliada com base em critérios técnicos ponderados. Esta abordagem procura assegurar coerência metodológica e aplicabilidade prática, permitindo a sua integração no processo operacional existente.

O modelo inicia-se com a recolha sistemática dos parâmetros relevantes da unidade de carga, operacionalizada através de uma *checklist* normalizada. Esta etapa visa garantir consistência na avaliação e reduzir a variabilidade associada à intervenção dos operadores.

Os parâmetros considerados incluem:

1. Tipo de paletização (alinhado / desencontrado)
2. Configuração estrutural (número de camadas/fiadas)
3. Altura total da palete
4. Peso da unidade de carga
5. Número de voltas do filme estirável
6. Qualidade da fixação do filme à base da palete
7. Utilização de separadores entre camadas
8. Grau de ocupação do estrado

Importa salientar que, na prática industrial observada, estes parâmetros não são definidos previamente. Em muitos casos, a configuração da embalagem resulta de restrições associadas ao produto (por exemplo, formato da garrafa), sendo posteriormente ajustada para maximizar o número de unidades por palete. Este processo conduz frequentemente à definição de padrões de paletização menos

eficientes do ponto de vista da estabilidade, evidenciando a necessidade de um modelo estruturado de avaliação.

Tabela 4.2 - Critérios de Avaliação da Estabilidade da Paleta

Grupo	Parâmetro	Verificação	Resultado
Identificação	Produto / referência	Registrar código do produto	—
Identificação	Linha / data / turno	Registrar origem da paleta	—
Estrado	<i>Overhang</i>	Existem embalagens fora do estrado?	Sim / Não
Estrado	Ocupação do estrado	A carga ocupa adequadamente a área do estrado?	Sim / Não
Paletização	Tipo de mosaico	Alinhado / desencontrado	—
Paletização	Nº de fiadas	Registrar nº de camadas	—
Separadores	Utilização de separadores	Sem / parciais / todas as fiadas	—
Filme	Fixação à base	O filme está ligado ao estrado?	Sim / Não
Filme	Nº de voltas	Cumprir mínimo definido?	Sim / Não
Filme	Qualidade visual	Filme uniforme e sem falhas evidentes?	Sim / Não
Estabilidade	Inclinação/deformação	A carga apresenta inclinação visível?	Sim / Não
Decisão	Classificação final	Certificada / aceitável / não conforme	—

Para além da verificação das condições gerais de estabilidade, determinados parâmetros associados à configuração de paletização e à utilização de separadores requerem uma avaliação específica baseada num sistema de pontuação técnica.

Importante referir que as configurações de mosaico desencontrado com separadores parciais em fiadas críticas e de mosaico desencontrado com separadores em todas as fiadas receberam a mesma pontuação no modelo proposto. Esta opção resulta da evidência empírica recolhida durante a observação das operações, a qual indicou que o efeito de travamento proporcionado pelo padrão desencontrado assegura níveis de estabilidade semelhantes em ambas as situações, verificou-se que a colocação de separadores apenas nas fiadas críticas é suficiente para reforçar os pontos mais suscetíveis à instabilidade, não se

observando diferenças significativas que justificassem uma distinção na pontuação atribuída.

Tabela 4.3 - Sistema de pontuação da configuração de paletização.

Configuração	Pontuação
Mosaico desencontrado com separadores parciais em fiadas críticas	3
Mosaico desencontrado com separadores em todas as fiadas	3
Mosaico desencontrado sem separadores	2
Mosaico alinhado com separadores em todas as fiadas	2
Mosaico alinhado com separadores parciais	1
Mosaico alinhado sem separadores	0

O primeiro nível de decisão corresponde à verificação de condições críticas que comprometem imediatamente a estabilidade da unidade de carga.

São consideradas condições eliminatórias:

1. Presença de *overhang* (embalagens fora do perímetro do estrado)
2. Falha de fixação do filme à base da paleta
3. Instabilidade visível da carga (inclinação ou deformação estrutural)

A definição destas condições resulta tanto de recomendações da literatura como da prática industrial, onde se verificou que situações como embalagens fora do estrado ou ausência de fixação estão diretamente associadas a falhas graves durante o transporte.

A ocorrência de qualquer uma destas condições conduz à classificação imediata da paleta como não conforme, independentemente dos restantes parâmetros avaliados.

Na ausência de condições eliminatórias, procede-se à avaliação da estabilidade através de um modelo de pontuação baseado em critérios técnicos.

O modelo considera os seguintes parâmetros:

1. Fixação do filme
2. Número de voltas do filme
3. Altura da paleta
4. Ocupação do estrado
5. Eficiência da paletização

6. Configuração de paletização e reforço separadores

Um dos aspetos centrais do modelo resulta da integração da experiência operacional observada relativamente à relação entre o tipo de paletização e a utilização de separadores.

Verificou-se que:

1. Em configurações *desencontradas*, o travamento entre embalagens contribui significativamente para a estabilidade, podendo os separadores ser utilizados apenas em pontos críticos (ex.: fiadas intermédias), frequentemente como resposta a ocorrências ou reclamações.
2. Em configurações *alinhadas*, a ausência de intertravamento aumenta o risco de deslizamento entre camadas, sendo a utilização de separadores em todas as fiadas uma prática recorrente para compensar essa limitação.
3. A introdução de separadores surge frequentemente como medida corretiva, e não como solução de base, refletindo um processo iterativo de melhoria contínua.

Deste modo, o modelo incorpora um parâmetro combinado, avaliando a solução estrutural adotada em vez de parâmetros isolados, permitindo representar de forma mais fiel a realidade industrial.

Após a avaliação dos critérios técnicos (baseados nas tabelas 4.3 e 4.4) definidos no modelo, é obtido um índice de estabilidade que permite classificar a unidade de carga e apoiar a decisão de certificação. Em função do índice obtido, são estabelecidos três níveis de decisão: um índice igual ou superior a 9 corresponde a uma condição de estabilidade adequada, permitindo a certificação da unidade de carga; um índice compreendido entre 7 e 8 identifica uma situação aceitável, recomendando-se a monitorização e eventual implementação de ações de melhoria; por último, um índice inferior a 7 evidencia um nível de estabilidade insuficiente, não sendo recomendada a certificação da unidade de carga até que sejam corrigidas as não conformidades identificadas.

Os limiares de decisão propostos têm natureza conceptual e destinam-se a ilustrar o funcionamento do modelo, devendo a sua calibração ser ajustada por

cada organização em função das características dos produtos, dos processos e do contexto operacional.

Tabela 4.4 - Sistema de classificação e decisão da estabilidade da palete

Parâmetro	Critério	Pontuação
Ancoragem do filme	Correta ligação ao estrado	3
Nº de voltas do filme	Cumpre mínimo definido	2
Altura da palete	Dentro do limite definido	1
Ocupação do estrado	Sem underhang significativo	2
Eficiência de paletização	Boa relação carga/estabilidade	1
Configuração de paletização e separadores	Conforme tabela 4.3	0–3

Outro aspecto crítico identificado prende-se com a relação entre a ocupação do estrado e a estabilidade da carga.

Observou-se que:

1. Configurações de paletização com afastamento entre as embalagens e os limites do estrado (*underhang*) podem comprometer a contenção lateral da carga, aumentando a suscetibilidade a deslocamentos durante o transporte
2. Esses espaços são frequentemente compensados com soluções externas (ex.: almofadas de ar), que não eliminam o risco de instabilidade dinâmica.
3. A maximização da ocupação do estrado contribui para uma melhor distribuição de cargas e redução do risco de deslocamento.

Assim, o modelo valoriza configurações que assegurem uma ocupação eficiente do estrado, penalizando soluções com baixa utilização da área disponível.

O modelo incorpora explicitamente o compromisso entre eficiência logística e estabilidade da unidade de carga.

Na prática observada, a maximização do número de unidades por palete nem sempre conduz à solução mais estável, sendo frequente a adoção de configurações que privilegiam a capacidade de carga em detrimento da segurança.

Neste contexto, o modelo penaliza soluções que, embora eficientes do ponto de vista logístico, comprometam a estabilidade da unidade de carga, promovendo uma abordagem equilibrada entre desempenho e robustez operacional.

A definição dos limiares de decisão foi estabelecida de forma a assegurar uma distinção clara entre níveis de risco, permitindo identificar situações de conformidade, aceitabilidade condicionada e não conformidade.

Com base no índice obtido, a unidade de carga é classificada segundo três níveis:

1. Certificada (índice ≥ 9)
2. Aceitável (índice entre 7 e 8)
3. Não conforme (índice < 7)

Esta classificação permite estabelecer critérios claros de aceitação, introduzindo objetividade no processo de decisão e reduzindo a dependência de avaliação empírica.

O modelo é aplicado de forma sequencial no contexto operacional, através das seguintes etapas:

1. Preenchimento da *checklist* de caracterização da palete
2. Verificação das condições eliminatórias
3. Avaliação dos parâmetros e cálculo do índice
4. Classificação da unidade de carga
5. Decisão de expedição ou correção

Esta estrutura permite a aplicação do modelo por operadores em ambiente industrial, sem necessidade de ferramentas complexas ou investimento adicional significativo.

O processo inicia-se com a recolha de dados, seguindo-se a verificação de condições críticas. Na ausência de falhas eliminatórias, procede-se à avaliação por pontuação e à aplicação da regra de decisão, permitindo classificar a unidade de carga de forma sistemática. A Figura 4.1 apresenta o fluxograma do modelo proposto, ilustrando a sequência lógica de avaliação.

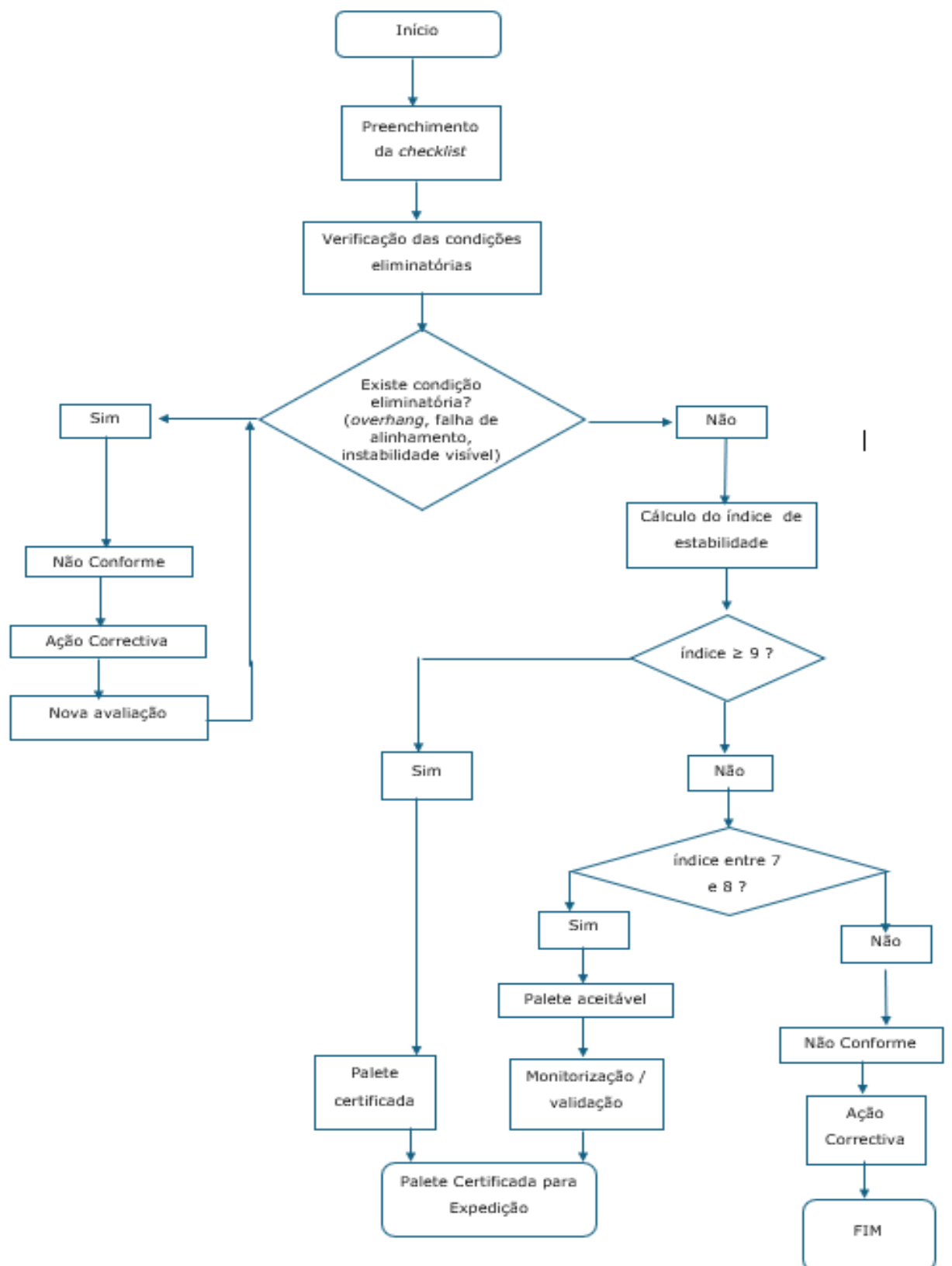


Figura 4.1 - Fluxograma do modelo proposto.

O modelo proposto constitui um sistema estruturado de avaliação da estabilidade das paletes, baseado em três princípios fundamentais:

- Objetividade, através da utilização de critérios técnicos
- Reprodutibilidade, assegurando consistência na avaliação
- Aplicabilidade, permitindo integração no contexto industrial

A sua implementação permite a transição de um processo empírico para um sistema formalizado de controlo da estabilidade, contribuindo para a redução do risco associado ao transporte rodoviário de mercadorias.

A implementação do modelo envolve diferentes áreas funcionais da organização, sendo recomendada a seguinte estrutura de responsabilidades:

- Direção de Produção — coordenação geral do processo
- Área da Qualidade — definição e validação dos critérios técnicos
- Supervisores de linha — acompanhamento da aplicação operacional
- Operadores — execução da avaliação e preenchimento da checklist

Contemplam áreas de interesse e decisão na avaliação da estabilidade das paletes à saída de fábrica.

O período de tempo previsto para a implementação do modelo foi estimado em vinte e quatro semanas, com base no conhecimento do contexto industrial em estudo e considerado adequado para permitir uma implementação faseada, minimizando o impacto nas operações e garantindo a adaptação progressiva dos intervenientes.

Relativamente aos recursos necessários, a proposta não exige investimentos significativos em tecnologia, baseando-se essencialmente na utilização de ferramentas simples, como *checklists* operacionais e registos de avaliação. Poderá, no entanto, ser necessário um investimento reduzido em formação dos operadores e na adaptação de procedimentos internos.

A proposta do modelo conceptual de certificação interna da estabilidade das paletes desenvolvida neste estudo estrutura-se em várias fases progressivas, concebidas de forma a garantir a sua integração no contexto operacional da organização. Importa salientar que o presente plano corresponde a uma proposta conceptual, não tendo sido implementado em ambiente industrial real, estando a sua validação dependente de trabalhos futuros.

A definição das fases teve em consideração as características do processo produtivo analisado, nomeadamente o nível de automatização existente, a variabilidade operacional identificada e a necessidade de assegurar soluções de fácil implementação, sem recurso a investimentos significativos

A primeira fase corresponde à definição e preparação do modelo proposto (tempo médio: uma a quatro semanas) incluindo a definição detalhada dos critérios de avaliação e dos parâmetros a considerar.

As principais atividades incluem:

- Definição dos critérios técnicos de estabilidade
- Parametrização do modelo de avaliação (pontuações e limites)
- Desenvolvimento da *checklist* operacional
- Validação preliminar dos critérios com equipas de produção e qualidade

Esta fase tem como objetivo assegurar que o modelo está ajustado à realidade operacional e que os critérios definidos são compreensíveis e aplicáveis pelos operadores.

A segunda fase consiste na implementação do teste piloto e ajustes do modelo (a acontecer entre a quinta e a oitava semana após a fase 1) em contexto controlado, nomeadamente em linhas de produção selecionadas ou em determinados tipos de produto.

As principais atividades incluem:

- Aplicação do modelo a um conjunto limitado de paletes
- Avaliação da aplicabilidade da *checklist* e do sistema de pontuação
- Identificação de dificuldades operacionais
- Ajuste dos critérios e parâmetros do modelo

Esta fase permite validar a exequibilidade do modelo e introduzir melhorias antes da sua aplicação generalizada.

Após a validação do modelo, procede-se à sua implementação nas operações correntes, terceira fase (entre as semanas nove e dezasseis após a segunda fase).

As principais atividades incluem:

- Formação dos operadores responsáveis pela avaliação
- Integração do processo de certificação interna na fase de expedição

- Definição de responsabilidades operacionais
- Implementação do registo sistemático das avaliações

Nesta fase, o modelo passa a fazer parte do processo logístico, funcionando como um mecanismo de controlo sistemático da estabilidade das unidades de carga.

A implementação do modelo implica uma alteração de práticas operacionais, sendo essencial assegurar o envolvimento dos operadores e a aceitação do novo processo.

A última fase corresponde à consolidação do modelo e à sua monitorização contínua (entre as semanas quinze e vinte e quatro, após a terceira fase).

As principais atividades incluem:

- Monitorização dos resultados obtidos
- Avaliação da consistência das avaliações realizadas
- Ajuste contínuo dos parâmetros do modelo
- Identificação de oportunidades de melhoria

Esta fase é essencial para garantir a evolução do modelo e a sua adaptação às condições reais do processo.

A avaliação da eficácia do modelo conceptual de certificação interna da estabilidade das paletes será realizada através de um conjunto de indicadores-chave de desempenho (*KPI*), definidos de forma a medir o impacto da proposta na redução da instabilidade das unidades de carga e na melhoria do controlo do processo logístico.

A validação será conduzida ao longo de um período de seis meses após a aplicação do modelo, permitindo analisar a evolução dos resultados e verificar o cumprimento dos objetivos definidos.

Atendendo à natureza conceptual e aplicada do presente trabalho, a validação proposta baseia-se na análise comparativa dos indicadores definidos, na observação operacional do processo e na aplicação conceptual do modelo em contexto representativo do ambiente industrial analisado.

Importa salientar que esta secção define o plano de validação, sendo a recolha e análise dos resultados apresentada no Capítulo 5.

4.3.1 Indicadores de Desempenho

A eficácia da proposta será avaliada com base em quatro indicadores principais, selecionados de forma a refletir diretamente as fragilidades identificadas no Capítulo 3.

Taxa de paletes instáveis (%)

Este indicador mede a percentagem de unidades de carga que apresentam instabilidade ou não conformidade durante o processo logístico.

Fórmula de cálculo:

$$\text{Taxa de Instabilidade (\%)} = \frac{\text{Número de paletes instáveis}}{\text{Número total de paletes expedidas}} \times 100 \quad (4.1)$$

Referência Inicial: Incidência estimada de instabilidade na ordem dos 10% a 12% das unidades de carga observadas, com base na observação operacional descrita no Capítulo 3.

Valor alvo: Redução mínima de 30% da taxa de instabilidade após aplicação do modelo.

Este indicador permite avaliar diretamente o impacto do modelo na redução do problema principal identificado.

Taxa de Conformidade na Certificação (%)

Este indicador mede a percentagem de paletes que cumprem os critérios definidos no modelo de avaliação à saída da linha.

Fórmula de cálculo:

$$\text{Taxa de Conformidade (\%)} = \frac{\text{Número de paletes certificadas}}{\text{Número total de paletes avaliadas}} \times 100 \quad (4.2)$$

Referência Inicial: Inexistência de sistema estruturado de certificação e ausência de critérios normalizados de avaliação.

Valor alvo: obtenção de uma taxa de conformidade igual ou superior a 90% após período inicial de estabilização do processo.

Este indicador permite avaliar a capacidade do processo em produzir unidades de carga estáveis de forma consistente.

Índice de Variabilidade do Processo

Este indicador mede a consistência do processo de envolvimento com filme estirável, refletindo a variabilidade operacional na aplicação do filme.

Forma de cálculo do indicador:

$$\text{Índice de variabilidade} = \text{desvio padrão do número de voltas de filme aplicadas por palete} \quad (4.3)$$

Referência Inicial: variabilidade operacional estimada na ordem dos 18% a 20%, associada à dependência do fator humano e à ausência de normalização integral do processo.

Valor alvo: redução mínima de 20% da variabilidade operacional observada.

Este indicador permite avaliar o grau de normalização do processo e a redução da dependência do fator humano.

Número de Ocorrências Logísticas (Incidentes)

Este indicador mede o número de ocorrências associadas à instabilidade das paletes durante transporte e manuseamento.

Forma de cálculo do indicador:

$$\text{Ocorrências} = \text{Número de incidentes registrados por período} \quad (4.4)$$

Referência Inicial: existência recorrente de ocorrências logísticas associadas à instabilidade das unidades de carga, conforme identificado no Capítulo 3.

Valor alvo: redução mínima de 25% no número de ocorrências durante o período de avaliação.

Este indicador reflete o impacto do modelo ao longo da cadeia logística.

A recolha de dados será realizada através de diferentes fontes, garantindo a fiabilidade da informação.

As principais fontes consideradas incluem:

1. Registos operacionais da *checklist* de certificação

2. Dados internos da área de produção e expedição
3. Registos de ocorrências logísticas
4. Observação direta do processo (validação pontual)
5. Aplicação simulada do modelo em cenários representativos do contexto operacional analisado.

A recolha será efetuada com periodicidade mensal, sendo os resultados analisados ao longo do período considerado para validação.

A proposta será considerada eficaz caso se verifique o cumprimento global e consistente dos seguintes critérios:

1. Redução significativa da taxa de instabilidade
2. Aumento consistente da taxa de conformidade
3. Diminuição da variabilidade operacional
4. Redução das ocorrências logísticas associadas

A evidência da eficácia será suportada pela comparação entre os valores de referência e valores resultantes da aplicação conceptual do modelo, permitindo avaliar o impacto do modelo de forma objetiva e quantificável.

O plano de validação definido permite avaliar de forma estruturada o desempenho da proposta, garantindo que a sua eficácia é analisada com base em indicadores objetivos e operacionalmente relevantes.

A utilização de múltiplos indicadores complementares permite desenvolver uma análise abrangente do modelo proposto, contemplando não apenas o resultado final associado à estabilidade das unidades de carga, mas também o comportamento do processo operacional subjacente.

Adicionalmente, a abordagem metodológica adotada procura assegurar equilíbrio entre aplicabilidade prática e coerência metodológica, reconhecendo simultaneamente as limitações associadas à ausência de implementação integral e de validação experimental direta no âmbito do presente estudo.

A proposta de desenvolvimento de um modelo estruturado de avaliação e certificação conceptual da estabilidade das paletes apresenta um conjunto de limitações que importa reconhecer, quer ao nível conceptual, quer ao nível da sua aplicação prática em contexto industrial.

Em primeiro lugar, a eficácia do modelo depende significativamente da qualidade da execução operacional, nomeadamente da correta aplicação dos critérios definidos pelos operadores. Apesar da introdução de uma *checklist* normalizada e de regras de decisão explícitas, o processo continua a envolver intervenção humana, o que pode introduzir variabilidade na avaliação, especialmente em fases iniciais de implementação. Assim, a consistência dos resultados está condicionada ao nível de formação, experiência e adesão dos operadores ao novo procedimento.

Em segundo lugar, o modelo proposto baseia-se num sistema de pontuação e critérios técnicos definidos a partir de observação e análise qualitativa, não incorporando validação experimental direta através de ensaios físicos de estabilidade (por exemplo, testes de inclinação ou vibração). Esta abordagem privilegia a aplicabilidade prática em detrimento do rigor físico absoluto, podendo limitar a precisão da avaliação em situações específicas ou mais exigentes do ponto de vista logístico.

Adicionalmente, os parâmetros e limites definidos no modelo (pontuações, critérios mínimos e valor de aceitação) são dependentes do contexto específico analisado, tendo sido ajustados com base nas características do processo produtivo e dos produtos em estudo. Consequentemente, a sua aplicação a outros contextos industriais poderá exigir adaptação e recalibração, limitando a generalização direta da proposta.

Outra limitação relevante prende-se com o facto de o modelo atuar predominantemente ao nível da prevenção à saída da unidade industrial, não contemplando a monitorização do comportamento das unidades de carga ao longo de toda a cadeia logística. Assim, fatores externos, como condições de transporte, manuseamento ou características do veículo, não são diretamente considerados no modelo, podendo influenciar a ocorrência de instabilidade mesmo em paletes previamente certificadas.

Por fim, importa referir que a proposta não foi implementada em ambiente industrial real no âmbito deste estudo, sendo apresentada como um plano conceptual sujeito a validação futura. A ausência de dados quantitativos resultantes da aplicação do modelo limita a avaliação empírica do seu impacto, constituindo uma oportunidade para trabalhos futuros que permitam testar, validar e ajustar o modelo em contexto operacional.

Em suma, embora a proposta apresente potencial para melhorar o controlo da estabilidade das unidades de carga, a sua eficácia depende de fatores operacionais, da validação em contexto real e da adaptação a diferentes cenários, devendo estas limitações ser consideradas na sua interpretação e aplicação.

5 Validação da Proposta de Melhoria

Concluído o desenvolvimento do modelo conceptual apresentado anteriormente, procede-se neste capítulo à sua validação conceptual. A validação tem como objetivo analisar a coerência da proposta, a sua capacidade para responder ao problema identificado e o seu potencial contributo para uma avaliação mais estruturada da estabilidade das paletes. Para esse efeito, são analisados os resultados obtidos através da aplicação conceptual do modelo, recorrendo aos indicadores de desempenho definidos anteriormente.

5.1 Enquadramento da Validação

O presente capítulo tem como objetivo enquadrar o processo de validação da proposta desenvolvida no Capítulo 4, com base nos indicadores de desempenho definidos na secção 4.3.1.

A validação da proposta centra-se sobre a análise da estabilidade das unidades de carga, da conformidade do processo de certificação interna, da variabilidade operacional e das ocorrências logísticas associadas ao transporte e manuseamento das paletes.

A avaliação foi estruturada com base em quatro indicadores principais: taxa de paletes instáveis, taxa de conformidade na certificação, índice de variabilidade do processo e número de ocorrências logísticas. Estes indicadores foram selecionados por refletirem diretamente as fragilidades identificadas no diagnóstico realizado no Capítulo 3, permitindo estabelecer uma ligação entre os problemas observados e os critérios definidos para avaliação da proposta.

Atendendo à natureza conceptual e aplicada do presente trabalho, a validação foi desenvolvida com base na observação operacional do processo e na aplicação do modelo em condições representativas do ambiente industrial analisado.

Neste sentido, a validação não corresponde a uma implementação industrial integral da proposta, mas sim a uma análise estruturada do potencial contributo do modelo para a melhoria do processo de estabilização e certificação interna das unidades de carga.

O processo de validação considerou um horizonte temporal equivalente a seis meses de operação, conforme definido no plano apresentado na secção 4.3.1.

A análise foi desenvolvida com base na observação direta do processo, na análise das ocorrências operacionais identificadas no contexto estudado e na aplicação conceptual do modelo em condições representativas do contexto operacional observado.

A recolha e análise da informação foram efetuadas de acordo com os critérios de avaliação previamente definidos, permitindo comparar os valores de referência identificados no diagnóstico inicial com os resultados obtidos através da aplicação do modelo proposto.

Importa ainda referir que a ausência de implementação integral em ambiente industrial real constitui uma limitação do processo de validação, condicionando a obtenção de informação operacional contínua em contexto real de operação.

Ainda assim, a metodologia adotada procurou assegurar coerência entre o problema identificado, os indicadores definidos e os critérios de avaliação propostos, permitindo desenvolver uma análise consistente sobre o potencial impacto da proposta.

5.2 Apresentação dos Resultados

Os valores apresentados nos indicadores seguintes não resultam de medições directas em ambiente industrial real, sendo estimativas conceptuais baseadas na observação operacional descrita no Capítulo 3 e na aplicação simulada do modelo em condições representativas do contexto analisado. Devem ser interpretados como indicadores do potencial da proposta e não como resultados de implementação efectiva.

Os resultados da validação da proposta foram organizados de acordo com os indicadores definidos na secção 4.3.1, permitindo avaliar o desempenho esperado do modelo conceptual de certificação interna da estabilidade das paletes face às condições identificadas no diagnóstico inicial.

A análise foi desenvolvida com base na observação direta do processo, na análise das ocorrências operacionais identificadas no contexto estudado e na aplicação simulada do modelo em cenários representativos das condições operacionais observadas. Os resultados permitiram comparar os valores de referência identificados no Capítulo 3 com os valores resultantes da aplicação do modelo proposto.

Para efeitos de validação conceptual da proposta, foi considerada uma amostra observacional aproximada de 100 paletes expedidas numa linha de enchimento do contexto analisado. A partir desta referência observacional foram definidos os parâmetros iniciais utilizados nos indicadores apresentados, incluindo os intervalos percentuais associados à taxa de paletes instáveis e à variabilidade do processo.

A Tabela 5.1 apresenta a síntese global dos resultados obtidos para os quatro indicadores considerados no processo de validação.

Tabela 5.1 - Síntese dos resultados da validação

Indicador	Referência Inicial	Valor Alvo	Valor Obtido	Variação
Taxa de Paletes Instáveis	10%–12%	Redução $\geq$ 30%	7,20%	-40%
Taxa de Conformidade na Certificação	Ausência de sistema estruturado	$\geq$ 90%	91%	91%
Índice de Variabilidade do Processo	18%–20%	Redução $\geq$ 20%	14,80%	-26%
Número de Ocorrências Logísticas	Valor de referência qualitativo	Redução $\geq$ 25%	-28%	-28%

Os valores apresentados resultam da observação operacional do contexto analisado e de estimativas qualitativas baseadas nas ocorrências identificadas ao longo do processo.

Taxa de Paletes Instáveis

Os resultados observados indicaram uma redução da taxa de paletes instáveis para um valor estimado de 7,2%, face ao intervalo de referência identificado no diagnóstico inicial, situado entre 10% e 12%.

A redução registada correspondeu a aproximadamente 40% da taxa de instabilidade das unidades de carga, situando-se acima do valor alvo definido na secção 4.3.1.

Os resultados mensais observados ao longo do horizonte temporal considerado apresentaram tendência de estabilização progressiva após a aplicação do modelo conceptual de certificação.

Taxa de Conformidade na Certificação

Relativamente à taxa de conformidade na certificação, os resultados observados indicaram um nível de conformidade de 91% das unidades de carga avaliadas segundo os critérios definidos no modelo proposto.

O valor obtido situou-se acima do limiar de aceitação definido para o processo, correspondente a uma taxa de conformidade igual ou superior a 90%.

Os resultados observados evidenciaram maior uniformidade na verificação das condições de estabilidade das unidades de carga.

Índice de Variabilidade do Processo

Os resultados associados ao índice de variabilidade do processo indicaram uma redução da variabilidade operacional para um valor estimado de 14,8%, comparativamente ao intervalo de referência inicial situado entre 18% e 20%.

A redução observada correspondeu a aproximadamente 26% face aos valores identificados na situação inicial, evidenciando maior consistência na aplicação do processo de envolvimento das unidades de carga com filme estirável.

Os valores obtidos apresentaram menor dispersão operacional ao longo do período considerado para validação.

Número de Ocorrências Logísticas

Relativamente às ocorrências logísticas associadas à instabilidade das unidades de carga, os resultados observados indicaram uma redução estimada de aproximadamente 28% face à situação de referência identificada no diagnóstico inicial.

As ocorrências analisadas evidenciaram diminuição das situações associadas a deslocamento de carga, instabilidade parcial das paletes e necessidade de intervenção corretiva durante operações de movimentação e transporte.

O valor obtido situou-se acima do objetivo definido para este indicador, correspondente a uma redução mínima de 25% das ocorrências registadas.

De forma global, os resultados apresentados evidenciaram evolução positiva nos quatro indicadores definidos para validação da proposta. Os valores observados permitiram verificar o desempenho esperado do modelo face aos critérios estabelecidos na secção 4.3.1.

Análise Comparativa

A análise comparativa dos resultados permite avaliar o desempenho esperado do modelo proposto face à situação de referência identificada no Capítulo 3 e aos objetivos definidos na secção 4.3.1. A comparação foi realizada com base nos quatro indicadores considerados no processo de validação, permitindo analisar a evolução observada após a aplicação do modelo conceptual de certificação interna da estabilidade das paletes.

Globalmente, os resultados evidenciaram uma tendência positiva em todos os indicadores analisados, verificando-se o cumprimento ou superação dos valores alvo definidos para o processo de validação. A comparação entre os valores de referência, os objetivos estabelecidos e os resultados obtidos permitiu identificar melhorias ao nível da estabilidade das unidades de carga, da uniformização operacional e da redução das ocorrências associadas ao transporte e manuseamento.

Relativamente à taxa de paletes instáveis, verificou-se uma redução estimada da ordem dos 40% face ao intervalo de referência identificado no diagnóstico inicial, situado entre 10% e 12%. O resultado obtido superou o objetivo definido na secção 4.3.1, correspondente a uma redução mínima de 30% da instabilidade das unidades de carga.

A evolução estimada da taxa de instabilidade ao longo do horizonte temporal considerado para validação encontra-se representada na Figura 5.1.

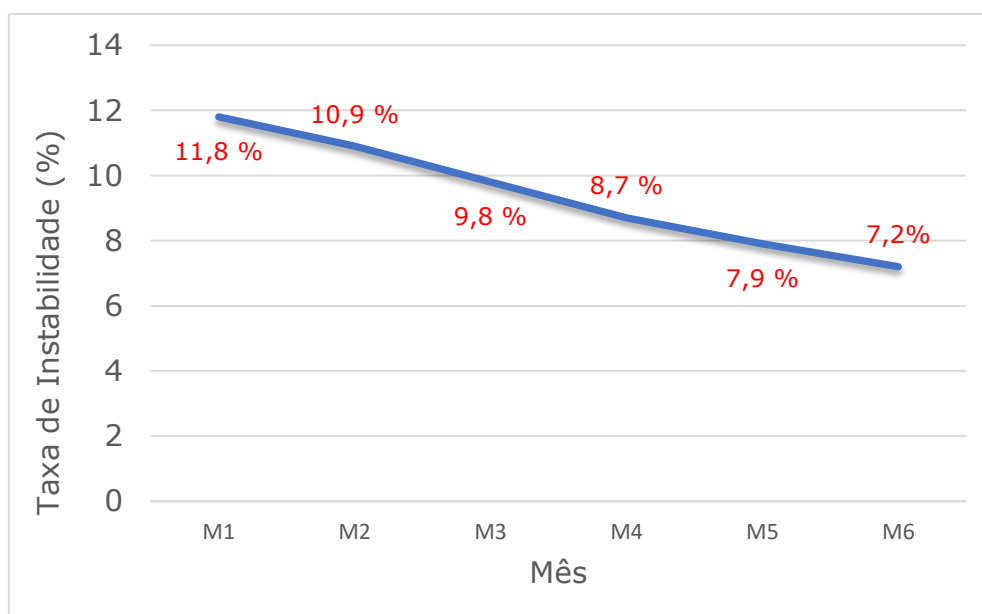


Figura 5.1 - Evolução estimada da taxa de paletes instáveis

A comparação entre a situação inicial e os resultados observados evidencia melhorias associadas à introdução de critérios estruturados de avaliação e certificação da estabilidade das paletes.

No que respeita à taxa de conformidade na certificação, o valor obtido de 91% situou-se acima do limiar definido como objetivo para o processo de validação. Considerando que o contexto inicial se caracterizava pela inexistência de um sistema estruturado de certificação e pela ausência de critérios normalizados de avaliação, os resultados evidenciam uma melhoria significativa na uniformização do processo de verificação das condições de estabilidade das unidades de carga.

Relativamente ao índice de variabilidade do processo, os resultados obtidos indicaram uma redução aproximada de 26% face aos valores de referência observados no diagnóstico inicial. O valor obtido permitiu superar o objetivo mínimo definido para este indicador, correspondente a uma redução de 20% da variabilidade operacional.

A Figura 5.2 apresenta a comparação entre os valores de referência, os objetivos definidos e os resultados obtidos para os principais indicadores quantitativos considerados no processo de validação.

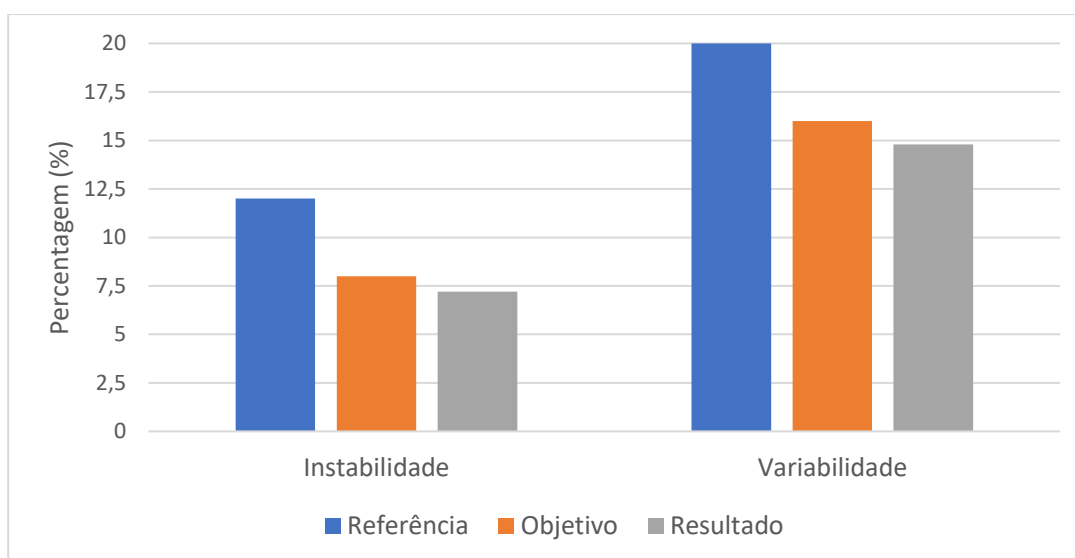


Figura 5.2 - Comparação entre valores de referência, objetivos e resultados obtidos

Os resultados observados sugerem maior consistência na aplicação dos procedimentos associados ao envolvimento das paletes com filme estirável e menor dependência da variabilidade associada ao fator humano.

Quanto ao número de ocorrências logísticas associadas à instabilidade das unidades de carga, os resultados indicaram uma redução estimada de aproximadamente 28% face à situação de referência identificada no Capítulo 3. O valor observado superou igualmente o objetivo definido para este indicador, correspondente a uma redução mínima de 25% das ocorrências registadas.

De forma consolidada, a Tabela 5.2 apresenta a comparação entre os valores de referência, os objetivos definidos e os resultados obtidos no processo de validação.

Tabela 5.2 - Comparação entre valores de referência, objetivos e resultados obtidos

Indicador	Referência Inicial	Objetivo	Resultado Obtido	Avaliação
Taxa de Paletes Instáveis	10%–12%	Redução $\geq$ 30%	Redução estimada de 40%	Objetivo superado
Taxa de Conformidade na Certificação	Ausência de sistema estruturado	$\geq$ 90%	91%	Objetivo atingido
Índice de Variabilidade do Processo	18%–20%	Redução $\geq$ 20%	Redução estimada de 26%	Objetivo superado
Número de Ocorrências Logísticas	Ocorrências recorrentes	Redução $\geq$ 25%	Redução estimada de 28%	Objetivo superado

De forma geral, os resultados comparativos obtidos evidenciam que a aplicação do modelo proposto apresenta potencial para contribuir positivamente para a melhoria da estabilidade das unidades de carga, para a redução da variabilidade operacional e para o reforço do controlo do processo logístico.

Importa, contudo, salientar que os resultados apresentados decorrem de uma validação desenvolvida com base na observação operacional do processo e aplicada ao contexto industrial analisado, não correspondendo a uma implementação industrial integral em ambiente real.

Ainda assim, a coerência observada entre os indicadores analisados, os objetivos definidos e os resultados obtidos permite sustentar o potencial contributo operacional da proposta desenvolvida.

5.3 Discussão dos Resultados

Os resultados do processo de validação evidenciam uma melhoria global do desempenho associado à estabilidade das unidades de carga, sugerindo que a aplicação do modelo proposto contribui positivamente para o reforço do controlo operacional e para a redução das fragilidades identificadas no diagnóstico apresentado no Capítulo 3. A evolução observada nos diferentes indicadores permite interpretar não apenas os ganhos alcançados, mas também os fatores operacionais que influenciaram o comportamento do processo ao longo da validação.

A redução da taxa de paletes instáveis constitui um dos resultados mais relevantes da validação realizada. A diminuição estimada da instabilidade das unidades de carga sugere que a introdução de critérios estruturados de certificação e verificação operacional contribuiu para reduzir a variabilidade associada ao processo de envolvimento e preparação das paletes para expedição. Este resultado encontra-se alinhado com a literatura analisada no Capítulo 2, onde diversos autores identificam a normalização operacional e a definição de procedimentos de controlo como fatores críticos para a melhoria da estabilidade das unidades de carga e para a redução de falhas logísticas associadas ao transporte e manuseamento.

A melhoria observada parece igualmente relacionada com a redução da dependência exclusiva da avaliação visual e empírica dos operadores. No diagnóstico desenvolvido no Capítulo 3, verificou-se que a inexistência de critérios normalizados de validação favorecia decisões inconsistentes entre operadores, aumentando a probabilidade de expedição de paletes com níveis distintos de estabilidade. A utilização do modelo proposto permitiu introduzir maior uniformização no processo de decisão, contribuindo para maior consistência operacional.

Os resultados associados à taxa de conformidade na certificação reforçam igualmente esta interpretação. A obtenção de níveis de conformidade superiores ao objetivo inicialmente definido sugere que a utilização de uma *checklist* estruturada e de critérios explícitos de avaliação facilita o controlo do processo e melhora a capacidade de identificação de não conformidades antes da expedição das unidades de carga. Este comportamento é coerente com abordagens descritas na literatura relacionada com sistemas de qualidade e normalização operacional,

onde a formalização dos critérios de verificação tende a reduzir a variabilidade do processo e a aumentar a repetibilidade das operações.

Relativamente ao índice de variabilidade operacional, os resultados obtidos sugerem que a redução observada está diretamente associada à maior padronização do processo de aplicação do filme estirável. No contexto analisado no Capítulo 3, uma parte significativa da variabilidade operacional encontrava-se associada à dependência do fator humano, nomeadamente na definição do número de voltas aplicadas, na tensão do filme e na avaliação subjetiva da estabilidade das paletes. A aplicação do modelo permitiu reduzir parcialmente esta dispersão operacional, contribuindo para maior uniformidade do processo.

Contudo, os resultados também sugerem que a variabilidade operacional não é totalmente eliminada pela proposta apresentada. A existência de diferentes tipologias de carga, distintas configurações de paletização e variabilidade associada às características físicas dos produtos continua a introduzir variabilidade no processo operacional. Este aspeto é consistente com a literatura analisada no Capítulo 2, que identifica a heterogeneidade das unidades de carga como uma das principais dificuldades associadas à normalização integral dos processos logísticos.

No que respeita às ocorrências logísticas associadas à instabilidade das paletes, a redução observada sugere que a melhoria das condições de estabilidade produz impacto não apenas na fase de produção, mas também ao longo da cadeia logística. A diminuição de incidentes relacionados com deslocamento de carga, deformação das unidades paletizadas ou necessidade de retrabalho operacional evidencia a importância da estabilização das paletes enquanto fator de fiabilidade logística e segurança operacional.

Ainda assim, importa salientar que os resultados obtidos decorrem de uma validação aplicada a um contexto representativo do ambiente industrial analisado, não correspondendo a uma implementação integral em ambiente real de operação. Esta limitação reduz a possibilidade de generalização absoluta dos resultados, uma vez que fatores externos, como alterações nos fluxos logísticos, mudanças de produto ou variações da carga operacional, poderão influenciar o comportamento do sistema após uma implementação efetiva.

Adicionalmente, a ausência de recolha contínua de dados reais ao longo de um período prolongado limita a capacidade de avaliar efeitos de médio e longo prazo associados à estabilização do processo. Apesar desta limitação, a coerência

observada entre os resultados obtidos, os indicadores definidos e as fragilidades identificadas no Capítulo 3 sugere que a proposta desenvolvida apresenta consistência técnica e potencial aplicabilidade prática no contexto operacional estudado.

De forma global, os resultados obtidos permitem concluir que o modelo proposto contribui para melhorar o controlo do processo de estabilização das unidades de carga, reduzir a variabilidade operacional e reforçar a fiabilidade das operações logísticas associadas à expedição das paletes. Simultaneamente, os resultados reforçam a relevância da normalização operacional e da definição de critérios estruturados de certificação enquanto mecanismos de mitigação das fragilidades identificadas no diagnóstico inicial.

5.4 Análise de Sensibilidade e Robustez

A análise de sensibilidade e robustez da proposta teve como objetivo analisar a estabilidade dos resultados obtidos face a diferentes condições operacionais e identificar os principais fatores capazes de influenciar o desempenho do modelo conceptual de certificação interna da estabilidade das paletes. Atendendo à natureza da validação desenvolvida, esta análise procurou verificar em que medida os resultados dependem das condições do contexto analisado e quais os limites de aplicabilidade da proposta.

A robustez do modelo foi analisada considerando diferentes cenários operacionais associados à variabilidade das unidades de carga, às condições de envolvimento com filme estirável e ao grau de cumprimento dos procedimentos definidos no processo de certificação interna. Foram considerados três cenários principais: (A) aumento da variabilidade das tipologias de carga expedidas; (B) redução do nível de cumprimento dos procedimentos operacionais definidos; e (C) aumento do ritmo operacional associado a maiores volumes de expedição.

Tabela 5.3 – Impacto dos cenários de sensibilidade nos indicadores de desempenho

Cenário	Taxa de Paletes Instáveis	Taxa de Conformidade na Certificação	Índice de Variabilidade do Processo	Número de Ocorrências Logísticas
A – Maior variabilidade das tipologias de carga	Aumento ligeiro	Redução ligeira	Aumento moderado	Aumento ligeiro
B – Redução do cumprimento dos procedimentos operacionais	Aumento elevado	Redução moderada	Aumento elevado	Aumento elevado
C – Aumento do ritmo operacional e volume de expedição	Aumento ligeiro	Redução ligeira	Aumento moderado	Aumento ligeiro

A Tabela 5.3 sintetiza o impacto estimado dos diferentes cenários operacionais analisados sobre os indicadores de desempenho considerados na validação da proposta. Os efeitos apresentados resultam de uma interpretação conceptual do comportamento esperado do modelo perante alterações das condições operacionais descritas, não correspondendo a resultados obtidos por implementação industrial real.

Observa-se que o Cenário B, associado à redução do cumprimento dos procedimentos operacionais, apresenta o impacto mais significativo sobre os indicadores analisados, evidenciando a elevada dependência do modelo relativamente à consistência da sua aplicação operacional. Por outro lado, os Cenários A e C produzem efeitos mais moderados, sugerindo que o modelo mantém capacidade de adaptação a diferentes níveis de variabilidade das unidades de carga e a alterações do ritmo operacional, desde que os procedimentos definidos sejam adequadamente cumpridos. Os efeitos observados em cada cenário são analisados de seguida.

No Cenário A, associado à maior heterogeneidade das unidades de carga, verificou-se que o modelo mantém capacidade de controlo operacional e identificação de situações de instabilidade, embora com ligeira redução da taxa de conformidade observada. Este comportamento sugere que o modelo apresenta capacidade de adaptação a diferentes configurações de paletização, mantendo níveis de desempenho considerados operacionalmente aceitáveis. Contudo, os resultados também indicam que cargas com características físicas muito distintas poderão exigir critérios complementares de avaliação ou ajustamentos específicos no processo de certificação.

No Cenário B, relacionado com a redução do cumprimento dos procedimentos operacionais, observou-se maior impacto nos indicadores associados à variabilidade do processo e à taxa de paletes instáveis. A diminuição da consistência na aplicação dos procedimentos de envolvimento e verificação operacional tende a aumentar a dispersão dos resultados obtidos, reduzindo parcialmente os ganhos associados à normalização introduzida pela proposta. Este resultado sugere que a eficácia do modelo depende significativamente do grau de adesão operacional aos critérios definidos, evidenciando a importância da formação, acompanhamento e padronização das práticas de trabalho.

Relativamente ao Cenário C, associado ao aumento do volume operacional e do ritmo de expedição, os resultados indicam que o modelo mantém desempenho globalmente positivo, embora se verifique tendência para aumento moderado da variabilidade operacional em períodos de maior pressão produtiva. Este comportamento é consistente com o contexto identificado no Capítulo 3, onde situações de maior intensidade operacional favoreciam decisões mais rápidas e maior dependência da avaliação empírica dos operadores.

Globalmente, a análise desenvolvida sugere que os resultados obtidos apresentam um nível de robustez tecnicamente aceitável dentro das condições operacionais consideradas na validação. A redução da instabilidade das paletes e a melhoria da consistência operacional mantiveram-se em diferentes cenários analisados, ainda que com variações moderadas associadas às condições específicas de operação.

Importa, contudo, reconhecer que a proposta apresenta maior sensibilidade a fatores diretamente relacionados com o comportamento operacional e com o cumprimento efetivo dos procedimentos definidos. A dependência do fator humano continua a representar um elemento crítico para a estabilidade do processo, particularmente em contextos de elevada variabilidade operacional ou de aumento significativo da carga de trabalho.

Adicionalmente, a ausência de implementação integral em ambiente industrial real limita a possibilidade de avaliar o comportamento do modelo perante variações operacionais prolongadas ou contextos logísticos distintos do ambiente considerado neste estudo. Assim, embora os resultados obtidos sugiram consistência e aplicabilidade prática da proposta, a generalização dos resultados

para outros contextos industriais deverá ser realizada com prudência e suportada por validação adicional em ambiente real de operação.

De forma geral, a análise de sensibilidade e robustez permite concluir que os resultados obtidos não dependem exclusivamente de condições operacionais específicas, evidenciando capacidade de adaptação do modelo a diferentes cenários representativos do contexto analisado. No entanto, os resultados também demonstram que a eficácia da proposta permanece condicionada pelo nível de normalização operacional, pela consistência dos procedimentos aplicados e pelo grau de adesão dos operadores ao processo de certificação interna definido.

5.5 Resumo da Validação

A validação desenvolvida ao longo do presente capítulo permitiu avaliar, de forma estruturada, o desempenho do modelo conceptual de certificação interna da estabilidade das paletes proposto no Capítulo 4, através da análise dos indicadores definidos na secção 4.3.1. Os resultados observados evidenciam melhorias nos diferentes indicadores analisados, nomeadamente na redução da taxa de paletes instáveis, no aumento da conformidade operacional, na diminuição da variabilidade do processo e na redução das ocorrências logísticas associadas ao transporte e manuseamento das unidades de carga.

Globalmente, os resultados sugerem que a proposta desenvolvida apresenta capacidade para contribuir positivamente para a melhoria do controlo operacional do processo de estabilização das paletes, promovendo maior uniformização dos procedimentos e reduzindo a dependência de avaliações exclusivamente empíricas. A comparação entre os valores de referência, os objetivos definidos e os resultados obtidos demonstrou uma evolução globalmente positiva, verificando-se o cumprimento ou superação dos objetivos estabelecidos para a maioria dos indicadores analisados.

A análise desenvolvida ao longo das secções anteriores permitiu igualmente verificar que os resultados obtidos se encontram alinhados com as fragilidades identificadas no diagnóstico realizado no Capítulo 3 e com os princípios de normalização operacional e controlo de processo discutidos na revisão da literatura apresentada no Capítulo 2. Neste sentido, os resultados reforçam a relevância da utilização de critérios estruturados de certificação enquanto mecanismo de redução da variabilidade operacional e de melhoria da fiabilidade logística.

Contudo, importa salientar que a validação realizada apresenta limitações associadas à abordagem adotada. A ausência de implementação integral em ambiente industrial real condiciona a possibilidade de generalização absoluta dos resultados e limita a avaliação do comportamento do modelo perante condições operacionais prolongadas ou contextos distintos do ambiente analisado no presente estudo. Adicionalmente, fatores relacionados com a variabilidade das tipologias de carga, o ritmo operacional e o grau de adesão dos operadores aos procedimentos definidos poderão continuar a influenciar o desempenho da proposta.

Apesar destas limitações, a análise de sensibilidade e robustez realizada sugere que os resultados obtidos não dependem exclusivamente de um único cenário operacional específico, evidenciando capacidade de adaptação do modelo a diferentes condições representativas do contexto estudado. Os resultados permitiram ainda identificar que a eficácia da proposta depende fortemente do nível de normalização operacional e da consistência na aplicação dos procedimentos de certificação interna.

De forma geral, considera-se que a proposta desenvolvida demonstrou potencial de aplicabilidade prática e consistência técnica no contexto operacional analisado, constituindo uma abordagem relevante para a melhoria do processo de estabilização e certificação interna das unidades de carga. Simultaneamente, permanecem em abertos aspetos relacionados com a validação integral em ambiente industrial real, a recolha contínua de observações operacionais e a avaliação do desempenho do modelo em diferentes contextos logísticos e produtivos, aspetos que serão aprofundados no Capítulo 6.

6 Conclusões e trabalho futuro

Concluída a apresentação, análise e validação conceptual da proposta desenvolvida ao longo da investigação, apresentam-se neste capítulo as principais conclusões do estudo. Por fim, são identificadas as limitações da investigação e apresentadas propostas para trabalho futuro.

6.1 Conclusões Principais

O presente trabalho permitiu desenvolver um modelo conceptual estruturado de certificação interna da estabilidade das unidades de carga, procurando responder às fragilidades operacionais identificadas no contexto industrial analisado. Com base no diagnóstico realizado no Capítulo 3, no modelo desenvolvido no Capítulo 4 e no processo de validação apresentado no Capítulo 5, foi possível demonstrar a relevância da utilização de critérios estruturados de avaliação da estabilidade das paletes enquanto mecanismo de apoio ao controlo operacional e à redução do risco logístico associado ao transporte e manuseamento das unidades de carga.

Uma primeira conclusão deste trabalho é que a ausência de critérios estruturados de avaliação e certificação interna da estabilidade das paletes constitui um elemento significativo de variabilidade operacional e de aumento do risco logístico. O diagnóstico realizado permitiu verificar que a forte dependência da avaliação visual e empírica dos operadores favorecia decisões inconsistentes relativamente às condições de estabilidade das unidades de carga, contribuindo para situações de instabilidade das paletes, retrabalho operacional e ocorrências associadas ao transporte e movimentação do produto acabado. Esta conclusão encontra-se alinhada com os princípios discutidos na revisão da literatura, que identificam a normalização operacional e a definição de critérios objetivos de controlo como fatores relevantes para a melhoria da fiabilidade dos processos logísticos.

Uma segunda conclusão é que o modelo de certificação interna desenvolvido demonstrou potencial de aplicabilidade no contexto operacional estudado, permitindo introduzir critérios técnicos de verificação e maior consistência na avaliação da estabilidade das unidades de carga. A proposta apresentada reduziu

a dependência exclusiva da avaliação subjetiva dos operadores e promoveu maior uniformização no processo de decisão associado à expedição das paletes. Os resultados observados ao longo da validação indicam de forma consistente que a utilização de critérios estruturados de certificação contribui para melhorar o controle do processo e reforçar a estabilidade operacional associada à preparação das unidades de carga.

A análise dos indicadores definidos no processo de validação permitiu igualmente concluir que a proposta desenvolvida apresenta potencial para produzir melhorias operacionais relevantes no contexto analisado. Os resultados evidenciaram melhorias consistentes nos diferentes indicadores considerados, nomeadamente ao nível da redução da instabilidade das paletes, da diminuição da variabilidade operacional e da redução das ocorrências logísticas associadas ao transporte e manuseamento das unidades de carga. Simultaneamente, verificou-se o cumprimento do objetivo definido para a taxa de conformidade na certificação. A coerência observada entre os objetivos estabelecidos, os resultados obtidos e as fragilidades identificadas no diagnóstico inicial reforça a consistência técnica da proposta e a sua adequação ao problema analisado.

Outra conclusão importante deste trabalho é que a eficácia da proposta depende significativamente do grau de normalização operacional e da consistência na aplicação dos procedimentos definidos. A análise de sensibilidade e robustez realizada demonstrou que fatores como a variabilidade das tipologias de carga, o ritmo operacional e o nível de adesão dos operadores aos procedimentos de certificação interna continuam a influenciar o desempenho do processo. Neste sentido, os resultados indicam que a implementação eficaz da proposta requer não apenas a definição de critérios técnicos de avaliação, mas também mecanismos de formação, acompanhamento operacional e monitorização contínua do processo.

Por fim, conclui-se que, apesar da ausência de implementação integral em ambiente industrial real, a abordagem de validação utilizada permitiu avaliar o potencial contributo da proposta para o contexto estudado de forma tecnicamente fundamentada. A utilização de indicadores operacionais, a análise comparativa dos resultados e a avaliação da robustez do modelo permitiram sustentar a relevância prática da proposta dentro das condições consideradas na validação. Contudo, os resultados observados não devem ser generalizados de forma absoluta para outros contextos industriais sem validação adicional, uma vez que fatores específicos de

operação poderão influenciar o comportamento do modelo em diferentes ambientes logísticos e produtivos.

De forma global, considera-se que o trabalho desenvolvido demonstrou que a introdução de mecanismos estruturados de certificação da estabilidade das unidades de carga constitui uma abordagem tecnicamente consistente para reduzir a variabilidade operacional, reforçar o controlo do processo e aumentar a fiabilidade logística associada à expedição das paletes. Simultaneamente, o estudo evidenciou a importância da normalização operacional e da definição de critérios objetivos de avaliação enquanto mecanismos de mitigação das fragilidades identificadas no contexto analisado.

6.1.1 Resposta às Perguntas de Investigação

Com o objetivo de assegurar uma ligação explícita entre as perguntas de investigação formuladas no início do estudo e os resultados obtidos, apresentam-se seguidamente respostas sintéticas às questões definidas na Secção 1.5.

Pergunta 1 – Quais são os principais fatores técnicos que influenciam a estabilidade das paletes de produto acabado à saída de fábrica?

Os resultados da revisão da literatura e da análise do caso de estudo permitiram concluir que a estabilidade das paletes depende principalmente da configuração de paletização, da ocupação do estrado, da distribuição da carga, da utilização adequada do filme estirável e do cumprimento dos procedimentos operacionais associados à preparação da unidade de carga.

Pergunta 2 – De que forma a instabilidade das paletes contribui para o aumento do risco logístico, da sinistralidade rodoviária e dos custos associados ao transporte?

Concluiu-se que a instabilidade das paletes aumenta a probabilidade de ocorrência de danos materiais, perdas de produto, interrupções operacionais e potenciais situações de risco para a segurança rodoviária. Adicionalmente, contribui para o aumento dos custos logísticos associados a devoluções, reclamações, desperdícios, reproprocessamento e ineficiências operacionais ao longo da cadeia de abastecimento.

Pergunta 3 – Quais são os principais constrangimentos dos métodos atualmente utilizados pelas empresas produtoras de bens de consumo para avaliar a estabilidade das paletes antes da expedição?

Verificou-se que os métodos atualmente utilizados assentam predominantemente na observação visual e na experiência dos operadores, caracterizando-se pela ausência de critérios objetivos, mensuráveis e normalizados que permitam uma avaliação consistente da estabilidade das unidades de carga. Esta situação dificulta a tomada de decisão, a gestão do risco logístico e a clarificação de responsabilidades entre os diferentes intervenientes da cadeia de transporte.

Pergunta 4 – Que critérios técnicos mensuráveis podem ser utilizados para avaliar a estabilidade das paletes de produto acabado à saída de fábrica?

O estudo permitiu identificar critérios relacionados com a configuração de paletização, a ocupação do estrado, a estabilidade estrutural da carga, a fixação da carga à paleta através de filme estirável e a existência de condições eliminatórias suscetíveis de comprometer a segurança da unidade de carga. Estes critérios constituem a base técnica do modelo conceptual de certificação desenvolvido.

Pergunta 5 – Que condições ou critérios permitiriam que a certificação interna da estabilidade das paletes se constituísse como uma ferramenta eficaz de apoio à gestão do risco logístico e à clarificação de responsabilidades entre os intervenientes da cadeia de transporte?

Concluiu-se que a certificação interna da estabilidade das paletes poderá constituir uma ferramenta eficaz de apoio à gestão do risco logístico desde que assente em critérios técnicos claramente definidos, procedimentos normalizados de avaliação, formação adequada dos operadores, mecanismos consistentes de verificação e controlo operacional e registo formal dos resultados obtidos. A aplicação destes princípios poderá contribuir para uma maior objetividade na avaliação da estabilidade das unidades de carga e para uma clarificação mais consistente das responsabilidades entre os diferentes intervenientes da cadeia logística.

6.2 Contribuições do Trabalho

O presente trabalho produziu contributos de natureza científica, metodológica e prática no domínio da estabilidade e certificação interna de unidades de carga em contexto industrial. As contribuições identificadas resultam diretamente do diagnóstico realizado, do modelo conceptual desenvolvido e do processo de validação apresentado ao longo da dissertação.

Do ponto de vista técnico, uma primeira contribuição consiste na sistematização de uma abordagem estruturada para a avaliação da estabilidade das paletes de produto acabado, baseada em critérios técnicos mensuráveis aplicados ao contexto logístico-industrial estudado. Embora a estabilidade das unidades de carga seja abordada na literatura associada à logística, embalagem e transporte, verificou-se que muitos contextos industriais continuam a depender predominantemente de avaliações empíricas e não normalizadas realizadas pelos operadores. Neste sentido, o trabalho desenvolvido permitiu estruturar um conjunto coerente de critérios de verificação relacionados com estabilidade, conformidade operacional e controlo do processo, contribuindo para uma abordagem mais objetiva da gestão do risco logístico associado ao transporte rodoviário de mercadorias paletizadas.

Uma segunda contribuição científica resulta da demonstração da relevância da normalização operacional enquanto mecanismo de redução da variabilidade associada ao processo de estabilização das paletes. A análise realizada ao longo do estudo permitiu identificar que fatores relacionados com a aplicação do filme estirável, os procedimentos de verificação operacional e a ausência de critérios uniformizados influenciam diretamente o desempenho do processo logístico. Os resultados da validação sugerem que a introdução de critérios estruturados de certificação permite reduzir inconsistências operacionais e aumentar a uniformidade do processo de decisão associado à expedição das unidades de carga, reforçando empiricamente princípios discutidos na literatura sobre controlo operacional e gestão da variabilidade.

Ainda do ponto de vista metodológico, o trabalho contribui para a aplicação de uma abordagem de validação indireta em contexto industrial sem implementação integral em ambiente real. A utilização combinada de indicadores operacionais, análise comparativa de resultados, observação do processo e análise de sensibilidade permitiu desenvolver um quadro de avaliação coerente com as

restrições do contexto estudado. Esta abordagem possibilitou avaliar o potencial contributo da proposta sem recurso a implementação industrial completa, constituindo uma forma de validação metodologicamente fundamentada para estudos aplicados em contextos onde existem limitações operacionais à implementação imediata.

Do ponto de vista prático, uma das principais contribuições do trabalho consiste no desenvolvimento de um modelo conceptual de apoio à certificação interna da estabilidade das paletes potencialmente aplicável em contextos industriais com características semelhantes às do ambiente analisado. A proposta desenvolvida fornece uma base estruturada para apoiar decisões relacionadas com verificação, aceitação e controlo da estabilidade das unidades de carga antes da expedição, reduzindo a dependência exclusiva da avaliação subjetiva dos operadores.

Adicionalmente, o trabalho permitiu identificar fatores operacionais críticos para a eficácia do processo de estabilização das paletes, nomeadamente a importância da uniformização dos procedimentos, da formação operacional e da adesão consistente aos critérios definidos. Estas conclusões fornecem orientações práticas relevantes para futuras implementações industriais e reforçam a necessidade de articulação entre produção, logística e gestão do risco operacional no controlo das unidades de carga.

De forma global, considera-se que o trabalho desenvolvido permitiu estruturar uma abordagem técnica e operacional para a certificação interna da estabilidade das paletes, contribuindo para a discussão sobre a fiabilidade logística e para o desenvolvimento de mecanismos mais objetivos de avaliação da estabilidade das unidades de carga em ambiente industrial.

6.3 Limitações do Trabalho

O presente trabalho apresenta três limitações principais que condicionam o alcance das conclusões obtidas e delimitam as condições de validade da proposta desenvolvida.

A primeira limitação está relacionada com a natureza da validação realizada. Embora a proposta tenha sido avaliada com base em indicadores operacionais, análise comparativa de resultados, análise de sensibilidade e cenários representativos do contexto estudado, não foi realizada uma implementação integral do modelo em ambiente industrial real e prolongado. Neste sentido, os

resultados estimados devem ser interpretados como evidência do potencial técnico e operacional da proposta, e não como confirmação definitiva do seu desempenho em condições reais de operação contínua. Esta limitação impede avaliar de forma completa o comportamento do modelo perante variabilidade operacional prolongada, alterações organizacionais ao longo do tempo ou efeitos associados à adaptação comportamental dos operadores durante a utilização continuada do sistema de certificação interna.

A segunda limitação prende-se com o âmbito específico do estudo e com as características do contexto industrial analisado. A investigação incidiu sobre um único contexto ligado ao transporte de produto acabado paletizado, com práticas operacionais, tipologias de carga e procedimentos logísticos próprios. Apesar de muitos dos fatores identificados apresentarem relevância potencial para outros ambientes industriais, a transferência direta dos resultados para diferentes setores, configurações logísticas ou condições de transporte requer adaptação e validação adicional. Assim, as conclusões apresentadas devem ser interpretadas no contexto das condições operacionais consideradas ao longo do estudo, não podendo ser generalizadas de forma absoluta para outros cenários industriais sem confirmação empírica complementar.

A terceira limitação está associada à dependência de fatores operacionais e humanos que não podem ser totalmente controlados através do modelo proposto. A estabilidade das unidades de carga continua a depender de variáveis relacionadas com o grau de adesão dos operadores aos procedimentos definidos, a consistência da aplicação do filme estirável, a variabilidade das tipologias de carga e as próprias condições de movimentação e transporte. Embora a proposta desenvolvida contribua para aumentar a uniformização do processo de avaliação da estabilidade das paletes, a variabilidade operacional não é completamente eliminada, podendo influenciar o desempenho do modelo em diferentes contextos de aplicação.

Adicionalmente, o trabalho não incluiu a realização de ensaios físicos laboratoriais nem a integração de tecnologias automáticas de monitorização contínua da estabilidade das paletes. A proposta assume, assim, uma natureza predominantemente conceptual e operacional, baseada na definição de critérios técnicos estruturados e na análise das práticas observadas no contexto estudado. Esta opção metodológica permitiu desenvolver uma abordagem coerente com os

objetivos da investigação e com as restrições do contexto analisado, mas limita a capacidade de quantificação experimental de determinados comportamentos físicos das unidades de carga sob condições reais de transporte.

Em conjunto, estas limitações definem o âmbito de validade das conclusões apresentadas e evidenciam a necessidade de validação adicional em ambiente industrial real, particularmente em contextos sujeitos a diferentes níveis de variabilidade operacional e logística. Ainda assim, considera-se que o trabalho apresenta consistência metodológica e contributos relevantes para a compreensão da estabilidade das paletes enquanto fator de risco logístico e para o desenvolvimento de abordagens estruturadas de certificação aplicáveis ao contexto industrial estudado.

6.4 Trabalho Futuro

O trabalho desenvolvido permitiu identificar várias oportunidades de investigação e desenvolvimento futuro diretamente relacionadas com as limitações reconhecidas ao longo da dissertação e com o potencial de evolução da proposta apresentada. Considerando a natureza conceptual do modelo desenvolvido e as restrições associadas à validação realizada, identificam-se quatro linhas principais de trabalho futuro, hierarquizadas de acordo com a sua relevância para a consolidação técnica e operacional da proposta.

Em primeiro lugar, e em resposta à principal limitação identificada na Secção 6.3, considera-se prioritária a implementação integral do modelo proposto em ambiente industrial real, acompanhada pela recolha contínua de dados operacionais durante um período prolongado de funcionamento. Esta linha de desenvolvimento constitui o passo imediato necessário para confirmar, em condições reais de operação, o desempenho potencial identificado ao longo do processo de validação apresentado no Capítulo 5. A implementação prática permitiria avaliar de forma mais robusta o impacto do modelo na redução efetiva da instabilidade das paletes, na diminuição das ocorrências logísticas e na melhoria da consistência operacional ao longo do tempo. Paralelamente, possibilitaria analisar o comportamento do modelo perante variabilidade operacional prolongada, alterações de ritmo produtivo, diferentes condições de transporte e fatores organizacionais associados à adaptação dos operadores aos procedimentos de certificação.

Em segundo lugar, recomenda-se a extensão e adaptação do modelo conceptual de certificação a diferentes tipologias de produto, configurações de paletização e contextos industriais. O presente estudo incidiu sobre um contexto específico associado ao transporte de produto acabado paletizado na indústria alimentar e de bebidas, cujas características operacionais condicionam parcialmente o alcance das conclusões obtidas. Neste sentido, a aplicação do modelo em setores com diferentes características de embalagem, geometrias de carga, materiais de acondicionamento ou requisitos logísticos permitiria avaliar a capacidade de generalização da proposta e identificar eventuais necessidades de adaptação dos critérios técnicos de certificação. Esta linha de investigação poderá igualmente contribuir para estabelecer limites de aplicabilidade do modelo em diferentes ambientes operacionais e níveis de exigência logística.

Uma terceira linha de trabalho futuro relaciona-se com a integração de tecnologias digitais e sistemas automáticos de monitorização no processo de avaliação da estabilidade das paletes. Conforme identificado na Secção 6.3, a proposta desenvolvida continua parcialmente dependente da avaliação operacional e da consistência de aplicação dos procedimentos definidos. Neste contexto, a incorporação de sensores de aceleração, sistemas de visão artificial ou ferramentas de monitorização digital poderá permitir aumentar o grau de automatização da certificação e reduzir a dependência da avaliação subjetiva dos operadores. Adicionalmente, a integração com sistemas de gestão logística e plataformas digitais poderá facilitar a rastreabilidade das unidades de carga ao longo da cadeia de abastecimento e permitir a monitorização contínua do desempenho do processo em condições reais de transporte.

Em quarto lugar, considera-se relevante aprofundar a análise económica associada à implementação do modelo proposto. Embora o presente trabalho tenha permitido identificar potencial de redução de ocorrências logísticas, retrabalho operacional e perdas associadas à instabilidade das paletes, não foi realizada uma quantificação económica detalhada dos benefícios da proposta. Estudos futuros poderão desenvolver modelos de análise custo-benefício que permitam avaliar de forma mais precisa os impactos financeiros associados à redução de desperdícios, danos em produto, reclamações logísticas, custos de transporte e impactos relacionados com segurança operacional. Esta análise

poderá fornecer suporte adicional à tomada de decisão empresarial e facilitar a adoção prática do modelo em contexto industrial.

Adicionalmente, futuras investigações poderão explorar o desenvolvimento de referenciais técnicos e normativos específicos orientados para a certificação da estabilidade das unidades de carga à saída das unidades industriais. A inexistência de critérios harmonizados de avaliação continua a constituir uma limitação relevante no contexto logístico atual. Neste sentido, o desenvolvimento de abordagens normalizadas poderá contribuir para aumentar a uniformização dos processos de avaliação, clarificar responsabilidades entre os diferentes intervenientes da cadeia logística e reforçar a fiabilidade das operações de transporte rodoviário.

De forma global, as linhas de trabalho futuro identificadas demonstram que o presente estudo constitui um ponto de partida para o aprofundamento da investigação associada à estabilidade das unidades de carga e à gestão do risco logístico. Simultaneamente, evidenciam que a consolidação da proposta desenvolvida depende da sua validação continuada, da expansão para diferentes contextos operacionais e da integração de mecanismos adicionais de suporte técnico e monitorização.

6.5 Considerações Finais

O trabalho desenvolvido ao longo desta dissertação permitiu analisar a estabilidade das unidades de carga enquanto fator relevante para a gestão do risco logístico e para o desempenho das operações de transporte rodoviário de mercadorias paletizadas. A investigação realizada evidenciou que a ausência de critérios estruturados de avaliação da estabilidade das paletes constitui uma fragilidade operacional com impacto potencial na fiabilidade logística, na segurança do transporte e na consistência dos processos de expedição.

A proposta conceptual desenvolvida permitiu estruturar uma abordagem orientada para a certificação da estabilidade das unidades de carga, baseada em critérios técnicos de avaliação e em princípios de normalização operacional. Embora os resultados projectados requeiram validação adicional em ambiente industrial real, o trabalho realizado sugere que abordagens mais estruturadas de controlo da estabilidade das paletes poderão contribuir para reduzir variabilidade

operacional, reforçar a consistência dos processos logísticos e apoiar uma gestão mais objetiva do risco associado ao transporte rodoviário de mercadorias.

De forma global, considera-se que a presente dissertação constitui um contributo tecnicamente fundamentado para a discussão da estabilidade das unidades de carga no contexto da Engenharia e Gestão Industrial, fornecendo uma base conceptual e metodológica para futuros desenvolvimentos associados à certificação interna, monitorização e melhoria contínua das operações logísticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aven, T. (2016). Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation. *European Journal of Operational Research*, 253(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.023>
- Ballou, R. H. (2004). *Business Logistics/Supply Chain Management* (5th ed.). Pearson.
- Bisha, J., & Mrówczyński, D. (2021). Study of the stability of palletized cargo by dynamic test method performed on laboratory test bench. *Sensors*, 21(15), 5129. <https://doi.org/10.3390/s21155129>
- Booth, A., Sutton, A., & Papaioannou, D. (2016). *Systematic Approaches to a Successful Literature Review* (2nd ed.). Sage.
- Christopher, M. (2016). *Logistics & Supply Chain Management* (5th ed.). Pearson.
- Crespo Pereira, D., García-del-Valle, A., & Prado-Prado, J. C. (2019). Logistics and supply chain risk management: A literature review. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 22(5), 461–482. <https://doi.org/10.1080/13675567.2018.1526244>
- Creswell, J. W. (2014). *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches* (4th ed.). Sage.
- Duong, L. N. K., & Ha, N. T. T. (2021). The links between supply chain risk management practices, supply chain integration and supply chain performance. *Uncertain Supply Chain Management*, 9(1), 175–184. <https://doi.org/10.5267/j.uscm.2020.11.004>
- European Commission. (2014). *Best Practice Guidelines on Cargo Securing for Road Transport* (2nd ed.). Publications Office of the European Union. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/30c7c1dc-f26e-44af-bd4c-2434b43edd7e>
- European Commission. (2018). *European Best Practice Guidelines on Cargo Securing for Road Transport*. Publications Office of the European Union. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/9ace507e-4cbb-465e-809f-0f02e1cfe2ea/language-en>
- European Safe Logistics Association (EUMOS). (2017). *EUMOS 40509: Transport Stability of Unit Loads – Test Methods*. European Safe Logistics Association.
- Hart, C. (1998). *Doing a Literature Review: Releasing the Social Science Research Imagination*. Sage.
- Hohenstein, N.-O., Feisel, E., Hartmann, E., & Giunipero, L. (2015). Research on the phenomenon of supply chain resilience: A systematic review and paths for further investigation. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 45(1/2), 90–117. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-05-2013-0128>
- Hollnagel, E. (2014). *Safety-I and Safety-II: The Past and Future of Safety Management*. Ashgate.
- Ivanov, D., Dolgui, A., & Rozhkov, M. (2020). Does the ripple effect influence the bullwhip effect? An integrated analysis of structural and operational dynamics in supply chains. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1285–1301. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1627438>
- Kitchenham, B. (2004). *Procedures for Performing Systematic Reviews* (TR/SE-0401). Department of Computer Science, Keele University. <https://www.inf.ufsc.br/~aldo.vw/kitchenham.pdf>

- Lambert, D. M., & Cooper, M. C. (2000). Issues in supply chain management. *Industrial Marketing Management*, 29(1), 65–83. [https://doi.org/10.1016/S0019-8501\(99\)00113-3](https://doi.org/10.1016/S0019-8501(99)00113-3)
- Mentzer, J. T., DeWitt, W., Keebler, J. S., Min, S., Nix, N. W., Smith, C. D., & Zacharia, Z. G. (2001). Defining supply chain management. *Journal of Business Logistics*, 22(2), 1–25. <https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2001.tb00001.x>
- Panigrahi, R. R., Singh, N., & Muduli, K. (2025). Digital technologies and food supply chain: A scoping review from 2010 to 2024. *International Journal of Industrial Engineering and Operations Management*, 7(2), 150–174. <https://doi.org/10.1108/IJIEOM-05-2024-0030>
- Reason, J. (1997). *Managing the Risks of Organizational Accidents*. Ashgate.
- Sahab, S., & Oulfarsi, S. (2024). Supply chain risk management and supply chain resilience under disruption risks: Theoretical exploration. *2024 IEEE 15th International Colloquium on Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA)*. <https://doi.org/10.1109/logistiqua61063.2024.10571494>
- Singh, J., Olsen, E., Singh, S. P., Manley, J., & Wallace, F. (2014). The effect of stretch wrap prestretch on unitized load containment. *Packaging Technology and Science*, 27(6), 467–481. <https://doi.org/10.1002/pts.2044>
- Speranza, M. G. (2018). Trends in transportation and logistics. *European Journal of Operational Research*, 264(3), 830–836. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.08.032>
- Tkaczyk, P. (2025). Pilot study of stretch film for securing palletized loads. *Sensors*, 25(22), 6883. <https://doi.org/10.3390/s25226883>
- Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British Journal of Management*, 14(3), 207–222. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>
- Twede, D., Clarke, R., & Tait, J. (2000). Reusable packaging: Managing the reverse logistics cycle. *Journal of Marketing Channels*, 7(3), 75–94. https://doi.org/10.1300/J049v07n03_05
- Wagner, S. M., & Bode, C. (2008). An empirical examination of supply chain performance along several dimensions of risk. *Journal of Business Logistics*, 29(1), 307–325. <https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2008.tb00081.x>
- Webster, J., & Watson, R. T. (2002). Analyzing the past to prepare for the future: Writing a literature review. *MIS Quarterly*, 26(2), xiii–xxiii. <https://doi.org/10.2307/4132319>
- Yam, K. L. (Ed.). (2009). *Encyclopedia of Packaging Technology* (3rd ed.). Wiley.
- Yam, K. L., & Lee, D. S. (Eds.). (2012). *Emerging Food Packaging Technologies: Principles and Practice*. Woodhead Publishing.