

ROBOTIZAÇÃO DE OPERAÇÕES DE CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS “ON SITE”

Análise técnica e económica

JOSÉ PEDRO VERÍSSIMO E SÁ

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Doutor Hipólito José Campos de Sousa

JUNHO DE 2026

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2025/2026

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901



m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil - 2025/2026 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2026*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Avós

*There are two primary choices in life: to accept conditions as they exist or accept the
responsibility for changing them.*

Denis Waitley

AGRADECIMENTOS

A conclusão desta dissertação marca o encerramento de uma etapa determinante no meu percurso enquanto Engenheiro, que não teria sido possível sem o contributo de diversas pessoas e instituições, às quais deixo uma palavra de reconhecido apreço.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Professor Doutor Hipólito José Campos de Sousa, orientador desta dissertação, pela dedicação, rigor científico e sentido crítico com que acompanhou o desenvolvimento do trabalho. As suas orientações e o seu permanente estímulo à reflexão foram decisivos para a estruturação das ideias e para a qualidade do resultado.

Gostaria igualmente de agradecer à empresa ARPECDOURO, pela possibilidade de integrar este projeto de investigação num contexto profissional real, e pelo acesso à informação, experiências e perspetivas práticas que enriqueceram de forma muito significativa o trabalho desenvolvido. Uma referência especial é dirigida ao Eng. António Loureiro, ao Eng. André Mota e ao Eng. Daniel Mota, pela generosidade com que partilharam o seu conhecimento, pela disponibilidade demonstrada e pelo acompanhamento prestado ao longo de todo o processo.

A todos os colegas e profissionais que, direta ou indiretamente, contribuíram para este trabalho através de discussões técnicas, troca de experiências e sugestões, é também deixada uma palavra de reconhecimento e gratidão.

Por último, uma palavra especial é dirigida à família, namorada e amigo, cujo apoio incondicional ao longo de todo o percurso académico foi um alicerce fundamental. A compreensão, o encorajamento e a presença constante nos momentos mais exigentes foram essenciais para que este trabalho chegasse ao seu término. A todos, o mais sincero obrigado.

RESUMO

A presente dissertação tem como tema a robotização de processos construtivos on-site, com foco na construção de edifícios, desenvolvendo uma análise técnica e económica das principais soluções robóticas atualmente disponíveis e do contexto que justifica a sua adoção crescente no setor da construção civil.

O trabalho encontra-se estruturado em cinco capítulos. O primeiro capítulo enquadra o tema, apresenta as motivações que estiveram na origem da investigação e define os objetivos propostos. O segundo capítulo desenvolve uma revisão do estado de arte da robótica aplicada à construção de edifícios, partindo de uma perspetiva histórica sobre a automação industrial e contextualizando o atraso estrutural do setor da construção face a outras indústrias. São caracterizados os principais sistemas disponíveis em quatro domínios de aplicação, sendo estes alvenaria, impressão 3D em betão, acabamentos e automação de estaleiro, com referência a equipamentos reais em uso comercial ou em fase avançada de desenvolvimento, e apresentada uma visão futurista sobre o papel dos robôs humanoides na construção. O terceiro capítulo analisa o mercado de trabalho na construção civil em Portugal, documentando a escassez estrutural de mão de obra qualificada, estimada entre 80 000 e 90 000 trabalhadores, as suas causas demográficas e sociológicas, o papel crescente da imigração e as suas limitações e o paralelismo com a situação verificada nos principais países da Europa Ocidental. Este capítulo estabelece o quadro que confere urgência estratégica à adoção de soluções de automação no setor. O quarto capítulo, núcleo central da dissertação, desenvolve uma análise técnico-económica integrada de quatro sistemas robóticos selecionados: o robô de alvenaria WLTR, o robô de reboco e pintura Okibo EG7, o robô de assentamento de pavimento cerâmico *Legend Robot Tile Laying Robot* e o robô de retificação de pavimentos *Legend Robot Floor Grinding Robot*. Para cada sistema, são caracterizadas as especificações técnicas, comparada a produtividade face ao método manual/ tradicional e desenvolvida uma análise económica comparativa com base em cenários de obra representativos do mercado português. Cada subcapítulo encerra com uma análise geral dos robôs, resumindo as vantagens, limitações e critérios de decisão para a adoção de cada tecnologia. O quinto capítulo sintetiza as principais conclusões da investigação e identifica perspetivas de desenvolvimento futuro no domínio da robotização da construção.

Os resultados obtidos evidenciam que a robotização de processos construtivos on-site é tecnicamente viável e economicamente justificável para as atividades analisadas, com reduções de custo de mão de obra entre 5% e 93% e compressões de prazo de execução entre 60% e 85%, consoante o sistema e o contexto de aplicação. Conclui-se ainda que as principais barreiras à adoção em Portugal não são de natureza tecnológica, mas cultural, organizacional e estrutural, e que a escassez crescente de mão de obra qualificada confere à robotização um papel estratégico incontornável para a sustentabilidade e competitividade do setor a médio e longo prazo.

PALAVRAS-CHAVE: robotização, construção on-site, automação, análise técnico-económica, mão de obra.

ABSTRACT

This dissertation focuses on the robotization of on-site construction processes, with an emphasis on building construction, developing a technical and economic analysis of the main robotic solutions currently available and of the context that justifies their growing adoption in the construction sector.

The work is structured in five chapters. The first chapter frames the topic, presents the motivations behind the research and defines the proposed objectives. The second chapter develops a review of the state of the art of robotics applied to building construction, starting from a historical perspective on industrial automation and contextualizing the structural lag of the construction sector relative to other industries. The main systems available across four application domains are characterized - masonry, 3D concrete printing, finishing works and site automation - with reference to real equipment in commercial use or at an advanced stage of development, and a forward-looking vision is presented on the role of humanoid robots in construction. The third chapter analyses the labor market in the Portuguese construction sector, documenting the structural shortage of qualified labor - estimated at between 80 000 and 90 000 missing workers, its demographic and sociological causes, the growing role of immigration and its limitations, and the parallels with the situation observed in the main Western European countries. This chapter establishes the framework that gives strategic urgency to the adoption of automation solutions in the sector. The fourth chapter, the central core of the dissertation, develops an integrated technical-economic analysis of four selected robotic systems: the WLTR masonry robot, the Okibo EG7 plastering and painting robot, the Legend Robot Tile Laying Robot for ceramic floor installation, and the Legend Robot Floor Grinding Robot for floor surface preparation. For each system, the technical specifications are characterized, productivity is compared against manual and traditional methods, and a comparative economic analysis is developed based on construction scenarios representative of the Portuguese market. Each subchapter closes with a general analysis of robots, summarizing the advantages, limitations and decision criteria for the adoption of each technology. The fifth chapter synthesizes the main conclusions of the research and identifies future development perspectives in the field of construction robotization.

The results obtained demonstrate that the robotization of on-site construction processes is technically feasible and economically justifiable for the activities analyzed, with reductions in labor costs ranging from 5% to 93% and execution time savings of between 60% and 85%, depending on the system and the context of application. It is further concluded that the main barriers to adoption in Portugal are not technological in nature, but cultural, organizational and structural, and that the growing shortage of qualified labor gives robotization an unavoidable strategic role in ensuring the sustainability and competitiveness of the sector in the medium and long term.

KEYWORDS: robotization, on-site construction, automation, technical-economic analysis, labour.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS	2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2. ESTADO DE ARTE – A ROBÓTICA NA CONSTRUÇÃO	5
2.1. A ROBÓTICA INDUSTRIAL: DAS ORIGENS À CONSTRUÇÃO	5
2.2. ROBÓTICA DE ALVENARIA E ESTRUTURA	6
2.3. IMPRESSÃO 3D EM BETÃO	9
2.4. ROBÓTICA DE ACABAMENTOS	10
2.5. AUTOMAÇÃO GERAL DE ESTALEIRO	13
2.6. PERSPETIVA FUTURA: ROBÔS HUMANOIDES NA CONSTRUÇÃO	15
2.7. SÍNTESE DO ESTADO DA ARTE	16
3. A INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL E A MÃO DE OBRA EM PORTUGAL	19
3.1. CARACTERIZAÇÃO DO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM PORTUGAL	19
3.2. DIMENSÃO E EXPRESSÃO DO DÉFICE DE MÃO DE OBRA	20
3.3. CAUSAS ESTRUTURAIS DA ESCASSEZ	21
3.3.1 Envelhecimento da População Ativa	21
3.3.2 Baixa Atratividade do Setor para os Jovens	21

3.3.3 Emigração de Trabalhadores Qualificados.....	22
3.4. O PAPEL DA IMIGRAÇÃO E AS SUAS LIMITAÇÕES.....	22
3.5. UMA CRISE PARTILHADA COM O CONTEXTO EUROPEU.....	23
3.6. SINISTRALIDADE LABORAL: UM ARGUMENTO ADICIONAL PARA A AUTOMAÇÃO.....	25
3.7. SÍNTESE DO MERCADO DE TRABALHO NA CONSTRUÇÃO CIVIL EM PORTUGAL.....	26
4. ANÁLISE TÉCNICO-ECONÓMICA.....	27
4.1. ENQUADRAMENTO DA ANÁLISE.....	27
4.2. ALVENARIA - ROBÔ WLTR.....	27
4.2.1 Enquadramento e Seleção do Sistema.....	27
4.2.2 Caracterização Técnica do Sistema WLTR.....	28
4.2.3 Análise Comparativa de Produtividade.....	29
4.2.4 Análise Económica Comparativa.....	29
4.2.5 Análise Geral do Robô.....	31
4.3. REBOCO E PINTURA DE PAREDES - ROBÔ OKIBO EG7.....	32
4.3.1 Enquadramento e Seleção do Sistema.....	32
4.3.2 Caracterização Técnica do Sistema Okibo EG7 / EG7+.....	33
4.3.3 Análise Comparativa de Produtividade.....	34
4.3.4 Análise Económica Comparativa.....	34
4.3.5 Análise Geral do Robô.....	35
4.4. ASSENTAMENTO DE PAVIMENTO CERÂMICO - <i>LEGEND ROBOT TILE LAYING ROBOT</i>.....	37
4.4.1 Enquadramento e Seleção do Sistema.....	37
4.4.2 Caracterização Técnica e Análise Comparativa.....	37
4.4.3 Análise Geral do Robô.....	39
4.5. RETIFICAÇÃO DE PAVIMENTOS - <i>LEGEND ROBOT FLOOR GRINDING ROBOT</i>.....	40

4.5.1 Enquadramento e Seleção do Sistema.....	40
4.5.2 Caracterização Técnica e Análise Comparativa.....	40
4.5.3 Análise Geral do Robô.....	41
4.6. SÍNTESE COMPARATIVA E RECOMENDAÇÕES.....	43
4.6.1 Quadro Comparativo Integrado.....	43
4.6.2 Recomendações para Implementação.....	44
5. CONCLUSÃO.....	47
5.1. CONCLUSÕES GERAIS.....	47
5.2. PERSPETIVAS DE DESENVOLVIMENTO FUTURO.....	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1 - O <i>Motor Mason</i> , em 1967, em ação, com o auxílio de pedreiros (The B1M, 2017).....	7
Fig.2 - A patente norte-americana concedida a <i>Jonh Thomson</i> de uma máquina de assentar tijolos, em 1904 (The B1M, 2017).....	7
Fig.3 - Hadrian X em demonstração (FBR, 2023).....	8
Fig.4 - WLTR Mansory Robot, em demonstração (GreenBuild, 2025).....	8
Fig.5 – Robô EG7, Okibo em demonstraçãoWLTR Mansory Robot, em demonstração (Okibo, 2025)...	11
Fig.6 - Robô Canvas 1200CX em demonstração (Canvas, 2024).....	11
Fig.7 - Tile Laying Robot (Legend Robot, 2025).....	12
Fig.8 – Floor Grinding Robot (Legend Robot, 2025).....	13
Fig.9 – Spot Robot (Intuitive Robots).....	14
Fig.10 – Tesla Optimus Gen 2 – Figure 02 (Tesla, 2023).....	16

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Principais sistemas robóticos aplicados à construção de edifícios	17
Quadro 2 – Evolução do custo de mão de obra na construção civil em Portugal (2022-2025).	20
Quadro 3 – Peso dos trabalhadores estrangeiros na construção civil em Portugal (2014-2023)	23
Quadro 4 - Especificações técnicas do robô de alvenaria WLTR.....	28
Quadro 5 - Comparação de produtividade: alvenaria tradicional vs. WLTR.....	29
Quadro 6 - Análise económica comparativa: alvenaria tradicional vs. WLTR (cenário 5.000 m ²)	30
Quadro 7 - Especificações técnicas do robô Okibo EG7 / EG7+	33
Quadro 8 - Comparação de produtividade: acabamentos manuais vs. Okibo EG7	34
Quadro 9 - Análise económica comparativa: acabamentos manuais vs. Okibo EG7 (cenário 3.000 m ²)	35
Quadro 10 - Especificações técnicas do <i>Legend Robot Tile Laying Robot</i>	37
Quadro 11 - Análise técnico-económica comparativa: assentamento cerâmico manual vs. <i>Tile Laying Robot</i>	38
Quadro 12 - Especificações técnicas e comparação: <i>Floor Grinding Robot</i> vs. método manual.....	40
Quadro 13 - Síntese comparativa das quatro tecnologias robóticas analisadas	43

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

INE - Instituto Nacional de Estatística

FEPICOP - Federação Portuguesa da Indústria da Construção e Obras Públicas

ROI - *Return on Investment*

3D - *Three Dimensional*

Século XX - Século 20, em numeração romana

CAD - *Computer- Aided Design*

SAM100 - *Semi- Automated Mason 100*

WLTR – *Wall Laying TRobot*

FBR - *Fastbrick Robotics*

DST - *Dynamic Stabilisation Technology*

3DCP - *3D Concrete Printing*

EUA – Estados Unidos da América

IA – Inteligência Artificial

IRoP – *Interactive Robot Plastering*

LiDAR – *Light Detection and Ranging*

BIM – *Building Information Modeling*

AMR – *Autonomous Mobile Robots*

TRL – *Technology Readiness Level*

CAGR – *Compound Annual Growth Rate*

ISO – *International Organization for Standardization*

IMPIC – Instituto dos Mercados Públicos do Imobiliário e da Construção

AICCOPN – Associação dos Industriais da Construção Civil e Obras Públicas

PRR – Plano de Recuperação e Resiliência

BEI – Banco Europeu de Investimento

ISCTE – Instituto Superior de Ciências do Trabalho e da Empresa

AIMA – Agência para a Integração, Migrações e Asilo

ELA/EURES – *European Labour Authority/ European Employment Services*

CITB - *Construction Industry Training Board*

ERI – *Economic Research Institute*

N.A – Não Aplicável

SST – Segurança e Saúde no Trabalho

kWh – Quilowatt-hora

mm - milímetros

m² - metros quadrados

Fig. - Figura

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

A indústria da construção civil atravessa um período de transição tecnológica, impulsionada pela necessidade de responder a desafios crescentes de produtividade, segurança, qualidade e sustentabilidade ambiental. Esta metamorfose é catalisada por um volume crescente de investimento no setor e pela urgência em alinhar as práticas correntes em obra com os padrões exigentes da engenharia moderna. Historicamente caracterizado por processos intensivos em mão de obra, baixos níveis de automação e elevada sinistralidade laboral, o setor tem vindo a evidenciar uma progressiva abertura à adoção de tecnologias robóticas e sistemas automatizados no contexto dos seus processos construtivos on-site.

A nível global, a robótica aplicada à construção - em particular, à construção de edifícios - tem registado avanços significativos nas últimas décadas, abrangendo um vasto conjunto de aplicações: desde sistemas de impressão 3D em betão, que permitem a construção de elementos estruturais de geometria complexa com reduzida intervenção humana, até robôs especializados em operações de alvenaria, capazes de assentar blocos e tijolos com maior precisão e velocidade do que os métodos tradicionais. Paralelamente, surgem soluções robóticas dedicadas a tarefas de acabamento, nomeadamente pintura de superfícies, projeção de reboco e aplicação de revestimentos, bem como plataformas autónomas de monitorização da obra e logística de estaleiro. Numa perspetiva mais futurista, emergem ainda os robôs humanoides como potenciais operadores em ambientes de construção, capazes de executar tarefas de maior complexidade e adaptabilidade.

Em Portugal, e no contexto europeu mais alargado, a adoção destas tecnologias ainda se encontra numa fase relativamente embrionária, não obstante o crescente interesse demonstrado por empresas construtoras, promotores imobiliários e entidades públicas. Fatores como o elevado custo inicial de aquisição e implementação, a adaptação aos regulamentos de segurança, a necessidade de formação especializada de recursos humanos e a resistência cultural à mudança constituem barreiras relevantes à disseminação da robótica em obra. A estes desafios acresce uma conjuntura de escassez estrutural de mão de obra qualificada, que confere à robotização um papel estratégico crescente no setor.

Neste enquadramento, a presente dissertação propõe-se a analisar, de forma sistemática e fundamentada, o estado da arte da robotização de processos construtivos on-site, com foco na construção de edifícios, identificando as principais tecnologias disponíveis, as suas aplicações práticas e as condicionantes técnicas e económicas associadas à sua implementação. A investigação incide sobre cinco domínios principais: robôs para trabalhos de alvenaria e estrutura, sistemas de impressão 3D em betão, robôs para operações de acabamento (pintura, reboco e revestimentos), plataformas de automação geral de estaleiro e uma visão futurista sobre a introdução de robôs humanoides na construção.

O trabalho desenvolvido ao longo desta dissertação foi maioritariamente realizado em ambiente empresarial, no âmbito de uma colaboração que permitiu o contacto direto com a prática profissional em ambiente técnico especializado. A empresa, sediada no Porto, atua nas áreas de construção de edifícios, residenciais e industriais, obras públicas e reabilitações em vários países da Europa.

1.2. MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

A motivação para o desenvolvimento desta dissertação reside, em primeiro lugar, na crescente relevância que a robotização assume no panorama da construção civil a nível mundial, num momento em que o setor enfrenta pressões simultâneas de escassez de mão de obra qualificada, aumento dos custos de produção e exigências mais rigorosas em matéria de qualidade e segurança no trabalho. A consciência de que Portugal, à semelhança de outros países europeus, se encontra perante um deficit de adoção tecnológica neste domínio justifica a necessidade de estudos aprofundados que orientem a tomada de decisão por parte dos agentes do setor.

Em segundo lugar, a ausência de informação consolidada a nível nacional que combine, de forma integrada, uma análise técnica das soluções robóticas disponíveis com uma avaliação económica comparativa face aos métodos construtivos tradicionais constitui uma lacuna que esta dissertação pretende contribuir para colmatar. A comparação custo-benefício entre a utilização de sistemas robóticos e a mão de obra convencional revela-se um instrumento e indicador fundamental para que as empresas construtoras possam avaliar a viabilidade e o retorno do investimento em automação.

Neste sentido, a presente dissertação tem como objetivos gerais: caracterizar o estado da arte das tecnologias robóticas aplicadas a processos construtivos on-site, focando-se na construção de edifícios, baseando-se em artigos científicos, equipamentos existentes e sistemas em desenvolvimento ou já em uso; identificar e descrever as principais soluções tecnológicas disponíveis no mercado, avaliando as suas capacidades técnicas, limitações e requisitos de implementação em contexto de obra; desenvolver uma análise técnico-económica integrada entre a utilização de sistemas robóticos com os métodos tradicionais com recurso a mão de obra, para um conjunto selecionado de processos construtivos; identificar os principais fatores condicionantes da adoção de soluções robóticas no setor da construção em Portugal, incluindo barreiras técnico-económicas, regulamentares e culturais; formular recomendações práticas para a implementação progressiva da robótica em processos construtivos on-site, contribuindo para a modernização e competitividade do setor.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos, estruturados de forma a permitir uma leitura progressiva das etapas percorridas na construção deste trabalho. Os primeiros capítulos têm por objetivo fundamentar teoricamente e contextualizar o leitor sobre o tema da robotização na construção, enquanto o capítulo central, capítulo 4, se foca na análise integrada técnico-económica das soluções apresentadas.

O Capítulo 1, Introdução, contextualiza o tema em estudo, apresentando o enquadramento geral da robotização na construção civil, as motivações que estiveram na origem desta investigação e os objetivos que se pretendem atingir, bem como a estrutura global do documento.

O Capítulo 2, Estado da Arte, procede a uma revisão bibliográfica abrangente sobre a robótica aplicada à construção de edifícios, baseada em artigos científicos e na análise de equipamentos e sistemas já em uso ou em fase de desenvolvimento. São abordadas a evolução histórica das tecnologias, os sistemas existentes para cada domínio de aplicação e as tendências de investigação e desenvolvimento a nível mundial.

O Capítulo 3, O Mercado de Trabalho na Construção Civil em Portugal, analisa a situação atual do mercado laboral no setor da construção em Portugal, documentando a escassez de mão de obra

qualificada, o envelhecimento da população ativa, a diminuição do número de trabalhadores especializados e as projeções demográficas futuras. Este capítulo estabelece o contexto socioeconómico que torna a robotização como uma forte e possível resposta estratégica, recorrendo a dados do INE, Eurostat, FEPICOP e outros organismos setoriais.

O Capítulo 4, Análise Técnico-Económica, constitui o núcleo central da dissertação. Para um conjunto selecionado de atividades construtivas, são caracterizadas em detalhe as principais plataformas e sistemas robóticos disponíveis no mercado, avaliando as suas especificações técnicas, capacidades operacionais, requisitos de integração em estaleiro, e desenvolvida simultaneamente uma análise comparativa de custo-benefício face à mão de obra tradicional. São analisados indicadores como a produtividade, custos de investimento e operação, retorno do investimento (ROI) e impacto nos custos globais da obra. Os resultados obtidos são discutidos ao longo deste capítulo, identificando as principais condicionantes à adoção da robótica no contexto português e formulando recomendações orientadas para empresas construtoras, entidades reguladoras e decisores políticos.

O Capítulo 5, Conclusões, sintetiza as principais conclusões da investigação, avalia o grau de cumprimento dos objetivos propostos e aponta perspetivas de desenvolvimento futuro no domínio da robotização de processos construtivos on-site.

2

ESTADO DE ARTE – A ROBÓTICA NA CONSTRUÇÃO

2.1. A ROBÓTICA INDUSTRIAL: DAS ORIGENS À CONSTRUÇÃO

A utilização de robôs em contexto industrial não é um fenómeno recente. As suas raízes remontam à segunda metade do século XX, quando a crescente mecanização da produção industrial, aliada ao desenvolvimento da computação e da eletrónica, criou as condições para o surgimento das primeiras máquinas verdadeiramente programáveis. Em 1961, *George Devol* e a sua empresa *Unimation* introduziram o *Unimate*, considerado o primeiro robô industrial, instalado numa fábrica da *General Motors*, em *New Jersey*, nos EUA, para realizar operações de fundição sob pressão, tarefas perigosas, repetitivas e fisicamente exigentes que os trabalhadores humanos executavam em condições adversas. Este momento fundador marcou o início de uma transformação que, nas décadas seguintes, se alastrou progressivamente a toda a indústria transformadora.

Ao longo do final dos anos 1960 e início dos anos 1970, à medida que a necessidade de automatizar tarefas intensivas em mão de obra aumentava, o foco da robótica industrial deslocou-se do simples levantamento de cargas pesadas para o manuseamento de materiais e trabalhos de precisão, originando o desenvolvimento de robôs elétricos de menor dimensão com controlos avançados, microprocessadores, motores miniaturizados, ideais para tarefas de montagem mais ligeiras. No final dos anos 1970, as capacidades dos robôs expandiram-se ainda mais para incluir tarefas como transferência de materiais, pintura e soldadura por arco, passando também a assumir operações perigosas em instalações industriais, em siderurgias, por exemplo, os robôs eram utilizados para movimentar peças e materiais em ambientes de temperatura elevada, inacessíveis aos humanos, melhorando significativamente a segurança e libertando trabalhadores qualificados para operações de maior valor acrescentado.

O ritmo de adoção foi exponencial: o número de robôs industriais em operação nos Estados Unidos da América cresceu de cerca de 200 em 1970 para quase 4.000 uma década depois, atingindo 1,6 milhões em 2015. Hoje, pelo menos 3,5 milhões de robôs industriais operam em fábricas de todo o mundo, com instalações anuais a baterem recordes históricos. Os setores automóvel, eletrónico e de produção de máquinas foram os grandes motores desta expansão, beneficiando de uma característica essencial que favorece a automação: ambientes de produção altamente estruturados, com tarefas repetitivas, espaços controlados e produtos standardizados.

É precisamente neste ponto que a construção civil se distingue e se atrasa. Os estaleiros de construção são ambientes dinâmicos e imprevisíveis. Ao contrário das instalações industriais controladas, variam em layout, terreno, condições meteorológicas e outros fatores que complicam a automação. Os robôs têm um desempenho excelente em ambientes repetitivos e standardizados, mas debatem-se com a variabilidade inerente aos projetos de construção. A este fator acresce a fragmentação do setor, dominado por pequenas e médias empresas com margens apertadas e reduzida capacidade de investimento em tecnologia, bem como a irregularidade da procura, a diversidade de tipologias construtivas e a ausência histórica de pressão concorrencial que, noutras indústrias, funcionou como catalisador da automação.

Enquanto o emprego de robótica ganhou expressão em setores como o da manufatura, a sua aplicação na construção permanece sub-investigada e com um potencial por realizar, sendo necessários estudos mais abrangentes para enquadrar a adoção eficaz de tecnologias robóticas no setor. O relatório da *International Federation of Robotics* de 2023 sobre o crescimento do stock operacional de robôs em todas as indústrias nem sequer menciona a construção, uma omissão que é, por si só, reveladora do fosso que separa este setor dos restantes.

Porém, vários fatores convergentes têm vindo a alterar este panorama com uma velocidade crescente. A escassez estrutural de mão de obra qualificada, tema do capítulo seguinte, o aumento dos custos laborais, a maturação tecnológica dos sistemas robóticos e a redução dos seus custos de aquisição, a par de uma crescente pressão para aumentar a produtividade e reduzir os prazos de construção, configuram hoje um conjunto de incentivos sem precedentes para a adoção de automação no setor. O relatório da Federação Europeia da Indústria da Construção de 2023 ilustra bem esta pressão: 81% das empresas reportam preocupação com o aumento dos preços dos materiais e da energia, enquanto 67% enfrentam dificuldades devido à escassez de trabalhadores qualificados, fatores que, em conjunto, estão a acelerar a procura de soluções robóticas.

É neste contexto, de atraso histórico face a outras indústrias, mas de aceleração recente impulsionada por pressões estruturais inéditas, que se enquadra o presente Estado da Arte. Os subcapítulos seguintes apresentam uma revisão das principais tecnologias robóticas atualmente disponíveis para aplicação na construção de edifícios, organizadas por domínio de intervenção.

2.2. ROBÓTICA DE ALVENARIA E ESTRUTURA

A alvenaria é uma das atividades construtivas mais antigas e trabalhosas da construção de edifícios, caracterizada pela sua natureza repetitiva, pelo esforço físico elevado que impõe aos trabalhadores e pela variabilidade de qualidade inerente à execução manual. Estas características tornaram esta arte um alvo natural para a investigação em automação, tendo surgido as primeiras patentes de máquinas de assentamento de tijolos ainda no início do século XX. No entanto, apenas nas últimas duas décadas

emergiram sistemas verdadeiramente operacionais, impulsionados pelos avanços tecnológicos, robótica de braço articulado e integração com modelos CAD.

Um dos marcos históricos neste domínio foi o desenvolvimento do *Motor Mason* nos anos 1960 (Figura 1 e 2), uma das primeiras tentativas de mecanizar o processo de assentamento de alvenaria. Contudo, foi apenas em 2015 que a empresa norte-americana *Construction Robotics* lançou o SAM100 (*Semi-Automated Mason*), considerado o primeiro sistema de alvenaria robótica comercialmente disponível para aplicação *on-site*. O SAM100 opera em conjunto com um operário humano, que supervisiona o processo e assegura o fornecimento de material, sendo capaz de atingir uma produção diária contínua de até 3.000 tijolos, em comparação com os 500 a 800 tijolos típicos de um assentador experiente. O sistema integra um tapete rolante de alimentação de tijolos, um braço robótico para aplicação de argamassa e posicionamento, e sensores de alinhamento para garantir o nível e a verticalidade das fiadas.



Fig.1 - O *Motor Mason*, em 1967, em ação, com o auxílio de pedreiros (The B1M, 2017).

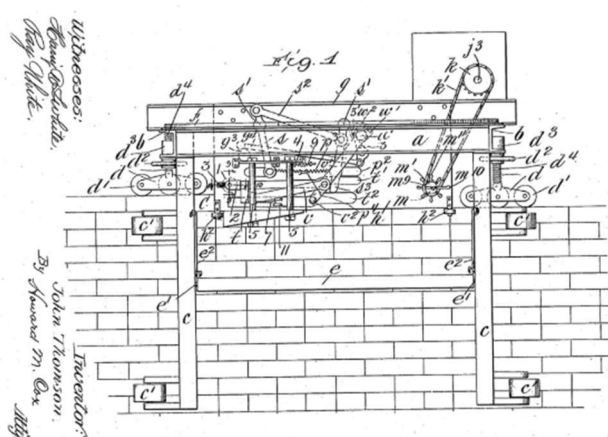


Fig. 2 - A patente norte-americana concedida a *Jonh Thomson* de uma máquina de assentar tijolos, em 1904 (The B1M, 2017).

Com uma abordagem distinta, a empresa australiana FBR (anteriormente designada *Fastbrick Robotics*) desenvolveu o *Hadrian X*, um sistema de assentamento totalmente autónomo montado sobre um veículo de transporte. O *Hadrian X* utiliza um braço telescópico com 32 metros de extensão, dotado de Tecnologia de Estabilização Dinâmica (DST) patenteada, que compensa em tempo real os efeitos do

vento e das vibrações para garantir o posicionamento preciso de cada bloco. O sistema opera a partir de um modelo CAD, convertendo automaticamente o projeto de uma parede em metadados de blocos com coordenadas exatas. Em vez de argamassa tradicional, utiliza um adesivo de construção de elevada resistência, com tempo de cura inferior a 45 minutos. Em testes realizados em 2023, o *Hadrian X* (Figura 3) registou taxas superiores a 300 blocos por hora, com capacidade de construção de estruturas de três andares a partir do nível do solo e operação contínua em múltiplos turnos.

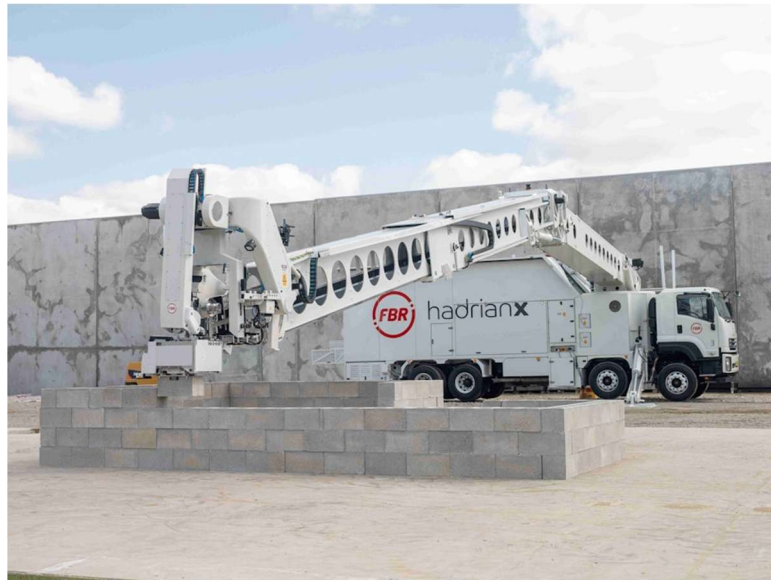


Fig. 3 - *Hadrian X* em demonstração (FBR, 2023).

Na Europa, destaca-se o robô de alvenaria WLTR, desenvolvido para aplicação em projetos residenciais e industriais. O WLTR (Figura 4) posiciona-se como uma solução de produtividade intermédia, com a vantagem de conseguir operar em compartimentos de menor dimensão, capaz de assentar 10 m² de parede por hora e atingir alturas de até 3,50 metros sem necessidade de reposicionamento externo, deslocando-se de forma autónoma ao longo da parede. Controlado por tablet, o sistema opera a partir de um modelo virtual de parede e requer apenas um operário de apoio para abastecimento de paletes de tijolos e execução de tarefas complementares, como o corte de peças especiais.

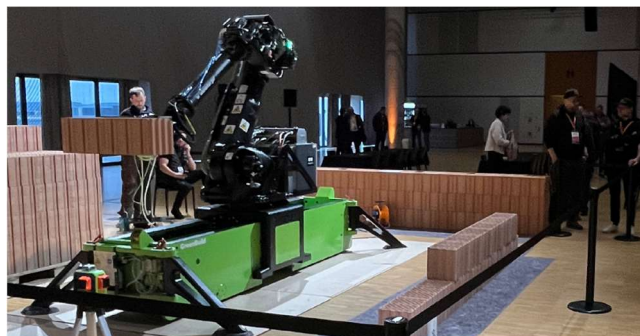


Fig.4 - *WLTR Mansory Robot*, em demonstração (GreenBuild, 2025).

Do ponto de vista académico, a investigação neste domínio tem avançado significativamente, com trabalhos que exploram a integração de visão computacional para o manuseamento de tijolos com geometrias não uniformes e o posicionamento em superfícies de curvaturas complexas. Grupos de investigação como o *Gramazio & Kohler Research*, do ETH Zurique, têm desenvolvido sistemas de fabricação digital que permitem a construção de formas arquitetónicas não *standard* através de robôs colaborativos, demonstrando o potencial da alvenaria robótica para além das geometrias convencionais.

Em síntese, os sistemas de alvenaria robótica disponíveis atualmente apresentam vantagens evidentes em termos de produtividade, consistência dimensional e redução da sinistralidade laboral, mas enfrentam ainda limitações no que respeita à flexibilidade de adaptação a geometrias não ortogonais, ao custo de aquisição e operação e à necessidade de condições e dimensões mínimas dos espaços a intervir, bem como o nivelamento das superfícies de trabalho.

2.3. IMPRESSÃO 3D EM BETÃO

A impressão 3D em betão (3DCP - *3D Concrete Printing*) representa uma das inovações mais disruptivas no panorama da construção contemporânea, com o potencial de transformar profundamente a forma como os edifícios são concebidos e executados. O processo baseia-se na deposição camada a camada de uma mistura cimentícia extrudida por um bocal, seguindo um percurso programado digitalmente, eliminando ou reduzindo significativamente a necessidade de cofragem tradicional.

Do ponto de vista tecnológico, os sistemas de 3DCP podem ser classificados em três grandes tipologias construtivas: sistemas de pórtico (*gantry*), sistemas de braço robótico industrial e veículos autónomos rebocados. Os sistemas de pórtico, que percorrem trilhos fixos ao longo do espaço de construção, são adequados para estruturas de grande dimensão e elevada velocidade de impressão. Os braços robóticos industriais, por sua vez, oferecem maior flexibilidade geométrica e são particularmente adequados para componentes pré-fabricados e elementos arquitetónicos de geometria complexa. Os sistemas montados em veículos autónomos permitem a mobilidade em estaleiro, mas apresentam maiores desafios de controlo e precisão.

No contexto das aplicações reais documentadas, a impressão 3D em betão tem vindo a ser utilizada sobretudo na construção de habitações unifamiliares de baixo custo, em projetos de emergência social e em estruturas de geometria livre. Em 2018, a empresa ICON (EUA) utilizou impressão 3D para construir a primeira habitação certificada nos Estados Unidos da América, e desde então expandiu a sua atividade para projetos de maior escala, incluindo bairros residenciais completos no estado do Texas. Na Europa, a empresa neerlandesa Apis Cor e o grupo COBOD têm liderado a aplicação desta tecnologia em contexto residencial e comercial, com exemplos em vários países europeus.

Do ponto de vista material, as misturas cimentícias utilizadas na 3DCP exigem um equilíbrio delicado entre fluidez - para garantir a extrudabilidade e a trabalhabilidade durante a impressão — e resistência

inicial - para que cada camada suporte o peso das camadas seguintes sem deformação. A investigação científica tem debruçado sobre o desenvolvimento de formulações otimizadas, incorporando adições como cinzas volantes, sílica de fumo, fibras poliméricas e áridos de dimensão controlada, que permitem melhorar simultaneamente a impressabilidade e as propriedades mecânicas do material endurecido.

Um dos principais desafios técnicos da 3DCP reside na integração de armaduras de reforço, uma vez que o processo de impressão layer-by-layer é incompatível com os métodos tradicionais de colocação de varões de aço. Diversas abordagens têm sido investigadas, incluindo a incorporação de fibras de aço na mistura, a impressão em torno de estruturas metálicas pré-posicionadas e o desenvolvimento de geometrias de parede que por si só conferem resistência estrutural adequada. A resolução satisfatória desta questão é considerada crítica para a generalização da 3DCP a edifícios sujeitos a exigências estruturais mais elevadas.

Em termos económicos, a 3DCP oferece vantagens claras na redução de mão de obra, na eliminação da cofragem e na possibilidade de produzir outro tipo de geometrias sem custo adicional. No entanto, o custo dos equipamentos de impressão, a necessidade de misturas cimentícias especializadas e as exigências de controlo de qualidade em tempo real continuam a ser fatores que limitam a sua adoção generalizada, em particular no contexto europeu, onde os requisitos regulamentares e normativos são mais exigentes.

2.4. ROBÓTICA DE ACABAMENTOS

As operações de acabamento - que incluem a projeção e regularização de rebocos, a pintura de superfícies, o tratamento de juntas de placas de gesso cartonado, a aplicação de revestimentos, entre outros - representam uma fração significativa do custo e do tempo de execução de um edifício, sendo simultaneamente das fases mais intensivas em mão de obra especializada. A automação deste conjunto de tarefas tem registado um avanço considerável na última década, impulsionada pelos progressos em inteligência artificial, visão computacional e sistemas de navegação autónoma em espaços interiores não estruturados.

Um dos segmentos com maior dinâmica de inovação é o da projeção e regularização de argamassas (rebocos). A empresa israelita *Okibo* desenvolveu o robô EG7 (Figura 5), um sistema completamente autónomo, sem fios e sem necessidade de preparação prévia do espaço, que utiliza algoritmos de IA com varrimento 3D em tempo real para modelar o ambiente e guiar o processo de aplicação. O EG7 é capaz de cobrir cerca de 93 m² por hora, opera com bateria própria sem necessidade de bomba externa, cabo elétrico ou ligação à rede, e pode transitar por portas de dimensão standard.



Fig.5 - Robô EG7, Okibo em demonstração (Okibo, 2025).

No domínio do acabamento de placas de gesso cartonado (*drywall finishing*), destaca-se o trabalho da empresa norte-americana Canvas, que desenvolveu robôs semi-autónomos capazes de realizar o acabamento de juntas de gesso cartonado até ao nível 5 - o padrão de qualidade mais elevado da indústria - em colaboração com equipas humanas. O sistema Canvas (Figura 6) projeta o *compound* de junta numa única passagem e realiza a posterior lixagem automática com captura integrada de 99,9% do pó gerado. Segundo dados do fabricante, a solução permite reduzir o tempo de execução do acabamento até 60% e as necessidades de mão de obra em cerca de 40%.



Fig.6 - Robô Canvas 1200CX em demonstração (Canvas, 2024).

Na área da pintura autónoma de interiores, a empresa Okibo oferece igualmente funcionalidade de pintura por projeção integrada no EG7, enquanto concorrentes como a Legend Robot (China) e a PaintJet (EUA) desenvolveram soluções dedicadas à pintura de paredes e tetos interiores com braço articulado e plataforma móvel, capazes de cobrir superfícies a partir de um *footprint* reduzido que permite o acesso a espaços exíguos.

No domínio do assentamento de pavimento cerâmico, a empresa *Legend Robot* comercializa um robô de instalação de peças cerâmicas (*Tile Laying Robot*) (Figura 7) que integra tecnologia de navegação

por laser, sistemas de visão computacional com aprendizagem profunda (*deep learning*) e um sistema de posicionamento em altura, permitindo a realização autónoma de todo o processo de instalação - desde a aplicação da argamassa de cimento-cola até ao transporte e instalação final das peças. Com dimensões compactas de 960×780 mm, o sistema opera com precisão de $\pm 0,1$ mm no alinhamento das juntas e é capaz de manusear peças até 800×800 mm. Em termos de rendimento, o robô equivale ao trabalho de 6 a 8 operários, conseguindo assentar entre 80 a 120 peças por dia em condições de operação *standard*. O sistema é controlado por tablet com interface de toque único, dispensando conhecimentos de programação e requerendo apenas formação básica do operador. A tecnologia anti-empolamento incorporada garante uma taxa de aderência superior à execução manual, e o sistema conta com dupla camada de proteção de segurança - ativa e passiva. Segundo dados do fabricante, o robô foi já aplicado em mais de 1 milhão de metros quadrados de pavimento em projetos na China, abrangendo tipologias residenciais, hoteleiras, comerciais e de escritórios.

No que respeita à preparação de superfícies de pavimento, a mesma empresa disponibiliza igualmente um robô de retificação de pavimentos (*Floor Grinding Robot*) (Figura 8), destinado à preparação automática de superfícies de betão antes da aplicação de revestimentos epoxy, endurecedores ou outros tratamentos superficiais. O sistema realiza de forma totalmente autónoma as operações de retificação e aspiração de pó, com uma taxa de cobertura superior a 95% da área útil e necessitando apenas de um operário de supervisão. O rendimento varia consoante a fase de trabalho: em retificação grosseira, o equipamento atinge entre 800 e 1.000 m²/dia, enquanto em fase de polimento a capacidade sobe para 3.000 a 4.000 m²/dia - valores que representam uma melhoria substancial face aos métodos manuais tradicionais. O robô adapta automaticamente a técnica de retificação ao tipo de superfície, betão, mármore ou pedra, incorporando um sistema eficiente de recolha de pó integrado que elimina um dos principais riscos laborais desta operação. A sua aplicação destina-se sobretudo a grandes superfícies como parques de estacionamento subterrâneos, pavilhões industriais, laboratórios e instalações desportivas.



Fig.7 - Tile Laying Robot (Legend Robot, 2025).



Fig.8 – Floor Grinding Robot (Legend Robot, 2025).

Do ponto de vista científico, a investigação em robótica de acabamentos tem explorado a aplicação de aprendizagem por reforço (*reinforcement learning*) para o treino de robôs em tarefas colaborativas de instalação de elementos de fachada, a robótica interativa de reboco (IRoP) para a criação de superfícies artísticas em obra, e sistemas integrados de projeção e regularização de argamassa, que automatizam sequencialmente a aspersão e o alisamento da superfície numa única passagem. Estudos publicados em revistas como a *Automation in Construction* e a *Journal of Building Engineering* documentam progressos significativos na qualidade geométrica dos acabamentos robóticos, com resultados que satisfazem os requisitos normativos de planeza, verticalidade e espessura.

Em resumo, a robótica de acabamentos apresenta-se hoje como um dos segmentos com maior potencial de penetração a curto prazo no setor, dado que as operações de acabamento são altamente repetitivas, ocorrem em espaços relativamente controlados e constituem um dos principais estrangulamentos em termos de disponibilidade de mão de obra qualificada.

2.5. AUTOMAÇÃO GERAL DE ESTALEIRO

Para além dos sistemas dedicados a tarefas construtivas específicas, a automação do estaleiro de uma obra abrange um conjunto mais amplo de tecnologias orientadas para a gestão logística, a monitorização e inspeção, o transporte de materiais e a segurança em obra. Este conjunto de soluções, frequentemente designado por automação geral de estaleiro, tem vindo a ganhar expressão crescente à medida que os conceitos de estaleiro digital e construção 4.0 se tornam mais operacionais.

No domínio da monitorização e inspeção, os drones constituem a tecnologia com maior grau de adoção atual. Equipados com câmaras de alta resolução, sensores LiDAR e sistemas de posicionamento, os drones permitem a realização de levantamentos topográficos de precisão, a geração de modelos 3D do estado de execução da obra e a comparação automática com o modelo BIM de referência, facilitando o

controlo de conformidade e o avanço de obra. Estudos de caso documentados apontam para ganhos de produtividade na ordem dos 50 a 60% nas operações de monitorização quando comparados com métodos tradicionais de inspeção em campo.

Para além dos drones, robôs terrestres autónomos como o Spot da *Boston Dynamics* têm vindo a ser implementados em estaleiros de construção para fiscalização, captura de dados de progresso de obra e monitorização de segurança. O Spot (Figura 9) é capaz de navegar de forma autónoma em terrenos irregulares, subir e descer escadas e operar em ambientes com condições adversas, transmitindo dados em tempo real para plataformas de gestão de obra.



Fig.9 – Spot Robot (*Intuitive Robots*).

No que respeita ao transporte autónomo de materiais, os *Autonomous Mobile Robots* (AMR) têm vindo a ser adaptados para o contexto de estaleiro, onde realizam tarefas de abastecimento de frentes de trabalho, movimentação de paletes e gestão de inventário de materiais. Em 2024, o mercado global de robótica logística autónoma para a construção foi avaliado em 1,24 mil milhões de dólares, com uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) projetada de 18,3% até 2033, o que evidencia o ritmo acelerado de adoção destas tecnologias. Empresas como a *Komatsu* têm igualmente desenvolvido sistemas de transporte autónomo de terras e materiais a granel em obras de maior escala, com frotas de camiões autónomos que operam sem intervenção humana direta.

A integração destas tecnologias num estaleiro digital pressupõe a existência de plataformas de gestão de dados em tempo real, conectividade 5G ou redes sem fios, e sistemas de coordenação que permitam a operação simultânea e segura de múltiplos equipamentos autónomos. A empresa *ASI Robots*, por exemplo, desenvolveu o sistema *Mobius*, uma plataforma de comando e controlo agnóstica relativamente ao fabricante dos equipamentos, que gere em tempo real frotas heterogêneas de veículos autónomos em contexto de estaleiro. A visão de um estaleiro totalmente autónomo, onde frotas de máquinas coordenadas por IA executam a totalidade das operações construtivas sem intervenção humana direta, começa a deixar de ser ficção científica para se tornar um horizonte tecnológico plausível. Embora a concretização plena deste cenário requeira ainda avanços bastante significativos em inteligência artificial, robótica colaborativa, normalização de interfaces e adaptação regulamentar, os

sistemas disponíveis atualmente já permitem automatizar de forma economicamente viável um conjunto relevante de operações de apoio ao estaleiro.

2.6. PERSPETIVA FUTURA: ROBÔS HUMANOIDES NA CONSTRUÇÃO

Se os sistemas robóticos abordados nos subcapítulos anteriores foram concebidos para automatizar tarefas específicas e repetitivas em contexto de estaleiro, uma nova geração de máquinas começa a emergir com ambições substancialmente mais vastas: os robôs humanoides. Com uma morfologia antropomórfica - dois membros superiores, dois membros inferiores e sistemas sensoriais análogos aos humanos -, estes sistemas foram concebidos para operar em ambientes originalmente projetados para pessoas, sem necessidade de adaptação das infraestruturas existentes. A sua aplicação no setor da construção civil representa uma das fronteiras tecnológicas mais promissoras e simultaneamente mais desafiantes da próxima década.

A investigação científica mais recente, nomeadamente um artigo publicado na revista *Scientific Reports* em dezembro de 2025 por investigadores da Universidade da Florida, enquadra os robôs humanoides como uma resposta potencialmente transformadora aos desafios persistentes da construção civil: escassez estrutural de mão de obra, condições de trabalho perigosas e estagnação da produtividade. O mesmo trabalho identifica como principais desafios técnicos a robustez percetiva em ambientes não estruturados, a locomoção adaptativa em terrenos irregulares, a destreza manual ao nível humano, a aprendizagem contínua em contexto real e a colaboração segura com trabalhadores humanos.

Do ponto de vista do mercado, o setor dos robôs humanoides encontra-se numa fase de expansão acelerada. O mercado global de robôs humanoides foi avaliado em 7,8 mil milhões de dólares em 2025, com projeções que apontam para 181,9 mil milhões de dólares em 2035, correspondendo a uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 37%. O investimento em robôs de uso geral, incluindo humanoides, cresceu cinco vezes entre 2022 e 2024, ultrapassando atualmente mil milhões de dólares anuais, com a maioria dos fundos a concentrar-se em empresas dos Estados Unidos da América e da China.

Entre os sistemas mais avançados atualmente disponíveis destacam-se o **Tesla Optimus Gen 2** (Figura 10), o **Figure 02** - já em operação piloto numa fábrica da BMW na Carolina do Sul -, o **Agility Robotics Digit**, o **Atlas** da Boston Dynamics e o **Unitree G1**. Estes sistemas integram modelos de inteligência artificial avançados, são capazes de operar em turnos de 8 a 20 horas e têm um custo unitário que varia entre os 5.900 e os 100.000 dólares, consoante as capacidades. Apesar destes avanços, a maioria dos projetos de implementação permanece ainda em fase piloto, com os principais desafios a residirem na autonomia de bateria, na segurança de operação em proximidade com humanos e nos custos de aquisição.



Fig.10 – Tesla Optimus Gen 2 – Figure 02 (Tesla,2023).

Na perspetiva da McKinsey, a adoção de humanoides em larga escala na construção poderá estar ainda a uma década de distância, em parte porque estes robôs têm ainda dificuldades em navegar em estaleiros dinâmicos e não estruturados. As aplicações construtivas mais imediatamente viáveis incluem tarefas em ambientes de variabilidade reduzida, como interiores com layouts padronizados, e evoluirão progressivamente para operações de maior complexidade, como instalação de tubagens em espaços confinados, colocação de sensores e movimentação de materiais pesados. A mesma consultora recomenda que as empresas construtoras comecem já a preparar-se para a integração de humanoides, identificando três perfis de adoção possíveis: pioneiro, adotante precoce e implementador seletivo, cada um com diferentes níveis de risco e retorno.

Do ponto de vista regulamentar, a normalização internacional neste domínio está ainda em desenvolvimento. Em maio de 2025, a ISO publicou o rascunho da norma ISO 25785-1, que regula os robôs móveis industriais com estabilidade controlada ativamente, categoria que abrange a maioria dos robôs bípedes industriais, abordando em particular os riscos de segurança associados à perda de equilíbrio em caso de falha de energia.

Os robôs humanoides representam a fronteira mais disruptiva da automação na construção. Embora a sua integração generalizada em estaleiro seja ainda um horizonte de médio a longo prazo, o ritmo de evolução tecnológica e o volume de investimento verificados nos últimos anos sugerem que esta transição poderá ocorrer mais rapidamente do que o previsto. Para as empresas construtoras, a mensagem estratégica é clara: não se trata de saber se os humanoides chegarão ao estaleiro, mas quando, e quem estará preparado para os receber.

2.7. SÍNTESE DO ESTADO DA ARTE

A análise desenvolvida neste capítulo permite concluir que a robotização de processos construtivos on-site é uma realidade em franca progressão, com sistemas comercialmente disponíveis em todos os

domínios analisados - alvenaria, impressão 3D em betão, acabamentos e automação de estaleiro. O Quadro 1 – Principais sistemas robóticos aplicados à construção de edifícios sintetiza os principais sistemas referenciados, as suas características-chave e o seu nível de maturidade tecnológica, TRL (*Technology Readiness Level*), numa escala de 1 (fase de conceito) a 9 (sistema robótico em operação comprovada), indicador desenvolvido no âmbito desta dissertação e com base em literatura científica e dados dos fabricantes.

Quadro 1 - Principais sistemas robóticos aplicados à construção de edifícios

Domínio	Sistema	Empresa / Origem	Tipo de Automação	Produtividade Indicativa	TRL
Alvenaria	SAM100	Construction Robotics (EUA)	Semi-autónomo	Até 3 000 tijolos/dia	TRL 9
	Hadrian X	FBR (Austrália)	Totalmente autónomo	>1.000 blocos/hora	TRL 8
	WLTR	Green.build (Europa)	Semi-autónomo	10 m ² /hora (até 3,5 m altura)	TRL 8
Impressão 3D em Betão	BOD2	COBOD (Dinamarca)	Totalmente autónomo	Estruturas até vários andares	TRL 8
	Vulcan	ICON (EUA)	Totalmente autónomo	Casas completas em 24-48 h	TRL 9
	Braço robótico industrial	Vários fabricantes	Programável	Componentes pré-fabricados	TRL 7
Acabamentos (Reboco / Pintura / Gesso)	Okibo EG7	Okibo (Israel)	Totalmente autónomo	~93 m ² /hora (pintura/reboco)	TRL 9
	Canvas 1200CX	Canvas (EUA)	Semi-autónomo	Redução 60% tempo acabamento	TRL 8

Domínio	Sistema	Empresa / Origem	Tipo de Automação	Produtividade Indicativa	TRL
	MSP-Robot (Mortar Spray & Plaster)	Investigação académica (China)	Totalmente autónomo	10× mais rápido que manual	TRL 6
Automação Geral de Estaleiro	Spot	Boston Dynamics (EUA)	Semi-autónomo	Inspeção e monitorização contínua	TRL 9
	Drones / UAV (DJI Phantom 4 RTK)	DJI e outros (Global)	Autónomo	Levantamento de estaleiro em minutos	TRL 9
	AMR (Autonomous Mobile Robots)	Vários fabricantes	Totalmente autónomo	Transporte contínuo de materiais	TRL 8
	Mobius (gestão de frota autónoma)	ASI Robots (EUA)	Plataforma de controlo	Gestão de frotas mistas autónomas	TRL 8

Nota: Legenda TRL: TRL 8-9 Sistema em uso comercial TRL 6-7 Demonstrado / em comercialização TRL 4-5 Em investigação / protótipo

De forma transversal, identificam-se como principais vantagens dos sistemas robóticos: o aumento de produtividade (frequentemente na ordem de 3 a 10 vezes face à mão de obra manual), a consistência e uniformidade de qualidade, a redução da sinistralidade laboral e a capacidade de operação contínua. Como principais barreiras à adoção generalizada destacam-se: o custo de aquisição e operação dos sistemas, a necessidade de adaptação das condições de estaleiro, a resistência cultural à mudança, a escassez de regulamentação específica e, em alguns casos, as limitações técnicas de adaptação a geometrias ou materiais não standard.

O capítulo seguinte aborda o contexto do mercado de trabalho na construção civil em Portugal, estabelecendo o quadro socioeconómico que confere particular urgência à adoção destas tecnologias no panorama nacional e europeu.

3

A INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL E A MÃO DE OBRA EM PORTUGAL

3.1. CARACTERIZAÇÃO DO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM PORTUGAL

A disponibilidade de mão de obra qualificada constitui um dos fatores mais determinantes para a competitividade e a capacidade produtiva do setor da construção civil. Em Portugal, este fator tem vindo a deteriorar-se de forma progressiva e preocupante, configurando uma crise estrutural que não se resume à conjuntura económica de curto prazo, mas que resulta da convergência de tendências demográficas, sociológicas e laborais de longa duração.

O setor da construção civil ocupa um lugar de relevo na estrutura económica portuguesa, sendo historicamente responsável por uma parcela significativa do emprego nacional, da formação bruta de capital fixo e da dinamização de setores a montante e a jusante, como a indústria de materiais de construção, a engenharia, a arquitetura e o imobiliário. Segundo o relatório do setor da construção publicado pelo IMPIC, o número de títulos de habilitação emitidos e a produção do setor revelam uma tendência de recuperação após o período de forte contração registado entre 2008 e 2014, embora esta retoma não tenha sido acompanhada por um crescimento equivalente do emprego, em particular nos segmentos de maior especialização técnica.

Em 2025, o setor apresenta sinais de estabilização da atividade global: de acordo com um inquérito da AICCOPN divulgado em maio de 2025, cerca de 63% das empresas reportaram uma estabilização da atividade, e aproximadamente 30% manifestaram perspetivas de crescimento para os trimestres seguintes. Porém, este aparente otimismo é ensombrado por um constrangimento que se tem revelado mais limitador do que os próprios custos dos materiais de construção: a falta de mão de obra qualificada.

Segundo Manuel Reis Campos, presidente da AICCOPN, a escassez de trabalhadores constitui atualmente o principal fator de pressão sobre os custos da construção em Portugal. Os dados do INE confirmam esta tendência, registando aumentos consecutivos no custo da mão de obra: 6,3% em 2022, 8,1% em 2023, 8,2% em 2024 e 8,9% em julho de 2025. Estes valores são substancialmente superiores à inflação geral e evidenciam a pressão que a escassez exerce sobre os salários do setor.

Quadro 2 – Evolução do custo de mão de obra na construção civil em Portugal (2022-2025).

Ano	Variação do custo de mão de obra (%)	Variação do valor da inflação geral (%)	Diferencial (pp)
2022	+6,3%	+7,8%	-1,5
2023	+8,1%	+5,3%	+2,8
2024	+8,2%	+2,9%	+5,3
2025 (julho)	+8,9%	+2,2%	+6,7

3.2. DIMENSÃO E EXPRESSÃO DO DÉFICE DE MÃO DE OBRA

A expressão quantitativa do défice de mão de obra no setor da construção civil português é inequívoca e amplamente documentada. De acordo com a AICCOPN, o setor apresenta uma carência estimada entre 80 000 a 90 000 trabalhadores, um valor que o presidente daquela associação classificou como um "problema crítico" e que ameaça comprometer tanto a execução de projetos privados como a concretização das obras financiadas pelo Plano de Recuperação e Resiliência (PRR).

Esta dimensão do défice é corroborada por múltiplas fontes. O inquérito da AICCOPN ao setor, divulgado em 2025, revelou que 86% das empresas de obras privadas e 75% das empresas de obras públicas apontam a escassez de trabalhadores qualificados como o principal constrangimento à sua atividade. O Banco Europeu de Investimento (BEI), no seu *EIB Investment Survey 2023*, refere que 97% das empresas portuguesas de construção identificam a disponibilidade de pessoal qualificado como um fator limitador dos seus planos de investimento, sendo este o valor mais elevado de toda a União Europeia. O INE registou, no primeiro semestre de 2025, um aumento de 38% no número de vagas abertas no setor face ao período homólogo de 2024, o que evidencia a aceleração desta escassez num contexto de procura crescente.

As consequências diretas desta situação são múltiplas e têm impacto transversal em toda a cadeia de valor do setor: atrasos sistemáticos na execução de obras, revisões de orçamentos em alta, dificuldades no cumprimento de prazos contratuais com penalizações associadas e, em última análise, uma redução da capacidade de resposta do setor às necessidades habitacionais e de infraestrutura do país. A plataforma Fixando, que é uma plataforma digital portuguesa que conecta pessoas e empresas a profissionais especializados para a realização de diversos projetos de construção, reportou, em 2024, um aumento de 11% nos pedidos de obras em habitação face ao ano anterior, num período em que a procura já tinha crescido 29%, traduzindo uma pressão da procura que o setor não consegue absorver com a capacidade instalada atual.

3.3. CAUSAS ESTRUTURAIS DA ESCASSEZ

A escassez de mão de obra na construção civil não resulta de um único fator, mas da sobreposição de várias tendências de natureza demográfica, sociológica e económica, que se reforçam mutuamente e cuja resolução exige intervenção em múltiplas frentes.

3.3.1. Envelhecimento da População Ativa

Portugal é o segundo país mais envelhecido da União Europeia, com 24,1% da população com 65 ou mais anos em 2024, segundo o Eurostat, valor apenas superado pela Itália, com 24,3%. Este envelhecimento estrutural repercute-se diretamente no mercado de trabalho, incluindo no setor da construção. Dados setoriais indicam que, entre 2016 e 2024, a idade média dos técnicos de obra (encarregados, arvorados e chefes de equipa) subiu de 40 para 46 anos, e perfis similares de envelhecimento são observados noutras categorias profissionais como oficiais, canalizadores e eletricistas especializados. À medida que estes trabalhadores experientes se aproximam da reforma, a sua substituição por profissionais igualmente qualificados torna-se cada vez mais difícil, criando um risco real de perda de conhecimento técnico acumulado.

Este processo é agravado pela dinâmica demográfica de longo prazo. As taxas de natalidade em Portugal têm registado mínimos históricos, com apenas 12,8% da população na faixa etária dos 0 aos 14 anos em 2024, resultando na terceira percentagem mais baixa de toda a União Europeia. Esta "pirâmide invertida" significa que, na próxima década, haverá sistematicamente mais trabalhadores a sair do mercado de trabalho do que a entrar, aprofundando o défice de mão de obra em todos os setores, com particular incidência nos que dependem de formação técnica especializada.

3.3.2. Baixa Atratividade do Setor para os Jovens

Paralelamente ao envelhecimento da força de trabalho existente, o setor enfrenta sérias dificuldades em atrair novos profissionais. A construção civil é percecionada por muitos jovens como uma atividade fisicamente exigente, com condições de trabalho difíceis, baixa progressão de carreira e exposição a riscos de sinistralidade superiores a outros setores. Esta imagem negativa, associada à concorrência de setores mais atrativos como as tecnologias de informação, as finanças e o turismo, tem afastado os jovens das profissões técnicas da construção.

Esta tendência é visível na redução das inscrições em cursos técnicos e profissionais na área da construção, bem como na diminuição da oferta de aprendizagem no setor. O resultado é uma renovação geracional insuficiente, que alimenta o ciclo vicioso da escassez: menos jovens a entrar, maior pressão sobre os trabalhadores existentes, piores condições percebidas, e consequente menor atratividade para as gerações seguintes.

3.3.3. Emigração de Trabalhadores Qualificados

A emigração de trabalhadores portugueses qualificados para outros países europeus tem sido uma constante nas últimas décadas, com impacto significativo na disponibilidade de mão de obra especializada em Portugal. Segundo o *Portuguese Emigration Factbook 2024*, publicado pelo Observatório da Emigração do ISCTE em novembro de 2025, a emigração portuguesa estabilizou nas cerca de 70 000 saídas anuais, e Portugal é atualmente o 5.º país da União Europeia com maior proporção da sua população emigrada, sendo ultrapassado por países como a Roménia, a Bulgária, a Lituânia e a Croácia, considerados países com tradição migratória muito mais recente que a portuguesa. Em termos absolutos, estima-se que em 2024 cerca de 1,8 milhões de portugueses residissem permanentemente no estrangeiro, correspondendo a uma taxa de emigração de aproximadamente 17% da população residente, um valor que, para um país da dimensão de Portugal, não tem paralelo no contexto da Europa Ocidental.

Os principais destinos da emigração portuguesa mantêm-se concentrados na Europa: a Suíça, a França, o Luxemburgo e a Espanha são atualmente os destinos preferenciais, tendo o Reino Unido registado uma quebra superior a 40% entre 2022 e 2023, em consequência do Brexit e das novas exigências regulamentares que tornaram este destino menos acessível para trabalhadores europeus. Esta reconfiguração geográfica da emigração não alterou, porém, o seu impacto estrutural sobre o mercado de trabalho nacional: os trabalhadores que emigram são, em regra, indivíduos em idade ativa, com formação técnica e experiência profissional acumulada, cujo afastamento representa uma perda de capital humano que o sistema de formação interno não consegue repor ao mesmo ritmo.

3.4. O PAPEL DA IMIGRAÇÃO E AS SUAS LIMITAÇÕES

Face à escassez de trabalhadores nacionais, o setor da construção civil em Portugal tem recorrido crescentemente à contratação de mão de obra estrangeira para suprir as suas necessidades. Segundo dados do Banco de Portugal referentes a 2023, cerca de 23,2% dos trabalhadores por conta de outrem no setor da construção eram de nacionalidade estrangeira, ou seja, aproximadamente 69 200 trabalhadores, representando o terceiro setor com maior peso relativo de emprego estrangeiro, a seguir à agricultura e ao alojamento e restauração.

Entre 2017 e 2024, o número total de cidadãos estrangeiros a residir legalmente em Portugal quadruplicou, passando de cerca de 422 000 para mais de 1 546 000, segundo dados da AIMA (Agência para a Integração, Migrações e Asilo). Este crescimento expressivo foi em parte canalizado para o setor da construção, onde imigrantes de origem brasileira, angolana, marroquina, peruana e colombiana ocupam hoje uma posição insubstituível na execução de obras em Portugal.

Porém, a dependência da imigração como solução para a escassez de mão de obra enfrenta limitações crescentes. Em 2024 e 2025, o número de trabalhadores estrangeiros a entrar em Portugal caiu de forma acentuada, com as entradas de estrangeiros registados na Segurança Social a diminuírem 35% nos

primeiros oito meses de 2025 face ao período homólogo de 2024. Esta inversão resulta em parte de alterações legislativas que restringiram as vias de entrada de trabalhadores não altamente qualificados, nomeadamente a eliminação das manifestações de interesse e dos vistos de procura de trabalho pelo governo de Luís Montenegro, bem como de uma maior atratividade de outros destinos europeus para os trabalhadores de países de origem.

Em resposta a esta situação, o setor da construção celebrou, em abril de 2025, o Protocolo de Cooperação para a Migração Laboral Regulada, o chamado mecanismo de "via verde" para a imigração, com o objetivo de agilizar a contratação de trabalhadores estrangeiros. Nos primeiros meses de funcionamento, foram submetidos mais de 160 processos de pedido de visto abrangendo 936 profissionais. Ainda assim, o presidente da AICCOPN reconheceu publicamente que este instrumento, sendo relevante, não resolve por si só o problema estrutural da falta de mão de obra.

Quadro 3 – Peso dos trabalhadores estrangeiros na construção civil em Portugal (2014-2023).

Ano	Trabalhadores estrangeiros na construção (milhares)	Peso no total do setor (%)	Total de estrangeiros residentes em Portugal
2014	~25,0	~10%	~395 000
2019	~38,0	~15%	~590 000
2023	~69,2	~23,2%	1 044 000
2024 (estimativa)	~75,0	~24-25%	1 546 521

3.5. UMA CRISE PARTILHADA COM O CONTEXTO EUROPEU

A escassez de mão de obra qualificada na construção civil não é um problema exclusivamente português. Trata-se de um fenómeno transversal a toda a Europa, impulsionado pelas mesmas tendências demográficas e sociológicas, e com uma expressão particularmente aguda nos países da Europa Ocidental. O sexto relatório anual da Autoridade Europeia do Trabalho (ELA/EURES) sobre desequilíbrios no mercado de trabalho mostra um aperto generalizado do mercado laboral em toda a Europa, sendo este fenómeno particularmente evidente nas profissões de construção e engenharia, saúde e tecnologias de informação. Entre as profissões com maior escassez, identificadas em pelo menos três quartos dos países europeus, encontram-se soldadores, profissionais de enfermagem, cozinheiros e eletricistas de construção, uma evidência de que a construção civil integra há vários anos consecutivos a lista de setores com carências crónicas de mão de obra.

Os países europeus enfrentam escassezes particularmente graves de trabalhadores para trabalho manual, nomeadamente pedreiros, carpinteiros, canalizadores, eletricistas, soldadores e serralheiros, profissões concentradas no setor da construção, cujas taxas de oferta de emprego têm vindo a aumentar desde 2017. Este padrão é transversal ao conjunto da Europa, mas assume expressões distintas em cada país, em

função da sua estrutura demográfica, do contexto macroeconómico e das políticas de formação e imigração em vigor.

A Alemanha é, de entre os grandes países europeus, aquele onde a crise de mão de obra na construção assume contornos mais preocupantes. A procura de trabalhadores qualificados excede a oferta de forma particularmente aguda nas energias renováveis e no aquecimento, na enfermagem e cuidados de saúde, na engenharia civil e construção, na hotelaria e no transporte, e as escassezes existentes serão agravadas pelo rápido envelhecimento da população, uma vez que se espera que a população em idade ativa diminua cerca de 9% nos próximos 10 anos. O impacto desta escassez é já mensurável: devido à falta de trabalhadores qualificados, o tempo médio de construção aumentou de 20 para 26 meses, o número de alvarás de construção caiu 43% entre 2021 e 2024, e os custos dos serviços de construção subiram 35% desde 2020. As conclusões habitacionais, que totalizaram apenas 251 000 unidades em 2024, ficam aquém das cerca de 320 000 necessárias anualmente para responder à procura, um deficit acumulado que se tornou num dos principais constrangimentos estruturais da economia alemã.

Face a esta realidade, a Alemanha classificou oficialmente mais de 163 profissões como "profissões de escassez", tendo reformado significativamente a sua legislação de imigração laboral em 2023 e 2024 para facilitar a entrada de trabalhadores estrangeiros qualificados nestas áreas, num reconhecimento explícito de que o mercado de trabalho interno não tem capacidade para suprir as necessidades do setor com recursos exclusivamente nacionais.

No Reino Unido, a crise de mão de obra na construção assume uma dimensão particularmente aguda, amplificada pelo impacto do *Brexit*. Mais de 200 000 trabalhadores europeus deixaram o setor da construção britânico desde 2019, reduzindo significativamente a força de trabalho disponível. O número de pessoas empregadas na construção diminuiu 10,8% desde a pandemia, com o envelhecimento da força de trabalho a agravar o problema, e o *Construction Industry Training Board* (CITB) estima que são necessários 251 500 trabalhadores adicionais até 2028 para responder à procura. Numa perspetiva de longo prazo, estima-se que o Reino Unido necessite de quase um milhão de trabalhadores adicionais na construção até 2032, o que exigiria um aumento de 34% nas taxas de conclusão de aprendizagens profissionais.

O relatório de estatísticas da construção confirma que, para 2024, apesar do crescimento global do emprego, as empresas do setor continuaram a reportar escassez de mão de obra qualificada, com as ofertas de emprego a permanecerem elevadas face aos níveis pré-pandemia, sendo esta escassez atribuída a uma combinação de envelhecimento da força de trabalho, ao impacto do *Brexit* e à redução da oferta de mão de obra europeia. Os salários médios semanais na construção aumentaram 6,9% no ano até novembro de 2024, com pressão adicional esperada nos trimestres seguintes, evidenciando o impacto direto da escassez nos custos laborais.

Em França, em 2024, os grupos profissionais com maior incidência de escassez foram os profissionais técnicos de ciências e engenharia, os trabalhadores da construção e ofícios relacionados (excluindo eletricitistas) e os trabalhadores de metalomecânica, com a construção a figurar como um dos setores com

maiores dificuldades de recrutamento e perspectivas de declínio de emprego nos próximos anos. A particularidade francesa reside na dimensão das obras de reabilitação energética previstas no âmbito dos objetivos climáticos europeus, que exigem perfis técnicos especializados em isolamento, sistemas de climatização de baixa energia e instalação de painéis fotovoltaicos, profissões que já hoje escasseiam e cuja procura se prevê que aumente substancialmente na próxima década.

A análise comparativa dos principais países europeus permite identificar um padrão comum: os jovens têm uma presença limitada nas profissões com escassez de trabalhadores, o que levanta preocupações sobre o que acontecerá quando os trabalhadores mais velhos se reformarem, e as mulheres representam apenas 29% dos trabalhadores em profissões com escassez, especialmente em campos de domínio masculino como a construção e a engenharia, o que significa que o alargamento do recrutamento a grupos sub-representados, embora desejável, tem limites estruturais na construção que não se resolvem a curto prazo.

Esta convergência de tendências tem um significado estratégico direto para a presente dissertação: a pressão demográfica sobre o mercado de trabalho da construção não é uma anomalia conjuntural, mas uma tendência estrutural de longo prazo que afetará toda a Europa nas próximas décadas. A robotização e a automação de processos construtivos surgem, neste contexto, não apenas como uma opção de modernização tecnológica, mas como uma resposta estratégica necessária para garantir a sustentabilidade e a capacidade produtiva do setor a médio e longo prazo, tanto em Portugal como no conjunto Europeu.

3.6. SINISTRALIDADE LABORAL: UM ARGUMENTO ADICIONAL PARA A AUTOMAÇÃO

Para além da escassez quantitativa de mão de obra, o setor da construção civil é historicamente um dos mais perigosos em termos de sinistralidade laboral, o que constitui um argumento adicional, e frequentemente subestimado, a favor da robotização. O Sindicato da Construção de Portugal reportou 54 acidentes mortais no setor em 2022, e 27 em 2023, uma redução de 50% que, ainda assim, representa uma das taxas de mortalidade laboral mais elevadas de toda a economia portuguesa.

Um dado particularmente revelador das distorções provocadas pela escassez de mão de obra foi partilhado pelo Sindicato da Construção: em 2022, um dos acidentes mortais envolveu um operário de 72 anos, numa obra em Fafe. "Há pessoas com 75 anos a trabalhar, dadas as baixas reformas. Nunca isto aconteceu no setor da construção", denunciou o presidente da organização, Albano Ribeiro. Esta realidade, trabalhadores muito acima da idade normal de reforma a executar tarefas fisicamente exigentes e de risco elevado, é simultaneamente um indicador da gravidade do défice de mão de obra e um argumento forte para a substituição progressiva de operações perigosas por sistemas automatizados.

Tarefas como o assentamento manual de alvenaria em altura, a projeção de argamassa a pressão, a pintura de fachadas em andaimes e a retificação de pavimentos geram exposições profissionais significativas a riscos músculo-esqueléticos, respiratórios e de queda, que os sistemas robóticos

eliminam ou reduzem de forma substancial. A automação surge assim não apenas como uma resposta à escassez de trabalhadores, mas como um instrumento de promoção da segurança e saúde no trabalho, uma dimensão de valor que vai além dos indicadores económicos convencionais.

3.7. SÍNTESE DO MERCADO DE TRABALHO NA CONSTRUÇÃO CIVIL EM PORTUGAL

A análise desenvolvida neste capítulo permite traçar um quadro claro e preocupante do mercado de trabalho na construção civil em Portugal. O setor enfrenta um défice estrutural de mão de obra estimado entre 80 000 e 90 000 trabalhadores, resultante da convergência de múltiplos fatores: o envelhecimento acelerado da população ativa, a baixa atratividade do setor para as novas gerações, a emigração de trabalhadores qualificados e as limitações crescentes da imigração como mecanismo de substituição. Este défice tem consequências diretas nos custos, com aumentos anuais do custo de mão de obra entre 6% e 9% desde 2022, nos prazos e na qualidade da construção.

O contexto europeu confirma que esta não é uma particularidade portuguesa, mas um desafio partilhado por toda a indústria da construção no continente, com expressão especialmente grave nos países com maior envelhecimento demográfico, categoria em que Portugal ocupa uma posição de relevo. A sinistralidade laboral acrescenta uma dimensão ética e de responsabilidade social à equação, reforçando a urgência de alternativas tecnológicas para as tarefas mais perigosas.

Face a este quadro, a robotização de processos construtivos on-site não se apresenta como uma escolha opcional de modernização, mas como uma necessidade estratégica de resposta a uma escassez que o mercado de trabalho, por si só, não conseguirá resolver. O capítulo seguinte analisa as soluções tecnológicas disponíveis e a sua viabilidade técnico-económica no contexto específico da construção de edifícios em Portugal.

4

ANÁLISE TÉCNICO-ECONÓMICA

4.1. ENQUADRAMENTO DA ANÁLISE

O presente capítulo constitui o núcleo central desta dissertação e tem por objetivo desenvolver uma análise integrada das dimensões técnica e económica de quatro sistemas robóticos selecionados para aplicação em processos construtivos on-site na construção de edifícios. A seleção das atividades - alvenaria, acabamentos de reboco e pinturas, assentamento de pavimentos cerâmicos e retificação de pavimentos - foi orientada por critérios de representatividade no processo construtivo, intensidade em mão de obra, disponibilidade de sistemas comercialmente maduros e potencial de aplicação em contexto empresarial português.

Para cada atividade, a análise estrutura-se em três componentes: (i) caracterização técnica aprofundada do sistema robótico; (ii) análise comparativa de produtividade face aos métodos tradicionais; e (iii) análise económica comparativa, com custos de investimento, operação e retorno do investimento. Cada subcapítulo encerra com uma discussão crítica de vantagens, limitações e critérios de decisão.

Os dados utilizados foram obtidos de publicações científicas indexadas, relatórios técnicos de fabricantes e estudos de caso documentados. Os valores salariais de referência para Portugal foram extraídos das bases *Salary Expert* e ERI (2025), com fator de encargos sociais de 35%. Todos os custos de aquisição são expressos em euros a preços de 2025, com conversão EUR/USD à taxa média de 1,08.

4.2. ALVENARIA - ROBÔ WLTR

4.2.1. Enquadramento e Seleção do Sistema

A tarefa de alvenaria representa entre 8% e 15% do custo total de mão de obra numa obra de habitação coletiva corrente em Portugal. Trata-se igualmente de uma das atividades com maior risco músculo-esquelético, dada a repetição dos movimentos, o peso dos materiais e as posições corporais frequentemente adotadas.

Para esta análise, selecionou-se o robô WLTR - *Wall Laying TRobot*, desenvolvido pela empresa europeia *Green.build*, em detrimento do SAM100 e do Hadrian X. Esta escolha justifica-se uma vez que o WLTR foi concebido especificamente para o mercado europeu, com dimensões adaptadas a espaços

interiores de compartimentos menores, permitindo que, a sua adaptação a edifícios de habitação coletiva de dimensão corrente em Portugal e a compatibilidade com materiais de alvenaria correntes no mercado europeu, sem exigir blocos de geometria especial, facilite a integração em obras em Portugal.

4.2.2. Caracterização Técnica do Sistema WLTR

Quadro 4 - Especificações técnicas do robô de alvenaria WLTR

Ano	Valor / Descrição
Fabricante	<i>Green.build</i> (Europa)
Tipo de automação	Semi-autónomo (colaborativo)
Rendimento	10 m ² /hora de parede assentada
Altura máxima de trabalho	3,50 m (sem reposicionamento externo)
Materiais compatíveis	Blocos cerâmicos e de betão, tijolo burro, tijolo furado, etc...
Interface de controlo	Tablet (sem programação - modelo de parede)
Precisão de posicionamento	± 1 mm em alinhamento e nível
Mão de obra necessária	1 operário de apoio por robô
Custo de aquisição estimado	~200.000 – 250.000 € (estimativa de mercado, 2025)
Modalidade alternativa	Leasing operacional (~4.500 €/mês)
TRL	TRL 8 - Sistema em uso comercial na Europa

4.2.3. Análise Comparativa de Produtividade

No método manual tradicional, um trolha experiente assenta em média 1,0 a 1,5 m²/hora, correspondendo a 8 a 12 m² por dia. Uma equipa típica é composta por 2 trolhas e 1 servente, produzindo 16 a 24 m²/dia. O sistema WLTR apresenta rendimento nominal de 10 m²/hora (80 m²/dia) com apenas 1 operário de apoio. Considerando uma taxa de eficiência de 75-85% em obra real, o rendimento efetivo situa-se entre 60 e 68 m²/dia.

Quadro 5 - Comparação de produtividade: alvenaria tradicional vs. WLTR

Indicador	Método Tradicional	Robô WLTR	Variação	Observações
Rendimento (m²/h)	2,0 - 3,0 m ² /h	10 m ² /h	+333% a +500%	Tradicional: equipa 2 trolhas + 1 servente
Produção por dia (m²/dia)	16 - 24 m ²	60 – 68 m ²	+3,5× a +4×	Tradicional: equipa 2+1; Robô: ef. 75-85%
Mão de obra (trabalhadores)	3 (2 trolhas + 1 servente)	1 operário de apoio	-67%	Redução de 2 postos por frente
Precisão	Variável (±5 -10 mm)	Elevada (±1 mm)	Superior	Impacto positivo em fases seguintes
Resíduos de argamassa	10 – 15% desperdício	~5% desperdício	-50%	Dosagem controlada pelo sistema

4.2.4. Análise Económica Comparativa

A análise considera um cenário representativo: edifício de habitação coletiva com 5.000 m² de paredes de alvenaria. O custo por hora de uma equipa de 6 trabalhadores (4 trolhas + 2 serventes) em Portugal é estimado em ~88 €/hora (trolhas: ~16 €/h; serventes: ~12 €/h, incluindo 35% de encargos sociais), correspondendo a ~704 €/dia.

Quadro 6 - Análise económica comparativa: alvenaria tradicional vs. WLTR (cenário 5.000 m²)

Item de Custo	Método Tradicional	Robô WLTR	Observações
A. Custos de Investimento / Mobilização			
Aquisição do equipamento	-	220 000 € (estimativa)	Amortização 10 anos; alternativa: leasing ~4.500 €/mês ou ~ 150 €/dia
Formação inicial	-	5 000 €	Formação do operador: ~5 dias
B. Custos Operacionais (obra 5.000 m²)			
Duração estimada da obra	~125 dias (equipa 6 pessoas)	~74 dias (1 operário)	Rendimento: Tradicional: ~40 m²/dia; Robô: ~68 m²/dia (ef. 85%)
Custo de mão de obra	88 000 €	22 940 €	Tradicional: 704 €/dia × 125; Robô: 150 €/dia robô + 160 €/dia operário × 74
Manutenção e consumíveis	~800 €	2 200 €	Tradicional: ~1% do valor do custo de MO; Robô: 1% do valor de aquisição após uma obra de 5 000 m²
Amortização por obra	-	~4 400 €	Pressupondo 25 000 m²/ano; vida útil 10 anos
C. Totais e Indicadores			
Custo total de execução (excluindo materiais)	~88 800 €	~29 540 €	Poupança de ~59 000 € para obra de 5.000 m²
Custo por m² executado	~17,76 €/m²	~5,91 €/m²	Redução de ~66% no custo de execução

Item de Custo	Método Tradicional	Robô WLTR	Observações
Prazo de execução da alvenaria	~125 dias	~74 dias	Redução de 51 dias úteis no cronograma de obra

4.2.5. Análise Geral do Robô

Os resultados obtidos na análise económica comparativa são expressivos: a utilização do robô WLTR num cenário de obra de 5 000 m² de alvenaria traduz-se numa poupança de aproximadamente 59 000 € face ao método tradicional, correspondendo a uma redução de ~66% no custo de execução por metro quadrado (de 17,76 €/m² para 5,91 €/m²). A este benefício económico acresce uma redução de 51 dias úteis no prazo de execução da alvenaria, um fator de valor considerável em obras com constrangimentos de cronograma, bem como uma diminuição de 67% da mão de obra necessária por frente de trabalho, passando de uma equipa de 6 trabalhadores para um único operário de apoio. Em termos de qualidade, a precisão de posicionamento de ± 1 mm, a redução do desperdício de argamassa em ~50% e a consistência de execução ao longo de toda a obra reforçam o perfil técnico do sistema.

Não obstante estes resultados, a adoção do WLTR por parte das empresas construtoras portuguesas enfrenta um conjunto de obstáculos reais que importa reconhecer e ponderar.

A primeira limitação de natureza técnica prende-se com a heterogeneidade das tarefas de alvenaria em obra. A execução de alvenaria raramente se resume a panos lineares contínuos: cortes de peças, fechos de vão, cunhais, caixas de estores, remates em zonas de pilares/ lajes e peças especiais de diversas tipologias representam uma parte significativa do volume de trabalho e exigem, na sua grande maioria, intervenção manual. O robô WLTR opera com elevada eficiência em troços de parede de geometria regular e comprimento contínuo, mas a sua produtividade reduz-se substancialmente quando confrontado com a variabilidade típica de um estaleiro de uma obra de edifícios de habitação, onde a proporção de "metros de detalhe" face a "metros de produção" é frequentemente mais elevada do que as tabelas de rendimento sugerem.

Uma segunda barreira relaciona-se com o estado de digitalização dos projetos de arquitetura e especialidades em Portugal. O robô WLTR funciona a partir de um modelo virtual de parede introduzido no sistema, o que pressupõe a disponibilidade de projetos detalhados em formato digital, com a localização e tipologia de cada elemento de alvenaria previamente definida. Na realidade do mercado nacional, uma parte significativa das obras ainda é executada a partir de peças desenhadas em formatos não parametrizados ou com um nível de detalhe insuficiente para a alimentação direta do sistema robótico. Esta lacuna digital implica um esforço adicional de modelação e preparação de informação que, em obras de menor dimensão, pode anular parte dos ganhos económicos identificados.

A terceira barreira é de natureza cultural e organizacional. O setor da construção em Portugal caracteriza-se por uma inércia tecnológica historicamente elevada, onde a introdução de novas metodologias enfrenta resistência por parte de encarregados, subempreiteiros e até de direções de obra habituadas a processos estabelecidos. A robotização da alvenaria implica uma reorganização das sequências de trabalho, da logística de estaleiro e da gestão de equipas que exige um esforço de mudança que muitas empresas não estão ainda preparadas para assumir.

Por último, subsistem incertezas relevantes quanto às condições de utilização do WLTR em contexto português: a rede de suporte técnico e manutenção disponível em Portugal ou em Espanha é ainda limitada, as condições de garantia do equipamento carecem de clarificação para o mercado nacional, e a experiência acumulada de aplicação do sistema em tipologias construtivas e materiais correntes em Portugal é, até à data, escassa. Estes fatores de imprevisibilidade aumentam o risco percebido pelas empresas e constituem um travão relevante à decisão de investimento, em particular para construtoras de média dimensão que não dispõem de departamentos técnicos com capacidade para gerir a curva de aprendizagem associada à adoção de uma tecnologia nova.

Em síntese, o WLTR apresenta um caso económico sólido e um potencial de criação de valor real em obras de habitação coletiva de média e grande dimensão. Porém, a sua adoção generalizada em Portugal depende não apenas da maturação tecnológica do produto, mas também da progressiva digitalização dos projetos de construção, do desenvolvimento de uma rede de suporte técnico local e de uma mudança cultural no setor que valorize a inovação como fator de competitividade. O caminho mais provável de adoção passará por projetos-piloto em construtoras com maior apetência tecnológica, cujos resultados documentados possam servir de referência para uma disseminação gradual e fundamentada.

4.3. REBOCO E PINTURA DE PAREDES - ROBÔ OKIBO EG7

4.3.1. Enquadramento e Seleção do Sistema

As operações de reboco e pintura de superfícies interiores são das fases de acabamento mais intensivas em mão de obra e com maior incidência de retrabalho, sendo das tarefas da construção com maior dificuldade de recrutamento. Tratam-se de tarefas altamente repetitivas, com exposição prolongada a poeiras, solventes e posturas de risco, que contribuem para a baixa atratividade destes ofícios junto das novas gerações.

Selecionou-se o robô Okibo EG7 (e a versão EG7+, lançada em dezembro de 2025) pela sua maturidade tecnológica (TRL 9, com mais de 1 milhão de m² executados na Europa), pela plena autonomia sem necessidade de preparação prévia do espaço, e pela versatilidade de aplicações - reboco, pintura e acabamentos de gesso cartonado.

4.3.2. Caracterização Técnica do Sistema Okibo EG7 / EG7+

Quadro 7 - Especificações técnicas do robô Okibo EG7 / EG7+

Parâmetro	Valor / Descrição
Fabricante	Okibo (Israel / EUA - fundada em 2018)
Modelos	EG7 (pintura e reboco interior) / EG7+ (alcance até 7,3 m)
Tipo de automação	Totalmente autónomo (sem preparação prévia)
Rendimento (pintura/reboco)	~93 m ² /hora
Rendimento (acabamento gesso nível 4-5)	Até 5× mais rápido que o método tradicional
Altura máxima de trabalho	EG7: ~3,5 m / EG7+: 7,3 m
Peso / Largura	363 kg / 68,5 cm (passagem em portas <i>standard</i>)
Alimentação	Bateria autónoma 5 kWh - sem cabos, Wi-Fi ou bomba externa
Navegação	IA proprietária + 3D em tempo real (sem BIM ou marcações)
Custo / Comercialização	Modelo de serviço por m ² (preço não divulgado publicamente)
Certificações	CE (IEC 60204-1, EN ISO 12100)
TRL	TRL 9: 1 milhão de m ² executados na Europa (2024)

4.3.3. Análise Comparativa de Produtividade

Na execução manual de reboco projetado, um estucador experiente tem um rendimento médio de 15 a 25 m²/hora incluindo preparação, aplicação e regularização. Em pintura, um pintor cobre 40-60 m²/hora, executando pintura a rolo, valor que sobe para 80-100 m²/hora com pistola de projeção. O Okibo EG7 executa reboco e pintura a ~93 m²/hora de forma constante, sem pausas. Segundo o *Shadow Ventures*, o sistema custa 50% menos que a mão de obra equivalente e pode ser até 10 vezes mais rápido em superfícies grandes e desimpedidas.

Quadro 8 - Comparação de produtividade: acabamentos manuais vs. Okibo EG7

Indicador	Método Manual	Robô EG7	Variação	Observações
Rendimento reboco (m²/h)	15 - 25 m ² /h	~93 m ² /h	+272% a +520%	Inclui aplicação e regularização
Rendimento pintura (m²/h)	40 - 100 m ² /h	~93 m ² /h	-7% a +133%	EG7 consistente; manual muito variável
Acabamento gesso nível 4-5 (m²/dia)	80 - 120 m ² /dia	400 - 600 m ² /dia	Até +5×	Dados <i>Okibo / Hensel Phelps</i> (2025)
Mão de obra necessária	2 estucadores	1 técnico especializado	-100%	Especialização técnica da mão de obra
Exposição a poeiras / solventes	Elevada (risco laboral)	Mínima (operário afastado)	Muito inferior	Vantagem significativa em matéria de SST

4.3.4. Análise Económica Comparativa

O Okibo comercializa-se em modelo de serviço por metro quadrado (sem venda direta com preço público). O *Shadow Ventures* estima que o custo total do serviço corresponde a ~50% do custo da mão de obra manual equivalente. Para efeitos desta análise, o custo do serviço robótico é estimado em 1,50 €/m² (com operador), com base em *benchmarks* de mercado europeu

Quadro 9 - Análise económica comparativa: acabamentos manuais vs. Okibo EG7 (cenário 3.000 m²)

Item de Custo	Método Tradicional	Robô EG7	Observações
Cenário: 3.000 m² de reboco e pintura interior			
Duração estimada	~20 dias (2 estucadores)	~4 dias (1 técnico)	Manual: 20 m ² /h × 8h = 160 m ² /dia; Robô: 93 m ² /h 8h = 744 m ² /dia
Custo de mão de obra	4 480 €	N.A.	Tradicional: 2 estucadores x 14 €/h x 8h = 224€/dia;
Custo do serviço robótico	-	4 500 €	Estimativa: 1,5 €/m ² (serviço com operador)
Custo total de execução (ex-materiais)	4 480 €	4 500 €	
Custo por m² executado	~1,49 €/m ²	~1,50 €/m ²	
Prazo de execução	~20 dias	~4 dias	Redução de 16 dias úteis no cronograma de obra

4.3.5. Análise Geral do Robô

A análise económica comparativa do Okibo EG7 revela um resultado que, à primeira leitura, pode surpreender pela sua proximidade: num cenário de 3 000 m² de reboco e pintura interior, o custo total de execução é praticamente idêntico entre o método tradicional (4 480 €) e o serviço robótico (4 500 €), com um custo por metro quadrado de 1,49 €/m² e 1,50 €/m², respetivamente. Esta equivalência económica não deve, porém, ser interpretada como ausência de vantagem - pelo contrário, significa que, ao mesmo custo, o EG7 executa o trabalho em apenas 4 dias em vez de 20, representa uma redução de 16 dias úteis no cronograma de obra que, em termos de custos fixos de estaleiro, *overhead* e encadeamento de fases construtivas subsequentes, tem um valor económico real e substancial que não está explícito neste cálculo direto.

A vantagem do Okibo EG7 não reside, portanto, numa redução drástica do custo direto de execução, mas num conjunto de benefícios que se revelam tanto mais valiosos quanto maior for a escala da obra e a pressão sobre o prazo de conclusão da mesma: a redução de prazo de 80%, a consistência e uniformidade de qualidade ao longo de toda a superfície, a redução significativa do retrabalho por irregularidades de espessura ou acabamento, e a eliminação praticamente total da exposição dos operários a poeiras e solventes, um fator de crescente relevância no contexto das exigências regulamentares europeias em matéria de saúde e segurança no trabalho.

Não obstante estas vantagens, a adoção do EG7 no mercado português enfrenta constrangimentos específicos que importa analisar com rigor.

O primeiro constrangimento prende-se com o modelo de comercialização. O Okibo não vende o equipamento diretamente, operando exclusivamente em modelo de serviço por metro quadrado. Esta abordagem tem a vantagem de eliminar o investimento inicial em aquisição, mas implica uma dependência estrutural do fornecedor externo e uma menor previsibilidade de custos em contextos de flutuação de procura. Para empresas construtoras habituadas a gerir equipas próprias de estucadores e pintores, a transição para um modelo de prestação de serviço contratado externamente representa uma mudança de paradigma operacional e contratual que pode gerar resistência interna, nomeadamente ao nível da gestão de subcontratação e da integração no planeamento de obra.

O segundo constrangimento é geométrico e espacial. O EG7, com 363 kg de peso e 68,5 cm de largura, consegue entrar em compartimentos de dimensão *standard*, mas o seu rendimento de $\sim 93 \text{ m}^2/\text{hora}$ aplica-se a superfícies contínuas e desimpedidas. Em espaços de geometria irregular, com muitos elementos salientes - condutas, caixas de contador, sancas, molduras, elementos decorativos -, ou em compartimentos de área reduzida com muitos remates, a produtividade efetiva do sistema diminui de forma considerável. A construção portuguesa, em particular no segmento de reabilitação urbana onde a procura é crescente, apresenta frequentemente estas características, limitando os contextos em que o EG7 pode operar à sua capacidade nominal.

Um terceiro aspeto diz respeito à qualificação da mão de obra de operação. Ao contrário do que o conceito de "automação total" pode sugerir, a operação eficiente do EG7 exige um técnico especializado, não um estucador tradicional, mas um operador com formação específica no sistema, capaz de configurar o equipamento, identificar anomalias de funcionamento e gerir a interface digital. Esta competência não existe atualmente no mercado de trabalho português, pelo que a sua formação e retenção constitui um desafio adicional, tanto para a empresa prestadora do serviço como para eventuais utilizadores que equacionem uma modalidade de operação própria no futuro.

Por fim, à semelhança do que foi identificado para o WLTR, subsistem incertezas quanto à disponibilidade de suporte técnico e manutenção em Portugal, às condições de garantia do serviço em caso de avaria durante uma obra em curso, e à adaptação do sistema às especificidades dos materiais de reboco e tinta correntemente utilizados no mercado nacional.

4.4. ASSENTAMENTO DE PAVIMENTO CERÂMICO - *LEGEND ROBOT TILE LAYING ROBOT*

4.4.1. Enquadramento e Seleção do Sistema

O assentamento de pavimento cerâmico exige elevada precisão no alinhamento de juntas, nivelamento das peças a instalar e aplicação homogênea da argamassa de colagem, sendo a qualidade do acabamento um dos elementos mais avaliados pelo cliente final. É também uma das operações mais fisicamente exigentes, com elevado risco de lesões músculo-esqueléticas por posições ajoelhadas prolongadas.

A *Legend Robot Technology*, fundada 2021, desenvolveu o *Tile Laying Robot* com mais de 1 milhão de m² documentados na China, o que justifica a sua análise apesar da ausência de referências europeias consolidadas. A empresa iniciou a sua presença no mercado norte-americano em fevereiro de 2026, sinalizando uma internacionalização em curso.

4.4.2. Caracterização Técnica e Análise Comparativa

Quadro 10 - Especificações técnicas do *Legend Robot Tile Laying Robot*

Parâmetro	Valor / Descrição
Fabricante	<i>Legend Robot Technology</i> (Shenzhen, China)
Tipo de automação	Semi-autónomo (1 técnico especializado + 1 operador de abastecimento de material)
Rendimento	80 – 120 peças/dia
Equivalência em mão de obra	2 a 3 ladrilhadores
Dimensão máxima das peças	800 × 800 mm
Precisão de junta	±0,1 mm
Dimensões do robô	960 × 780 mm
Navegação	Laser + visão computacional (<i>deep learning</i>)

Parâmetro	Valor / Descrição
Sistema anti-empolamento	Integrado - taxa de aderência superior ao manual
TRL (mercado europeu)	TRL 7-8 - Maduro na China; em introdução na Europa

O assentador manual executa em média 10 a 15 m²/dia, em peças de 60×60 cm. Com o Legend Robot, uma equipa de 2 trabalhadores produz 80 a 120 peças/dia - assumindo peças de 60×60 cm (0,36 m² cada), o rendimento diário é de 29 a 43 m. Com peças de 80×80 cm (0,64 m²), o rendimento situa-se entre 51 e 77 m²/dia.

Quadro 11 - Análise técnico-económica comparativa: assentamento cerâmico manual vs. *Tile Laying Robot*

Indicador	Método Manual	<i>Tile Laying Robot</i>	Variação	Observações
Rendimento (peças 60×60, m²/dia)	20 a 30 m ² /dia (2 ladrilhadores + 1 servente)	29 - 43 m ² /dia (2 trabalhadores)	+50 a +75%	Por equipa equivalente
Precisão de junta	±2 - 5 mm	±0,1 mm	Muito superior	Relevante em projetos cuja precisão é prioritária
Taxa de empolamento	2 - 5%	<1%	-60 a -80%	Reduz retrabalho e garantias
Custo de mão de obra (€/m²)	~16 €/m ²	~2 – 4 €/m ²	~-75%	Para obras de grandes dimensões de assentamento cerâmico
Custo estimado aquisição	N.A.	~80 000 a 120.000 €	Amortização ~3 a 5 anos	Estimativa mercado europeu (2025)

4.4.3. Análise Geral do Robô

Os dados da análise comparativa revelam um perfil técnico-económico do *Tile Laying Robot* com características distintas dos robôs anteriormente analisados. O ganho de produtividade face ao método manual é mais moderado do que os casos do WLTR ou do Okibo EG7 - um acréscimo de 50 a 75% face a uma equipa de 3 trabalhadores -, mas a vantagem económica no custo de mão de obra por metro quadrado é das mais expressivas do conjunto analisado: uma redução de ~75% (de ~16 €/m² para 2 a 4 €/m²), que se torna particularmente significativa em obras de grande dimensão com superfícies contínuas de assentamento cerâmico. A precisão de junta de $\pm 0,1$ mm - 20 a 50 vezes superior à execução manual - e a taxa de empolamento inferior a 1% representam vantagens qualitativas objetivas, com impacto direto na redução de retrabalho, em menores custos de garantia pós-obra e num acabamento que corresponde às exigências de projetos de segmento *premium*.

No entanto, o *Tile Laying Robot* é, das quatro tecnologias analisadas, aquela que apresenta o perfil de risco de adoção mais elevado no contexto português, por razões que transcendem a sua viabilidade técnica.

O fator de risco mais imediato é a origem geográfica do produto. A *Legend Robot Technology* é uma empresa chinesa fundada em 2021, com toda a sua base de referências e suporte técnico concentrada no mercado asiático e, mais recentemente, no mercado norte-americano, onde iniciou a sua presença em fevereiro de 2026 na feira CONEXPO. Em Portugal, e na Europa em geral, não existe ainda qualquer rede de distribuição, suporte técnico de pós-venda ou disponibilidade de peças de substituição. Uma avaria do equipamento em obra - situação perfeitamente plausível num ambiente de estaleiro - poderia implicar paragens prolongadas sem solução local disponível, com custos diretos e indiretos difíceis de quantificar antecipadamente. Este risco operacional é um fator de dissuasão relevante para qualquer gestor de obra que ponha em causa o planeamento dos trabalhos.

A segunda limitação prende-se com a adaptação às especificidades do mercado europeu. O *Tile Laying Robot* foi desenvolvido e calibrado para os materiais, argamassas de colagem e tipologias construtivas predominantes na China, que diferem em aspetos relevantes das práticas correntes em Portugal e na Europa - nomeadamente nas formulações de argamassa-cola utilizadas, nos formatos e formatos de junta mais comuns, e nas exigências normativas aplicáveis ao assentamento de revestimentos cerâmicos em pavimentos (EN 13813, EN ISO 10545). A ausência de certificação europeia específica para o processo de assentamento robótico pode colocar questões quanto à responsabilidade do empreiteiro em caso de não conformidade, particularmente em obras sujeitas a fiscalização ou a garantias contratuais de longo prazo.

Um terceiro constrangimento é de natureza operacional e diz respeito à realidade das obras de habitação em Portugal. O *Tile Laying Robot* opera com elevada eficiência em superfícies contínuas e de geometria regular, mas a construção residencial corrente é caracterizada por compartimentos de dimensão reduzida, plantas com muitos elementos singulares e uma proporção elevada de peças de corte e remate

face ao total da superfície. Nestes contextos, o rendimento efetivo do sistema aproxima-se do rendimento manual, diluindo o diferencial de produtividade que justifica o investimento.

Por fim, o custo de aquisição estimado de 80 000 a 120 000 € e um período de amortização de 3 a 5 anos pressupõem volumes anuais de assentamento cerâmico que, na generalidade das empresas construtoras portuguesas de média dimensão, são difíceis de garantir com consistência. O *Tile Laying Robot* implica um investimento direto cujo retorno depende de uma taxa de utilização elevada e continuada, o que o torna mais adequado a grandes construtoras com carteira de obra estável ou a empresas especializadas em revestimentos de pavimentos com volumes de produção relevantes.

Em síntese, o *Tile Laying Robot* é uma tecnologia com potencial real e com um caso económico convincente em contextos de grande escala, mas cuja adoção no mercado português está condicionada pela ausência de suporte local, pelas incertezas de adaptação normativa e pela fragmentação típica das obras nacionais. O cenário de adoção mais realista a curto prazo passaria pela entrada de um distribuidor europeu da *Legend Robot* - preferencialmente ibérico - que estabelecesse uma rede de suporte técnico e conduzisse projetos-piloto documentados em obras de referência, criando as condições de confiança necessárias para que as empresas construtoras portuguesas considerem seriamente este investimento.

4.5. RETIFICAÇÃO DE PAVIMENTOS - *LEGEND ROBOT FLOOR GRINDING ROBOT*

4.5.1. Enquadramento e Seleção do Sistema

A retificação mecânica de pavimentos de betão/ betonilhas é operação obrigatória antes da aplicação de revestimentos epoxy, endurecedores e vernizes em pavimentos industriais e comerciais. É também uma das operações com maior exposição a riscos laborais - nomeadamente a exposição a poeiras finas - e de elevado consumo de tempo em obras de grande área: parques de estacionamento subterrâneos, pavilhões industriais, armazéns e grandes superfícies comerciais.

4.5.2. Caracterização Técnica e Análise Comparativa

Quadro 12 - Especificações técnicas e comparação: *Floor Grinding Robot* vs. método manual

Parâmetro / Indicador	Método Manual	Floor Grinding Robot
Fabricante	N.A.	<i>Legend Robot Technology</i>
Operadores necessários	2 por máquina	1 operário de supervisão

Parâmetro / Indicador	Método Manual	Floor Grinding Robot
Rendimento - retificação	200 a 400 m ² /dia	800 a 1 000 m ² /dia
Rendimento - polimento fino	300 a 500 m ² /dia	3 000 a 4 000 m ² /dia
Taxa de cobertura da área útil	~70 a 80%	>95%
Exposição a poeiras finas	Elevada	Mínima (aspiração integrada; operário afastado)
Navegação e percurso	Manual	Automática (IA + sensores)
TRL	N.A.	TRL 8-9 (uso comercial documentado na China)

Em termos económicos, a vantagem concentra-se em obras de grande área. Para um pavimento de 10 000 m², o robô conclui a fase de polimento fino em 3 a 4 dias vs 20 a 33 dias com equipamento manual operado por 2 trabalhadores - uma redução de 2 a 4 semanas com impacto direto nos custos fixos de estaleiro. Assumindo custo total da equipa de operários de 28 €/hora, a execução manual implicaria ~11 200 € em mão de obra (400 horas/ equipa), vs ~800 € com o robô (1 operador especializado x 200 €/dia x 4 dias), uma redução de ~93% nos custos de mão de obra antes da amortização do robô.

4.5.3. Análise Geral do Robô

Os números da análise económica do *Floor Grinding Robot* são os mais expressivos de todo o capítulo. Num cenário de pavimento de 10 000 m², a redução dos custos de mão de obra atinge ~93%, associada a uma redução de prazo de execução de 3 a 4 semanas. A taxa de cobertura da área útil superior a 95%, face aos 70 a 80% típicos da execução manual, significa ainda que o robô produz mais com menos desperdício de passagens, eliminando as descontinuidades e sobreposições que frequentemente comprometem a uniformidade do acabamento superficial. O rendimento de polimento fino de 3 000 a 4 000 m²/dia - até 8 vezes superior ao método manual - coloca este sistema numa categoria de desempenho que nenhuma alternativa convencional consegue aproximar em grandes superfícies.

A estes benefícios quantitativos acresce uma vantagem qualitativa de particular relevância no contexto laboral atual: a eliminação da exposição dos operários a poeiras finas durante as operações de retificação e polimento. O sistema integrado de aspiração do *Floor Grinding Robot*, que elimina praticamente na fonte a dispersão de poeiras, representa um avanço significativo nesta matéria que vai muito além dos indicadores económicos convencionais.

Dito isto, e à semelhança do que foi identificado para o *Tile Laying Robot*, o *Floor Grinding Robot* partilha a mesma origem geográfica e o mesmo conjunto de incertezas estruturais no que respeita à sua adoção no mercado europeu.

A inexistência de rede de suporte técnico e comercial em Portugal ou em Espanha é o principal obstáculo operacional. Uma paragem não programada do equipamento durante uma obra com prazo contratual - como é frequente nos casos de aplicação deste robô, nomeadamente em empreitadas de pavimentos industriais ou comerciais com datas de entrega definidas - pode ter consequências económicas desproporcionadas face à poupança gerada. A dependência de suporte remoto ou de deslocação de técnicos desde a China ou os Estados Unidos da América torna este risco particularmente difícil de gerir para uma empresa construtora portuguesa.

Uma segunda limitação prende-se com o perfil das obras onde o robô gera valor real. O *Floor Grinding Robot* é inequivocamente mais vantajoso em superfícies contínuas de grande área - parques de estacionamento, pavilhões industriais, armazéns logísticos, grandes superfícies comerciais. Em obras de habitação corrente, onde as superfícies de betonilha por piso e por fogo são reduzidas e fragmentadas por divisões, remates e elementos de instalações técnicas, o rendimento efetivo do sistema cai substancialmente e a vantagem económica dilui-se. Esta concentração de casos de uso limita o universo de obras em que a tecnologia é aplicável no mercado português, que é dominado por edifícios residenciais de média dimensão com estas características.

O terceiro constrangimento é de natureza normativa e de responsabilidade. As operações de preparação de pavimentos industriais e comerciais estão frequentemente associadas a especificações técnicas rigorosas, impondo requisitos de planicidade, rugosidade superficial e resistência à tração que devem ser documentados e garantidos pelo empreiteiro. A ausência de referências normativas europeias específicas para o processo de retificação robótica, e a inexistência de casos de uso documentados em Portugal, coloca questões quanto à aceitação desta metodologia por parte de donos de obra, fiscalizações e seguradoras, em particular em projetos de maior complexidade técnica ou contratual.

Em síntese, o *Floor Grinding Robot* é a tecnologia que apresenta o maior diferencial de desempenho bruto das quatro analisadas, mas também aquela cujo mercado de aplicação em Portugal é mais restrito e cujas barreiras de entrada - suporte técnico, certificação, escala mínima de projeto - são mais difíceis de ultrapassar no curto/ médio prazo. O seu potencial manifesta-se de forma mais clara em grandes empreitadas industriais e logísticas, onde a superfície contínua, o prazo de entrega e os volumes de mão de obra envolvidos criam as condições ideais para que a relação custo-benefício se materialize de forma

inequívoca. Para o segmento residencial e de pequena reabilitação comercial, o valor acrescentado deste sistema é, na prática, limitado.

4.6. SÍNTESE COMPARATIVA E RECOMENDAÇÕES

4.6.1. Quadro Comparativo Integrado

Quadro 13 - Síntese comparativa das quatro tecnologias robóticas analisadas

Dimensão de Avaliação	WLTR (Alvenaria)	Okibo EG7 (Reboco/Pintura)	Tile Laying (Cerâmica)	Floor Grinding (Pavimentos)
Maturidade tecnológica (TRL)	TRL 8	TRL 9	TRL 7-8*	TRL 8-9*
Ganho de produtividade vs. manual	~3,5 a 4×	~4 a 5×	~1,5 a 2×	~6 a 8×
Redução custo de mão de obra	~66%	~5%	~75%	~80 a 90%
Redução de prazo de execução	Moderada (~60%)	Alta (~80%)	Alta (~75%)	Alta (~75-85%)
Impacto SST (segurança)	Moderado	Elevado	Moderado	Muito elevado
Adequação ao mercado português	Boa (origem europeia)	Muito boa (CE; Europa)	Moderada (origem China)	Moderada (origem China)
Dimensão mínima de projeto rentável	>3.000 m ²	>1000 m ²	>1000 m ²	>3.000 m ²
Custo indicativo de investimento	200 000 a 250 000 € (estimativa)	Serviço por m ²	80 000 a 120 000 € (estimativa)	50 000 a 100 000 € (estimativa)

* TRL referente ao mercado europeu. Legend Robot apresenta TRL 9 na China (>1 milhão de m²); no mercado europeu a tecnologia está em fase de introdução (TRL 7-8). Custos Legend Robot: estimativas de mercado (sem preços públicos europeus).

4.6.2. Recomendações para Implementação

A análise técnico-económica desenvolvida ao longo deste capítulo permite formular um conjunto de recomendações orientadas para empresas construtoras portuguesas que equacionem a adoção progressiva de sistemas robóticos nos seus processos construtivos. Estas recomendações não se limitam à dimensão económica, embora esta seja determinante, incorporando igualmente considerações de maturidade tecnológica, risco operacional, adequação ao mercado nacional e capacidade de gestão da mudança organizacional.

A primeira e mais transversal recomendação é a de não encarar a robotização como uma decisão binária de adoção total ou rejeição, mas como um processo gradual de experimentação, aprendizagem e escalonamento. O ponto de partida mais racional para uma empresa construtora portuguesa é o Okibo EG7: trata-se da única tecnologia do conjunto analisado que não exige investimento de capital, opera em modelo de serviço por metro quadrado, dispõe de certificação CE e tem presença documentada no mercado europeu. O facto de o custo direto de execução ser praticamente equivalente ao método tradicional, 1,50 €/m² vs 1,49 €/m², significa que a empresa pode aceder à tecnologia sem risco financeiro significativo, beneficiando imediatamente da redução de prazo de ~80% e da melhoria de consistência de qualidade. Esta primeira experiência em contexto real de obra é também um investimento em aprendizagem organizacional, sobre como integrar um sistema robótico no planeamento da obra, como gerir a interface com subempreiteiros e como comunicar a inovação ao cliente final.

O robô WLTR deve ser considerado em obras de habitação coletiva com volumes de alvenaria superiores a 3 000 m², onde a poupança estimada de ~66% no custo de execução se traduz em valores absolutos expressivos na ordem dos 59 000 € para uma obra de 5 000 m², acrescidos de uma redução de 51 dias úteis no planeamento da obra. O modelo de leasing operacional (~4 500 €/mês ou ~150 €/dia) permite aceder ao equipamento sem imobilização de capital e testar a tecnologia em contexto real antes de qualquer decisão de aquisição. A empresa deve, porém, assegurar previamente que os projetos de arquitetura estão disponíveis em formato digital com detalhe suficiente para a programação do robô, e que as frentes de alvenaria a executar apresentam uma proporção de metros correntes lineares suficiente para justificar a mobilização do equipamento, evitando obras fragmentadas ou com geometrias muito irregulares onde o rendimento efetivo se aproxima do método tradicional

Tanto o *Tile Laying Robot* como o *Floor Grinding Robot* apresentam casos económicos convincentes, mas o seu perfil de risco de adoção no mercado português é significativamente mais elevado do que os sistemas europeus, pela ausência de rede de suporte técnico local, pela falta de referências normativas europeias e pela concentração das referências documentadas no mercado asiático. A recomendação é,

para já, de monitorização ativa: acompanhar a evolução da presença da *Legend Robot* na Europa e nos Estados Unidos da América, identificar eventuais distribuidores ibéricos que venham a ser nomeados, e definir internamente os critérios mínimos que tornariam aceitável a realização de um projeto-piloto, nomeadamente a existência de suporte técnico em Portugal ou Espanha, a disponibilidade de peças de substituição em stock local e a identificação de pelo menos um caso de referência europeu documentado. O *Floor Grinding Robot*, dada a especificidade do seu mercado de aplicação, grandes superfícies industriais e logísticas, é mais adequado para empresas que atuem neste segmento específico do que para construtoras generalistas de habitação.

Uma condição transversal à adoção de qualquer sistema robótico analisado é a disponibilidade de informação de projeto em formato digital com o nível de detalhe necessário à programação dos equipamentos. No caso do WLTR, isto implica modelos de parede parametrizados; no caso do *Tile Laying Robot*, layouts de pavimento digitalizados com definição de juntas e padrões. A realidade atual do mercado português - onde uma parte relevante das obras ainda é gerida a partir de peças desenhadas em formatos não parametrizados ou com insuficiente detalhe de execução - constitui um obstáculo de fundo que não é tecnológico, mas processual e cultural. A robotização cria, assim, um incentivo adicional para a adoção de metodologias BIM e para a elevação do nível de detalhe dos projetos de execução, contribuindo para uma maturação geral do setor que beneficia todos os processos construtivos.

A análise económica desenvolvida neste capítulo focou-se, por razões de objetividade e comparabilidade, nos custos diretos de mão de obra e nos indicadores de produtividade. Porém, uma avaliação completa do retorno da robotização deve incorporar dimensões que os quadros comparativos não capturam integralmente: a redução da sinistralidade laboral e dos seus custos associados, a melhoria da qualidade percebida pelo cliente final e o seu impacto na reputação comercial da empresa, a capacidade de cumprir programas de obra em contexto de escassez de mão de obra sem recorrer a horas extraordinárias ou a subempreiteiros de qualidade incerta, e o posicionamento estratégico da empresa como construtora inovadora num mercado que valoriza crescentemente a diferenciação tecnológica. Estes fatores, embora de difícil quantificação, são frequentemente determinantes na decisão de adoção e devem integrar qualquer análise de viabilidade interna que as empresas realizem antes de avançar.

Por último, importa referir que a adoção de tecnologias de automação na construção pode beneficiar de instrumentos de apoio financeiro disponíveis no âmbito do Plano de Recuperação e Resiliência e dos fundos estruturais europeus para o período 2021-2027, designadamente nas componentes dedicadas à digitalização e modernização das pequenas e médias empresas e à transição tecnológica do setor da construção. As empresas construtoras devem verificar a elegibilidade dos investimentos em robótica para estas linhas de apoio, que podem reduzir significativamente o esforço de capital associado à aquisição de equipamentos como o WLTR ou o *Tile Laying Robot*, acelerando o período de *payback* e tornando viável a adoção por empresas de menor dimensão que, de outra forma, não reuniriam condições para suportar o investimento inicial.

CONCLUSÃO

5.1. CONCLUSÕES GERAIS

A presente dissertação propôs-se analisar, de forma integrada, a robotização de processos construtivos on-site na construção de edifícios, combinando uma revisão do estado da arte das tecnologias disponíveis com uma análise do mercado de trabalho do setor e uma avaliação técnico-económica comparativa de quatro sistemas robóticos selecionados. O trabalho desenvolvido ao longo dos capítulos anteriores permite formular um conjunto de conclusões que respondem aos objetivos inicialmente propostos e que se apresentam de seguida de forma estruturada.

A primeira conclusão é de enquadramento estratégico: a robotização da construção civil não é uma tendência futura, é uma realidade presente, com sistemas comercialmente disponíveis, tecnologicamente maduros e economicamente viáveis em múltiplos domínios de aplicação. O estado da arte evidencia que, ao contrário do que a imagem historicamente conservadora do setor poderia sugerir, existe já um ecossistema robusto de soluções robóticas para alvenaria, acabamentos, pavimentos e automação de estaleiro, com níveis de maturidade tecnológica (TRL) que vão de sistemas em fase de comercialização na Europa, a sistemas com mais de um milhão de metros quadrados executados e certificação europeia. O argumento de que "a tecnologia ainda não está pronta" deixou de ser sustentável como razão para a não adoção.

A segunda conclusão decorre da análise do mercado de trabalho: a escassez estrutural de mão de obra qualificada na construção civil em Portugal - estimada entre 80 000 e 90 000 trabalhadores em falta, com custos de mão de obra a crescer entre 6% e 9% ao ano desde 2022 - não é uma conjuntura transitória, mas uma tendência estrutural de longo prazo, partilhada por toda a Europa Ocidental e agravada pelo envelhecimento demográfico, pela baixa atratividade do setor para as novas gerações e pelas limitações crescentes da imigração como mecanismo de compensação. Esta realidade transforma a robotização de uma opção de modernização tecnológica numa resposta estratégica necessária à sustentabilidade do setor a médio e longo prazo. A decisão de adotar sistemas robóticos deixa, assim, de ser apenas uma equação de custo-benefício imediato e passa a ser uma questão de capacidade de resposta futura no setor da construção.

A terceira conclusão emerge da análise técnico-económica: os quatro sistemas analisados - WLTR (alvenaria), Okibo EG7 (reboco e pintura), *Legend Robot Tile Laying Robot* (pavimento cerâmico) e *Legend Robot Floor Grinding Robot* (retificação de pavimentos) - apresentam casos económicos viáveis, com perfis de rentabilidade distintos, mas consistentemente favoráveis em obras de dimensão adequada. A redução dos custos de mão de obra varia entre ~5% no caso do Okibo EG7 em cenários de pequena escala, onde o valor real reside na redução de prazo de 80%, e ~93% no caso do *Floor Grinding*

Robot em grandes superfícies industriais. O WLTR gera poupanças de ~66% no custo de execução de alvenaria em obras superiores a 5 000 m², e o *Tile Laying Robot* reduz o custo de mão de obra de assentamento cerâmico em ~75% em projetos de grande dimensão. Em todos os casos, a redução de prazo de execução - entre 60% e 85% consoante o sistema - representa um benefício económico adicional que os quadros de custo direto não capturam integralmente, mas que se materializa em menores custos fixos de estaleiro, menor risco de penalizações contratuais e maior capacidade de rotatividade de obras.

A quarta conclusão é sobre a adequação ao mercado português. Os sistemas de origem europeia - WLTR e Okibo EG7 - apresentam o perfil de adoção mais favorável: certificação CE, presença comercial na Europa, suporte técnico disponível e compatibilidade com os materiais e tipologias construtivas correntes em Portugal. Os sistemas da *Legend Robot - Tile Laying Robot* e *Floor Grinding Robot* - apresentam casos económicos mais expressivos, mas o seu risco de adoção é significativamente mais elevado pela ausência de rede de suporte local, pela falta de referências normativas europeias específicas e pela inexistência de casos de uso documentados no mercado nacional. A sua adoção, embora promissora a médio prazo, está condicionada à maturação da presença da *Legend Robot* no mercado europeu e à criação das condições mínimas de suporte técnico e certificação que permitam às empresas construtoras portuguesas gerir o risco operacional associado.

A quinta e última conclusão é de natureza transversal: as barreiras à adoção da robótica na construção em Portugal não são predominantemente tecnológicas, são culturais, organizacionais e estruturais. A resistência à mudança por parte de encarregados e direções de obra, a insuficiente digitalização dos projetos de execução, a fragmentação do setor em pequenas e médias empresas com limitada capacidade de investimento, e a ausência de uma cultura de inovação sistemática constituem os obstáculos mais difíceis de ultrapassar. A tecnologia está disponível, o que falta é a vontade e a capacidade organizacional para a integrar de forma sustentada nos processos construtivos.

5.2. PERSPETIVAS DE DESENVOLVIMENTO FUTURO

O trabalho desenvolvido nesta dissertação abre um conjunto de linhas de investigação e de desenvolvimento prático que se afiguram relevantes para o avanço do conhecimento e da prática no domínio da robotização da construção civil em Portugal.

No plano da investigação académica, identificam-se como prioritárias: o desenvolvimento de estudos de caso em contexto de obra real em Portugal que permitam validar empiricamente os rendimentos e os custos estimados nesta dissertação com dados primários; a análise do impacto da robotização na organização do trabalho em estaleiro e na reconfiguração das competências necessárias às equipas de obra; e a avaliação do ciclo de vida dos sistemas robóticos, incorporando os custos de manutenção, obsolescência tecnológica e fim de vida no cálculo do retorno do investimento.

No plano tecnológico, o desenvolvimento dos robôs humanoides, abordado no Capítulo 2 como perspectiva futura, merece acompanhamento próximo. A capacidade de executar tarefas variadas em ambientes não estruturados, sem necessidade de adaptação do espaço de trabalho, poderá no médio prazo alterar radicalmente a equação económica da robotização na construção, tornando viável a automação de atividades que hoje permanecem fora do alcance dos sistemas especializados analisados nesta dissertação.

No plano empresarial, a recomendação mais urgente é a realização de projetos-piloto documentados em obras reais, que permitam acumular experiência operacional, quantificar os benefícios em contexto nacional e construir os casos de referência que o mercado português ainda não possui. Sem evidência empírica nacional, a adoção permanecerá condicionada pela desconfiança e pela resistência ao risco que caracterizam o setor. Os primeiros construtores que documentarem e partilharem os resultados dos seus pilotos robóticos terão não apenas uma vantagem competitiva, mas também um papel de catalisadores da transformação tecnológica de todo o setor.

Por fim, no plano regulamentar e de política setorial, seria relevante o desenvolvimento de normas técnicas portuguesas e europeias que enquadrem especificamente os processos construtivos robóticos, clarificando as responsabilidades dos fabricantes, operadores e empreiteiros, e criando um quadro de certificação que reduza as incertezas que hoje limitam a adoção das tecnologias de origem não europeia. A criação de linhas de apoio específicas à robotização da construção, no âmbito dos instrumentos de política industrial e de inovação disponíveis, poderia igualmente acelerar a transição tecnológica do setor, com benefícios para a produtividade, a segurança laboral e a competitividade internacional das empresas construtoras portuguesas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bock, T. (2015). The future of construction automation: *Technological disruption and the upcoming ubiquity of robotics*. *Automation in Construction*, 59, 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.07.022>
- Buswell, R. A., Leal de Silva, W. R., Jones, S. Z., & Dirrenberger, J. (2018). 3D printing using *concrete extrusion: A roadmap for research*. *Cement and Concrete Research*, 112, 37–49. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>
- Delgado, J. M. D., Oyedele, L., Ajayi, A., Akanbi, L., Akinade, O., Bilal, M., & Owolabi, H. (2019). Robotics and automated systems in construction: *Understanding industry-specific challenges for adoption*. *Journal of Building Engineering*, 26, 100868. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100868>
- Feng, C., Xiao, Y., Willette, A., McGee, W., & Kamat, V. R. (2015). Towards autonomous robotic in-situ assembly on unstructured construction sites using *monocular vision*. *Automation in Construction*, 59, 249–261.
- Helm, V., Ercan, S., Gramazio, F., & Kohler, M. (2012). Mobile robotic fabrication *on construction sites: DimRob*. *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 4335–4341.
- Kerres, M., Ruiz, N., Anwar, A., & Sahin, M. (2025). Opportunities, challenges and roadmap for humanoid robots in construction. *Scientific Reports*, 16, 905. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-30252-6>
- Khoshnevis, B. (2004). Automated construction by contour crafting - related *robotics and information technologies*. *Automation in Construction*, 13(1), 5–19. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2003.08.012>
- Ma, G., Wang, L., Li, Z., & Buswell, R. (2022). A review of 3D concrete printing: Materials and process *characterization, economic considerations and environmental sustainability*. *Journal of Building Engineering*, 65, 105692. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.105692>
- Madsen, A. J. (2018). The *SAM100: Analyzing Labor Productivity*. Senior Project, California Polytechnic State University. <https://digitalcommons.calpoly.edu/cmisp/243/>
- Melenbrink, N., Wurman, P., & Lipson, H. (2020). On-site autonomous construction robots: *Towards unsupervised building*. *Automation in Construction*, 119, 103312. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103312>
- Mitterberger, D., Dörfler, K., Sandy, T., Salveridou, F., Hutter, M., Gramazio, F., & Kohler, M. (2022). Interactive robotic plastering: *Augmented interactive design and fabrication for on-site robotic plastering*. *Proceedings of CHI 2022*. <https://doi.org/10.1145/3491102.3501842>

- Pan, M., Linner, T., Pan, W., Cheng, H., & Bock, T. (2018). A framework of indicators for assessing *construction automation and robotics in the sustainability* context. *Journal of Cleaner Production*, 182, 82–95. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.052>
- Rehman, A. U., & Kim, J. H. (2021). 3D Concrete *Printing: A Systematic Review of Rheology, Mix Designs, Mechanical, Microstructural, and Durability Characteristics*. *Materials*, 14(14), 3800. <https://doi.org/10.3390/ma14143800>
- Xu, J., Zhang, R., Li, M., & Chen, X. (2024). Mortar spraying and plastering integrated robot for wall construction. *Automation in Construction*, 163, 105439. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105439>
- AICCOPN - Associação dos Industriais da Construção Civil e Obras Públicas (2025). Inquérito ao Setor da *Construção Civil e Obras Públicas, 1.º Trimestre 2025*. AICCOPN, Lisboa. <https://www.aiccopn.pt> (acedido em 2026).
- AIMA - Agência para a Integração, Migrações e Asilo (2025). *População Estrangeira: Relatório Intercalar*. AIMA, Lisboa. <https://www.aima.gov.pt> (acedido em 2026).
- Bain & Company (2025). *European Construction Sector Outlook 2025*. Bain & Company, Boston. <https://www.bain.com> (acedido em 2026).
- Banco de Portugal (2024). *Caracterização dos Trabalhadores Estrangeiros por Conta de Outrem*. Banco de Portugal, Lisboa. <https://www.bportugal.pt> (acedido em 2026).
- European Labour Authority / EURES (2025). *Report on Labour Shortages and Surpluses 2024 - Annual Report*. Publications Office of the European Union, Luxemburgo. <https://eures.europa.eu> (acedido em 2026).
- Eurostat (2024). *Population Structure and Ageing - EU Statistics Explained*. Statistical Office of the European Union, Luxemburgo. <https://ec.europa.eu/eurostat> (acedido em 2026).
- Eurostat (2025). *Construction Statistics - Annual Data*. Statistical Office of the European Union, Luxemburgo. <https://ec.europa.eu/eurostat> (acedido em 2026).
- FEPICOP - Federação Portuguesa da Indústria da Construção e Obras Públicas (2024). *Conjuntura da Construção*. FEPICOP, Lisboa. <https://www.fepicop.pt> (acedido em 2026).
- FIEC - Fédération de l'Industrie Européenne de la Construction (2023). *Annual Report 2023*. FIEC, Bruxelas. <https://www.fiec.eu> (acedido em 2026).
- IMPIC - Instituto dos Mercados Públicos, do Imobiliário e da Construção (2024). *Relatório do Setor da Construção em Portugal 2023*. IMPIC, Lisboa. <https://www.impic.pt> (acedido em 2026).
- INE - Instituto Nacional de Estatística (2025). *Índice de Custo de Construção — Boletim Estatístico*. INE, Lisboa. <https://www.ine.pt> (acedido em 2026).

- International Federation of Robotics (2023). *World Robotics 2023 — Industrial Robots*. IFR, Frankfurt. <https://ifr.org> (acedido em 2026).
- McKinsey & Company (2025). *Humanoid robots in the construction industry: A future vision*. McKinsey Engineering, Construction & Building Materials Practice. <https://www.mckinsey.com> (acedido em 2026).
- Observatório da Emigração / ISCTE (2025). *Portuguese Emigration Factbook 2024*. Observatório da Emigração, Lisboa. DOI: 10.15847/CIESOEMFB2024.
- OCDE - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (2025). *OECD Economic Surveys: Germany 2025 — Addressing Skilled Labour Shortages*. OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/39d62aed-en>
- Canvas (2024). *Canvas 1200CX - Product Specifications and Case Studies*. Canvas Construction, San Francisco. <https://www.canvas.build> (acedido em 2026).
- FBR - Fastbrick Robotics (2023). *Hadrian X — Technical Specifications and Performance Data*. FBR, Perth, Austrália. <https://www.fbr.com.au> (acedido em 2026).
- Green.build (2025). *WLTR Masonry Robot - Product Specifications*. Green.build, Europa. <https://www.green.build> (acedido em 2026).
- Legend Robot Technology Co., Ltd. (2025a). *Tile Laying Robot - Product Specifications*. Legend Robot Technology, Shenzhen. <https://www.legendrobot.com> (acedido em 2026).
- Legend Robot Technology Co., Ltd. (2025b). *Floor Grinding Robot - Product Specifications*. Legend Robot Technology, Shenzhen. <https://www.legendrobot.com> (acedido em 2026).
- Legend Robot Technology Co., Ltd. (2025c). *Profitable Partnerships: Legend Robot's Tile Laying Robot*. Legend Robot Technology, Shenzhen. <https://www.legendrobot.com> (acedido em 2026).
- Okibo (2025a). *EG7 Autonomous Construction Robot - Technical Specifications*. Okibo, Tel Aviv / Nova Iorque. <https://www.okibo.com> (acedido em 2026).
- Okibo (2025b). *EG7+ Extended Reach Model - Product Launch*. Okibo, Tel Aviv / Nova Iorque. <https://www.okibo.com> (acedido em dezembro de 2026).
- Shadow Ventures (2024). *Okibo Investment Memo - Market Analysis and Financial Projections*. Shadow Ventures, São Francisco. <https://www.shadowventures.com> (acedido em 2026).
- EN 13813:2002 - *Screed material and floor screeds - Screed material - Properties and requirements*. European Committee for Standardization (CEN), Bruxelas.
- EN ISO 10545-4:2019 - *Ceramic tiles - Part 4: Determination of modulus of rupture and breaking strength*. European Committee for Standardization (CEN), Bruxelas.

- IEC 60204-1:2016* - Safety of machinery - Electrical equipment of machines - Part 1: General requirements. International Electrotechnical Commission, Genebra.
- EN ISO 12100:2010* - Safety of machinery - General principles for design - Risk assessment and risk reduction. International Organization for Standardization, Genebra.
- ISO 25785-1 (Draft, 2025)* - Industrial mobile robots with actively controlled stability - Safety requirements - Part 1: General principles. International Organization for Standardization, Genebra.
- CITB - Construction Industry Training Board (2025). *Construction Workforce Outlook 2025–2029*. CITB, Bircham Newton, Reino Unido. <https://www.citb.co.uk> (acedido em 2026).
- Fixando (2024). *Relatório do Mercado de Obras em Habitação 2024*. Fixando, Lisboa. <https://www.fixando.pt> (acedido em 2024).
- Rádio Renascença (2025, julho). *Construção civil em Portugal: crise de mão de obra*. Rádio Renascença, Lisboa. <https://rr.sapo.pt> (acedido em 2026).
- Sindicato da Construção de Portugal (2024). *Comunicado sobre Sinistralidade Laboral no Setor da Construção 2022–2023*. Sindicato da Construção, Lisboa. <https://www.sindicatodaconstrucao.pt> (acedido em 2026).
- The B1M (2017). *The History of Bricklaying Robots*. The B1M, Londres. <https://www.theb1m.com> (acedido em 2026).
- The Robot Report (2025, abril). *Okibo EG7+: Extended reach plastering robot launches in North America*. The Robot Report. <https://www.therobotreport.com> (acedido em 2026).
- Turner & Townsend (2025). *UK Market Intelligence: Solving the Skills Shortage Challenge*. Turner & Townsend, Londres. <https://www.turnerandtowntsend.com> (acedido em 2026).
- Economic Research Institute - ERI (2025). *Salary Data for Construction Occupations - Portugal and Europe*. ERI, Redding, EUA. <https://www.erieri.com> (acedido em 2026).
- SalaryExpert (2025). *Construction Worker Salary Data - Portugal*. SalaryExpert / ERI, Redding, EUA. <https://www.salaryexpert.com> (acedido em 2026).