

O Método de Lançamento Incremental de Pontes: Abordagem com Soluções Lean na Optimização do Processo Construtivo

JOÃO PAULO VIANA DUARTE

Dissertação apresentada à
Escola Superior de Tecnologia e de Gestão do Instituto Politécnico de Bragança

Para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

No âmbito da dupla diplomação com a
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Orientado por
Prof. Doutor Rui Alexandre Figueiredo de Oliveira (IPB)
Prof. Doutor Renan Borelli Galvão (UTFPR)

BRAGANÇA
2026



O Método de Lançamento Incremental de Pontes: Abordagem com Soluções Lean na Optimização do Processo Construtivo

JOÃO PAULO VIANA DUARTE

Dissertação apresentada à
Escola Superior de Tecnologia e de Gestão do Instituto Politécnico de Bragança

Para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

BRAGANÇA
2026

À minha Mãe, ao meu Pai e ao meu Irmão

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por sempre traçar os melhores caminhos em minha vida, por me dar forças para continuar e nunca desistir, mesmo diante dos desafios que pareciam impossíveis. Tenho a certeza de que os seus planos sempre serão os melhores e nunca os duvidarei.

Agradeço à minha mãe, ao meu pai e ao meu irmão, por serem o meu alicerce desde sempre, por acreditarem, confiarem e apoiarem todos os meus sonhos e objetivos de vida, desde o querer de ser jogador de futebol na infância até a realização de me tornar Engenheiro Civil. Agradeço por todos os ensinamentos, pelo apoio constante e por tudo o que fizeram para que eu me tornasse quem sou hoje. Vocês sempre serão o meu porto seguro, e espero um dia retribuir por tudo o que fizeram por mim.

Agradeço ao Professor e Orientador Rui Alexandre, por ter aceitado orientar-me nesta trajetória, pela amizade construída, pelos conselhos, conversas, sugestões e opiniões, e pela confiança e apoio no desenvolvimento desta dissertação. Sua resiliência e acompanhamento foram fundamentais neste processo. Agradeço também ao Professor e Coorientador Renan Borelli por se dispor a me ajudar nesta etapa, pelos conhecimentos compartilhados ao longo da graduação e por todas as suas considerações e contribuições durante esta fase.

Agradeço imensamente à UTFPR, por ter sido casa em longos anos da minha vida acadêmica e profissional, pelas oportunidades únicas e, principalmente, pelo Programa de Duplo-Diploma, que foi essencial na minha trajetória. Ao IPB, agradeço por também ter sido casa, mesmo quando longe da minha, pelas experiências vividas e por me acolher tão bem.

Agradeço aos meus primos Leonardo e Weclison, que, além de primos e amigos, sempre fizeram papel de irmãos desde o berço. Às minhas amigas Alexia e Gabriella, que sempre fizeram papéis fundamentais em minha vida, como amigas, irmãs, e mães, e que sempre torceram para o meu sucesso. À Sophia, agradeço a amizade sincera que fizemos durante o programa de internacionalização.

Agradeço também a todo o meu grupo de amigos, os Paraguaio, pela irmandade construída na terra dos amigos para sempre, Bragança-PT. Todos os momentos de histórias, viagens, amizade, choros e alegrias foram essenciais para tornar essa trajetória mais leve e serão guardados e lembrados para sempre em minha memória.

Agradeço, de forma mais que especial, à Letícia, por sempre estar ao meu lado, emanando boas energias em momentos difíceis e alegres, por me apoiar e incentivar em tudo, mesmo que as vezes parece impossível, por todos os momentos em que vivemos juntos e os que ainda viveremos, pelo apoio incondicional que tem me dado até aqui e por ser símbolo de amor, companheirismo e dedicação.

Agradeço profundamente a todos que, por mais que não tenham sido mencionados individualmente aqui, sabem que foram essenciais em toda a minha trajetória. Cada um de vocês fez parte deste caminho e contribuiu para que eu pudesse chegar até aqui. Todos os momentos serão sempre guardados em minha memória.

Obrigado!

“Da ponte pra cá, antes de tudo é uma escola.”

— Racionais MC's

“Entrega o teu caminho ao Senhor; confia nele, e ele o fará.”

— Salmos 37:5

RESUMO

O Método de Lançamento Incremental (MLI) de pontes caracteriza-se pela construção da superestrutura de pontes com alta ciclagem, controlo geométrico, estaleiro eficiente e redução de interferências no meio envolvente. Paralelamente, os princípios da *Lean Construction* (LC) têm sido aplicados na construção civil com o objetivo de reduzir desperdícios e aumentar a eficiência dos processos. Neste contexto, a presente investigação aborda a lacuna existente relativamente ao conhecimento prático do MLI em contexto real de obra e à limitada integração entre o método construtivo e soluções *Lean* orientadas à mitigação de problemas operacionais, logísticos e técnicos.

A investigação teve como objetivo contribuir para a compreensão e otimização do processo construtivo de pontes executadas pelo MLI através da aplicação de ferramentas LC. Para isso, procurou-se detalhar as fases do processo construtivo, identificar vantagens, desvantagens e problemas recorrentes e propor soluções de otimização fundamentadas nos princípios *Lean*. Metodologicamente, o estudo foi desenvolvido através de revisão bibliográfica, pesquisa exploratória com profissionais experientes no MLI, síntese dos problemas identificados, seleção de ferramentas LC adequadas, desenvolvimento de propostas de otimização e validação das soluções propostas.

Os resultados permitiram identificar problemas relacionados com planeamento, coordenação entre projeto e obra, controlo geométrico, gestão de materiais, controlo tecnológico do betão e condições operacionais e de segurança. Posteriormente realizou-se uma proposta de *Framework* com agregação de ferramentas LC, como *Last Planner System* (LPS), *Value Stream Mapping* (VSM), *Visual Management* (VM), *Total Productivity Maintenance* (TPM) e *Kaizen*, como resposta aos problemas identificados na bibliografia e no estudo exploratório, para a melhoria do fluxo de trabalho e redução de desperdícios ao longo do ciclo construtivo. A validação da proposta revelou elevada aceitação quanto à sua relevância prática e aplicabilidade, ainda que tenham sido sugeridos pequenos ajustamentos operacionais.

Conclui-se que a integração entre o conhecimento técnico do MLI e os princípios da LC contribui para um processo construtivo mais previsível, seguro e eficiente, reforçando a importância do planeamento integrado, da qualificação das equipas e da melhoria contínua. A investigação fornece ainda uma base metodológica para futuras aplicações e adaptações das soluções propostas a diferentes contextos de obra e métodos construtivos de pontes.

Palavras chaves: Pontes, Lançamento Incremental, *Lean*, Processo Construtivo, Gestão, Otimização.

ABSTRACT

The Incremental Launching Method (ILM) for bridges is characterised by the construction of the superstructure with high cycle repetition, precise geometric control, an efficient casting yard and reduced interference with the surrounding environment. In parallel, the principles of Lean Construction (LC) have been applied in the construction sector with the aim of reducing waste and increasing process efficiency. In this context, the present research addresses the existing gap regarding practical knowledge of ILM in real construction environments and the limited integration between this construction method and Lean-based solutions aimed at mitigating operational, logistical and technical problems.

The study aimed to contribute to the understanding and optimisation of the construction process of bridges executed with ILM through the application of LC tools. To this end, the research sought to detail the phases of the construction process, identify recurring advantages, disadvantages and problems, and propose optimisation solutions grounded in Lean principles. Methodologically, the study was developed through a literature review, an exploratory survey with professionals experienced in ILM, synthesis of the identified problems, selection of appropriate LC tools, development of optimisation proposals and validation of the proposed solutions.

The results made it possible to identify problems related to planning, coordination between design and construction, geometric control, materials management, concrete quality control and operational and safety conditions. Subsequently, a framework was proposed, aggregating LC tools such as Last Planner System (LPS), Value Stream Mapping (VSM), Visual Management (VM), Total Productive Maintenance (TPM) and Kaizen as a response to the problems identified in the literature and in the exploratory study, with the aim of improving workflow and reducing waste throughout the construction cycle. Validation of the proposed framework revealed a high level of acceptance regarding its practical relevance and applicability, although small operational adjustments were suggested.

It is concluded that the integration between ILM technical knowledge and LC principles contributes to a more predictable, safer and more efficient construction process, reinforcing the importance of integrated planning, team qualification and continuous improvement, and providing a methodological basis for future applications and adaptations of the proposed solutions to different construction contexts and bridge construction methods.

Keywords: Bridges, Incremental Launching, Lean, Construction Process, Management, Optimisation.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	- 15 -
1.1	ENQUADRAMENTO DA INVESTIGAÇÃO	- 15 -
1.2	OBJETIVOS	- 16 -
1.3	BREVE ABORDAGEM METODOLÓGICA	- 17 -
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	- 17 -
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	- 18 -
2.1	DEFINIÇÃO E TIPOLOGIA DAS PONTES	- 18 -
2.2	INTRODUÇÃO A HISTÓRIA DAS PONTES	- 18 -
2.2.1	Império Romano.....	- 19 -
2.2.2	Renascentismo.....	- 19 -
2.2.3	Idade da Razão	- 20 -
2.2.4	Idade Contemporânea.....	- 21 -
2.3	MÉTODOS CONSTRUTIVOS DE PONTES	- 24 -
2.3.1	Cimbramento.....	- 25 -
2.3.2	Cimbre Autolanzável.....	- 26 -
2.3.3	Avanços Sucessivos	- 27 -
2.4	MÉTODO DE LANÇAMENTO INCREMENTAL	- 30 -
2.4.1	Lançamento Incremental	- 31 -
2.4.2	Campo de Aplicação	- 37 -
2.4.3	Pré-esforço	- 38 -
2.4.4	Organização do Estaleiro	- 39 -
2.4.5	Estruturas Auxiliares.....	- 40 -
2.4.6	Vantagens e Desvantagens do Método de Lançamento Incremental.....	- 45 -
2.4.7	Ciclo Construtivo	- 46 -

2.4.8 Exemplos de Pontes Construídas por Lançamento Incremental	- 47 -
2.5 LEAN CONSTRUCTION	- 48 -
2.5.1 Lean	- 48 -
2.5.2 Lean Thinking	- 51 -
2.5.3 Desperdícios	- 52 -
2.5.4 Introdução a Lean Construction	- 53 -
2.5.5 Ferramentas e Práticas da Filosofia Produção Lean.....	- 56 -
3 METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO CIENTÍFICA	- 62 -
3.1 ESTRUTURA METODOLÓGICA DA INVESTIGAÇÃO	- 62 -
3.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	- 63 -
3.3 PESQUISA EXPLORATÓRIA.....	- 64 -
3.3.1 Questionário exploratório.....	- 64 -
3.3.2 Estratégia de Amostragem e Condução da Pesquisa Exploratória.....	- 65 -
3.4 SÍNTESE DOS PROBLEMAS E APLICAÇÕES LEAN.....	- 67 -
3.5 OTIMIZAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO FRAMEWORK	- 68 -
3.6 VALIDAÇÃO DO FRAMEWORK.....	- 69 -
4 RESULTADOS.....	- 70 -
4.1 PROBLEMAS IDENTIFICADOS	- 70 -
4.1.1 Revisão Bibliográfica.....	- 70 -
4.1.2 Pesquisa Exploratória.....	- 71 -
4.1.3 Síntese dos Problemas Identificados	- 76 -
4.2 OTIMIZAÇÃO E CONTRIBUTOS PARA DESENVOLVIMENTO DO FRAMEWORK	- 78 -
4.2.1 Gestão.....	- 78 -
4.2.2 Fluxo de Trabalho	- 84 -
4.2.3 Material	- 87 -

4.2.4 Equipamento.....	- 89 -
4.2.5 Fatores Externos	- 90 -
4.2.6 Convergência das temáticas para desenvolvimento do framework	- 92 -
4.3 VALIDAÇÃO DO FRAMEWORK.....	- 92 -
4.3.1 Questionário de Validação	- 92 -
4.3.2 Análise dos Resultados e Discussão.....	- 95 -
4.4 VALIDAÇÃO DOS OBJETIVOS	- 99 -
5 CONCLUSÃO	- 100 -
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	- 100 -
5.2 LIMITAÇÕES DO ESTUDO.....	- 101 -
5.3 RECOMENDAÇÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	- 101 -
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	- 103 -
APÊNDICE A – Questionário da pesquisa exploratória	- 111 -
APÊNDICE B – Ficha de Verificação de Serviço (FVS).....	- 116 -
APÊNDICE C – Framework	- 118 -
APÊNDICE D – Questionário de validação	- 120 -

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ponte Sublício, Roma.	- 19 -
Figura 2 - Ponte Rialto, Veneza.	- 20 -
Figura 3 - Ponte de Coalbrookdale, Inglaterra.	- 21 -
Figura 4 - Ponte Dom Luís I, Porto.	- 22 -
Figura 5 - Ponte Plougastel, França.	- 23 -
Figura 6 - Estrutura de Cimbramento utilizada para execução de tabuleiro de ponte.	- 25 -
Figura 7 - Cembre autolançável superior no Viaduto Rodoanel, São Paulo.	- 26 -
Figura 8 - Cembre autolançável inferior no Viaduto do Corgo, Vila Real.	- 26 -
Figura 9 - Esquema dos Avanços Sucessivos com Aduelas betonadas <i>in loco</i>	- 28 -
Figura 10 - Método dos Avanços Sucessivos sobre o Rio Kwanza, em Angola.	- 29 -
Figura 11 - Sequência de lançamento do tabuleiro no MLI.	- 30 -
Figura 12 - Ponte sobre o Rio Caroni, Venezuela.	- 32 -
Figura 13 - Esquema do MLI.	- 33 -
Figura 14 - Passarela para pedestres sobre Ferrovia da FEPASA.	- 34 -
Figura 15 - Esquema representativo da construção pelo MLI da Passarela.	- 34 -
Figura 16 - Viaduto sobre o Rio Sousa II.	- 35 -
Figura 17 - Viaduto IX.	- 35 -
Figura 18 - Ponte sobre o rio Águeda.	- 35 -
Figura 19 - Viaduto de S. Sebastião.	- 35 -
Figura 20 - Avanço do tabuleiro pelo MLI do Viaduto Millau, na França.	- 36 -
Figura 21 - Viaduto Millau, França.	- 37 -
Figura 22 - Pré-esforço centrado. Corte vertical longitudinal do tabuleiro.	- 39 -
Figura 23 - Exemplo de planta para um estaleiro de MLI.	- 40 -
Figura 24 - Exemplo da extremidade frontal ancorada a partir de um mastro.	- 40 -
Figura 25 - Nariz metálico na construção da Ponte sobre Rio Cubal da Hanha.	- 41 -
Figura 26 - Esquema do macaco hidráulico levantando o tabuleiro.	- 42 -
Figura 27 - Esquema do macaco hidráulico empurrando o tabuleiro.	- 42 -
Figura 28 - Esquema do macaco hidráulico descendo o tabuleiro.	- 43 -
Figura 29 - Esquema do macaco hidráulico voltando a origem.	- 43 -
Figura 30 - Aparelho de apoio provisório de deslizamento.	- 44 -
Figura 31 - Guia lateral com macaco hidráulico.	- 44 -

Figura 32 - Transposição de obstáculos sem interferência.	- 45 -
Figura 33 - Ponte sobre o Rio Caroni, Venezuela.	- 47 -
Figura 34 - Ponte Wildbichler sobre o rio Inn, Áustria.	- 48 -
Figura 35 - Viaduto Millau, França.	- 48 -
Figura 36 - Casa do TPS.....	- 50 -
Figura 37 - Metodologia de investigação utilizada.	- 63 -
Figura 38 - Faseamento das Etapas Construtivas (LPS).	- 79 -
Figura 39 - Aplicação das ferramentas Lean para otimização na Pré-execução do MLI.	- 81 -
Figura 40 - Aplicação das ferramentas Lean para otimização na Execução do MLI.	- 83 -
Figura 41 - Aplicação das ferramentas Lean para otimização na Pós-Execução do MLI... -	84 -
Figura 42 - Ciclo de Construção do Tabuleiro (VSM, VM e Takt-Time).....	- 85 -
Figura 43 - Percurso da central de betão até laboratório de controlo tecnológico.	- 87 -
Figura 44 - Proposta de Layout eficiente para o MLI.	- 91 -
Figura 45 - Esquema simplificado de informações do <i>Framework</i>	- 92 -
Figura 46 - Distribuição percentual das médias obtidas na validação de propostas.....	- 96 -

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Organização das fases de investigação.....	- 17 -
Quadro 2 - Estrutura temática do questionário exploratório.	- 64 -
Quadro 3 - Problemas Identificados na Revisão Bibliográfica.	- 70 -
Quadro 4 - Problemas Identificados na Pesquisa Exploratória.	- 75 -
Quadro 5 - Síntese dos Problemas Identificados.	- 76 -
Quadro 6 - Correlacionamento de Problemas e Questões	- 93 -
Quadro 7 - Sistema de pontuação das questões alternativas.	- 94 -
Quadro 8 - Validação dos objetivos específicos da investigação.....	- 99 -

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sequência de trabalhos para a construção do tabuleiro.....	- 47 -
Tabela 2 - Média das pontuações atribuídas às questões de validação	- 95 -

LISTA DE ABREVIACÕES

Abreviação	Definição
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
BrIM	<i>Bridge Information Modeling</i>
DE	Diagrama de Espaguete
ES	Engenharia Simultânea
FVS	Ficha de Verificação de Serviço
IPB	Instituto Politécnico de Bragança
JIT	<i>Just-in-Time</i>
LC	<i>Lean Construction</i>
LPS	<i>Last Planner System</i>
MLI	Método de Lançamento Incremental
PPC	<i>Percent Plan Complete</i>
TPS	<i>Toyota Production System</i>
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VM	<i>Visual Management</i>
VSM	<i>Value Stream Mapping</i>

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo contextualizar o enquadramento da dissertação, bem como apresentar os objetivos gerais e específicos, descrever sucintamente a metodologia adotada para o desenvolvimento da investigação e definir a estrutura organizacional da dissertação.

1.1 ENQUADRAMENTO DA INVESTIGAÇÃO

Ao longo da história, os seres humanos sempre buscaram alternativas mais fáceis para migrar de um ponto a outro, seja para realizar a busca por alimentos ou pelo movimento migratório em si. Ao realizar essas ações, se deparavam com rios ou vales em seu caminho que dificultavam sua transposição. Pressupõe-se, que as primeiras pontes a serem utilizadas eram feitas de pedras, assim como os troncos das árvores caídos sobre os rios e vales para realizar a travessia. Com o passar do tempo, o avanço das sociedades, a evolução das ferramentas e o manejo dos materiais, os seres desenvolveram diferentes práticas e o aperfeiçoamento de novas técnicas construtivas que contribuíram para o desenvolvimento de novos métodos e tipos de construções para as pontes e demais obras (Steinman & Watson, 1941).

Atualmente, a engenharia de pontes dispõe de uma ampla variedade de métodos construtivos, desenvolvidos de acordo com condicionantes técnicas, econômicas, ambientais e logísticas de cada projeto, assim como as condições locais da obra, características geográficas e geotécnicas (Nunes, 2017). Entre os principais métodos construtivos contemporâneos destacam-se o Cimbramento tradicional, o Cimbra Autolancável, os Avanços Sucessivos e o Lançamento Incremental. Cada uma apresentando suas características particulares, vantagens e limitações.

O Método de Lançamento Incremental (MLI) destaca-se como uma solução construtiva altamente mecanizada utilizada na execução de pontes, apresentando vantagens em obras com múltiplos vãos, terrenos restritos, vales e regiões montanhosas, travessias sobre vias com tráfego intenso ou linhas ferroviárias, bem como em situações que não se mostra conveniente impor interferências no ambiente inferior à estrutura. O método consiste na execução segmentada do tabuleiro em um estaleiro localizado, geralmente atrás de um dos encontros, sendo posteriormente deslocado sucessivamente até sua posição final (Martins, 2009; VSL International Ltd., 1977).

Além do estaleiro estar associado como uma das principais vantagens do MLI, assim como optar por diferentes materiais para executar o tabuleiro, a aplicação do MLI proporciona vantagens, tais como a dispensa da utilização de escoramento inferior, maior segurança operacional, ciclos de produção rápidos e repetitivos, melhoria potencial da qualidade de execução em ambiente controlado, alta mecanização do processo construtivo e menor impacto sobre áreas sensíveis. Contudo, apesar de suas reconhecidas vantagens, o processo construtivo do MLI é restrito somente para pontes retas ou com raio de curvatura constantes, exige rigoroso controle geométrico, elevada precisão executiva, planejamento detalhado, monitoramento

constante dos equipamentos, coordenação eficiente entre projeto e execução, além de mão de obra especializada (Duarte, 2011; Martins, 2009; VSL International Ltd., 1977).

Embora a literatura existente aborde aspectos históricos, estruturais, geométricos e técnicos do MLI (principalmente analíticos), nota-se uma produção científica limitada quanto à análise prática detalhada de suas etapas construtivas sob uma perspectiva operacional integrada de como o processo executivo se comporta no dia a dia de uma obra e os problemas reais do cotidiano de projeto, gerenciamento e execução. Um estudo realizado pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), em 2007, comprova a existência de uma “lacuna de conhecimento” a respeito do método e sendo um dos motivos para que não haja uma adoção ainda maior a respeito desse processo construtivo (LaViolette et al., 2007). Adicionalmente, observa-se escassez ainda maior de estudos que proponham, de forma estruturada, a aplicação de princípios e ferramentas *Lean Construction* (LC) como estratégia de otimização deste método construtivo.

A filosofia *Lean*, originada no *Toyota Production System* (TPS) e posteriormente adaptada para a construção civil, tem como objetivo principal a maximização de valores e a minimização total de desperdícios, buscando aumentar eficiência, previsibilidade, produtividade e qualidade por meio de suas ferramentas, como por exemplo, *Last Planner System* (LPS), *Value Stream Mapping* (VSM), *Visual Management* (VM), *Kaizen*, *Total Productive Maintenance* (TPM), *Just-in-Time* (JIT), entre outras (Arantes, 2008; Ohno, 1997).

Apesar do potencial que essas ferramentas possuem para mitigar problemas recorrentes em processos como o MLI, sua aplicação permanece pouco formalizada neste contexto específico, pois, ainda que de maneira implícita, é perceptível a aplicação dos conceitos destas ferramentas na prática. Dessa forma, identifica-se uma lacuna científica e prática relevante: a ausência de modelos estruturados que integrem o conhecimento detalhado das etapas construtivas do MLI com soluções *Lean* direcionadas à mitigação de problemas operacionais, gerenciais, materiais, logísticos e técnicos.

1.2 OBJETIVOS

O estudo tem como objetivo contribuir para a compreensão e otimização do processo construtivo de pontes executadas pelo MLI com abordagens de ferramentas LC e ampliar a literatura existente a respeito do método, de modo a incentivar sua adoção por profissionais.

Como objetivos específicos, o trabalho propõe-se a:

- OE1: Detalhar as várias fases e conteúdo do processo construtivo de pontes pelo MLI.
- OE2: Desenvolver abordagem descritiva sobre vantagens, desvantagens e problemas nas diversas fases do processo construtivo de pontes realizadas pelo MLI.
- OE3: Implementar soluções *LEAN* que visem mitigar os problemas encontrados nas diversas fases do processo construtivo, no sentido de otimizar as soluções levando a maior rentabilidade.

1.3 BREVE ABORDAGEM METODOLÓGICA

Com o intuito de organizar o estudo proposto e os métodos aplicados, a metodologia adotada nesta investigação é apresentada em fases sequenciais, conforme apresentado no Quadro 1, de modo a facilitar a compreensão da execução da pesquisa.

Quadro 1 - Organização das fases de investigação.

Fases	Procedimento	Descrição
1	Revisão bibliográfica	- Revisão teórica sobre história das pontes, métodos construtivos, MLI e LC
2	Pesquisa exploratória	- Contato com profissionais da área - Aplicação de pesquisa exploratória - Identificação de problemas práticos, técnicos, gerenciais, materiais e operacionais
3	Síntese dos problemas e Seleção de Ferramentas <i>Lean</i>	- Síntese dos problemas identificados na revisão bibliográfica e pesquisa exploratória - Seleção de ferramentas LC
4	Otimização e Desenvolvimento do <i>Framework</i>	- Proposição de otimização no processo construtivo - Desenvolvimento do <i>Framework</i> de otimização
5	Validação	- Elaboração do questionário de validação - Avaliação das propostas por especialistas - Validação dos objetivos propostos no trabalho - Análise qualitativa e quantitativa das respostas

Fonte: Autoria Própria.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está dividido em 5 capítulos, para além da presente Introdução:

O Capítulo 2 apresenta o referencial teórico, abordando a evolução das pontes ao longo da história, os principais métodos construtivos utilizados em obras de artes especiais, o MLI e os fundamentos LC.

O Capítulo 3 descreve a metodologia adotada, incluindo a caracterização da pesquisa, os procedimentos de recolhas de dados, a pesquisa exploratória com profissionais da área, a otimização e desenvolvimento do *Framework* e a estrutura utilizada para análise e validação dos resultados.

O Capítulo 4 é destinado para o desenvolvimento dos resultados, com a sintetização dos principais problemas associados ao MLI, com base na revisão bibliográfica e pesquisa exploratória, a proposição de otimização fundamentadas em ferramentas LC, a estruturação do *Framework* e a validação de resultados por profissionais familiarizados com o método.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões finais da investigação, sintetizando as principais contribuições do estudo, as limitações encontradas e recomendações para futuras pesquisas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O presente capítulo tem como objetivo abordar a definição e as tipologias das pontes, bem como a sua evolução ao longo da história e os principais métodos construtivos aplicados a essas estruturas, com maior ênfase, o MLI, por constituir o método específico desta dissertação. Além disso, procura-se contextualizar a metodologia LC e suas ferramentas.

2.1 DEFINIÇÃO E TIPOLOGIA DAS PONTES

Ponte é a denominação atribuída a construção que tem como finalidade dar a continuidade de uma via de qualquer natureza como rodovia, ferrovia, trilha, passarelas e entre outros, permitindo realizar a transposição de obstáculos tais como rios, braços de mar, lagos, vales profundos e outros tipos de vias (El Debs, 2021; Pfeil, 1979).

As pontes são nomeadas de acordo com o tipo de via a ser transposta ou conforme o seu respectivo uso. Sendo assim, considera-se que:

- **Ponte (propriamente dita):** é a denominação utilizada para a estrutura que tem como objetivo transpor obstáculos constituídos de curso de água ou outras superfícies líquidas, por exemplo, rios, braços de mar e lagos;
- **Viaduto:** é a estrutura utilizada quando o obstáculo a ser transposto é um vale ou outras vias não constituídas por água. Também podemos considerar os viadutos de acesso, são aqueles que permitem o acesso a uma ponte. Isso ocorre, por exemplo, quando temos a transposição de um vale muito amplo que contém um curso de água, sendo necessário o viaduto de acesso até chegar na ponte propriamente dita;
- **Passarela:** destinada ao uso exclusivo de pedestres e/ou ciclistas;
- **Aquedutos:** quando a finalidade é a passagem de um curso de água;
- **Bueiros ou Galerias:** Obras destinadas à passagem inferior, passagem das águas pluviais, ou de águas perenes de pequeno curso, localizadas transversalmente ao eixo.

2.2 INTRODUÇÃO A HISTÓRIA DAS PONTES

Segundo Steinman & Watson (1941), as primeiras pontes utilizadas pelos seres humanos surgiram naturalmente por processos erosivos que formavam abóbadas de pedra sobre rios e vales, além de troncos das árvores caídos que permitiam travessias. Essas estruturas naturais facilitaram deslocamentos humanos primitivos, auxiliando na migração, caça e busca por recursos.

Com o passar do tempo, em diferentes períodos, eras e civilizações, assim como no período romano, renascentismo, contemporâneo, entre outros, a evolução das ferramentas e manejo dos materiais, a prática e o aperfeiçoamento de novas técnicas construtivas contribuíram para o desenvolvimento de novos métodos e tipos de construções para as pontes e demais obras.

2.2.1 IMPÉRIO ROMANO

No início do Império Romano, as primeiras pontes tinham caráter temporário e utilitário, feitas de madeira serviam para que os militares pudessem transpor os rios durante as guerras, justamente por este material estar mais disponível e permitir uma rápida execução para uma civilização jovem. A prioridade era a funcionalidade e não a permanência, o que justifica o uso do material mais simples (Steinman & Watson, 1941).

A Ponte Sublício (*Pons Sublicius*), construída com estrutura de madeira por Anco Márcio por volta de 642 a.C., é conhecida por ser a primeira ponte da Roma Antiga à qual se tem registro histórico. Foi também a primeira ponte, das quais existem, a ser erguida sobre o rio Tibre, tendo como objetivo facilitar o comércio e o tráfego na região (Steinman & Watson, 1941; Whitney, 1929). A Figura 1, apresenta a ponte nos dias atuais após diversas reformas.



Figura 1 - Ponte Sublício, Roma.
Fonte: Turismo Roma.

2.2.2 RENASCENTISMO

Após a estagnação técnica da Idade Média, o Renascimento impulsionou a engenharia de pontes ao integrar a ciência moderna à estética arquitetônica, transformando a construção em uma disciplina que unia teoria e prática. Sob a influência de figuras como Leonardo Da Vinci e Galileu Galilei, o período foi marcado pelo nascimento das teorias de Resistência dos Materiais e pela introdução do sistema de treliças, que permitiu a superação de vãos maiores com maior eficiência estrutural (P. J. L. e Silva, 2005).

A ponte mais famosa e aclamada desta época é, talvez, a Ponte Rialto, vista na Figura 2, localizada sobre o Grande Canal em Veneza, que inicialmente foi construída em madeira e desabou, e logo foi reconstruída pelo famoso arquiteto e engenheiro da época, Antonio Da Ponte, a partir do século XV e que até o momento existe. A restauração da Ponte Rialto foi feita em pedras e está apoiada acima de 600 estacas de madeiras, formando sua fundação (P. J. L. e Silva, 2005; Steinman & Watson, 1941).



Figura 2 - Ponte Rialto, Veneza.

Fonte: Fotografia cedida por Diogo Emanuel (2025).

2.2.3 IDADE DA RAZÃO

O Iluminismo, também conhecido como Idade da Razão, datado principalmente nos séculos XVII e XVIII, foi o movimento intelectual que defendia a razão como o principal instrumento para o progresso da humanidade.

Neste contexto, surge o nascimento da Engenharia e da Ciência Aplicada com o intuito de utilizar todo o conhecimento científico acumulado em prol das sociedades. Dada a complexidade dos conhecimentos de engenharia e considerarem não ser mais possível compreender todos os fundamentos de ambas as áreas completamente, os dois campos das construções foram separados – Arquitetura e Engenharia (Jesus, 2013; Steinman & Watson, 1941).

Em 1716, foi criado em Paris o *Corps des Ponts et Chaussées*, o primeiro departamento civil voltado ao avanço científico da construção de pontes, durante o reinado de Luís XV. A crescente complexidade das obras exigiu formação mais especializada, resultando na fundação da *École des Ponts et Chaussées*, em 1747, considerada a primeira escola de engenharia do mundo. Fundada por Trudaine, teve como primeiro diretor Jean Rodolph Perronet, reconhecido posteriormente como o “Pai da construção de pontes modernas” por suas contribuições inovadoras. (Jesus, 2013; P. J. L. e Silva, 2005; Steinman & Watson, 1941).

Em 1761, nasceu na Escócia John Rennie, destacado como um dos maiores construtores de pontes ingleses de sua geração e sucessor da fama de Perronet. Após sua formação e experiências internacionais, construiu aos 24 anos sua primeira grande obra sobre o rio *Water of Leith*, em Edimburgo, uma ponte de arco elíptico de três vãos.

As pontes Waterloo (considerada a mais famosa), Southwark e New London são outras pontes projetadas por Rennie, que tiveram grande destaque em sua história (Steinman & Watson, 1941; Whitney, 1929).

2.2.4 IDADE CONTEMPORÂNEA

A Idade Contemporânea foi marcada pela evolução dos materiais e sistemas estruturais, impulsionando o desenvolvimento de pontes metálicas, de betão armado e de betão pré-esforçado.

2.2.4.1 REVOLUÇÃO INDUSTRIAL E O SURGIMENTO DAS PONTES DE FERRO

No final do século XVIII, a Revolução Industrial na Inglaterra impulsionou a substituição gradual de processos artesanais por métodos mecanizados, promovendo avanços significativos na indústria e na construção. Nesse contexto, o ferro passou a substituir a madeira e a pedra, permitindo estruturas mais leves, econômicas e capazes de vencer maiores vãos (P. J. L. e Silva, 2005; Spínola, 2020).

Com a expansão ferroviária a partir de 1830, o crescimento urbano e a necessidade de novas infraestruturas impulsionaram a construção de pontes e estações, ampliando significativamente o uso do ferro nas obras de transporte (Saramago, 2011). As pontes, por sua vez, deveriam ser mais resistentes e robustas para suportar as novas solicitações, devido as intensas cargas pesadas que passariam a ser frequentemente aplicadas sobre suas estruturas.

Projetada por Thomas Farnolls Pritchard e construída por Abraham Darby, a primeira ponte de ferro fundido foi erguida sobre o Rio Severn, em Coalbrookdale, na Inglaterra, em 1779. A Ponte de Coalbrookdale, Figura 3, é totalmente constituída de ferro fundido e apresenta um vão principal que vence 30,6m (Marinho, 2012; Saramago, 2011; Spínola, 2020).



Figura 3 - Ponte de Coalbrookdale, Inglaterra.
Fonte: Adaptado de P. J. L. e Silva (2005).

Por ser a primeira vez utilizando o ferro na construção de pontes, o formato em arco utilizado na Ponte de Coalbrookdale, é devido a familiaridade constituída já com outros materiais, como a pedra, uma vez que ainda não conhecia como o ferro iria se expressar (Steinman & Watson, 1941).

2.2.4.2 PONTES DE AÇO

O auxílio da matemática e das análises estruturais, permitiu compreender que muitas pontes de ferro fundido colapsavam devido o material não apresentar resistência adequada às forças de tração. Visto isso, a partir de 1850, o ferro forjado substituiu o ferro fundido, até o

final do século XIX, quando o aço passou a ser o material predominante devido ser leve, resistente e que tende a suportar 20% mais carga que o ferro forjado.

Após investigações a respeito do aço, Albert T. Hill declarou que “a construção de aço é, sem dúvida, a construção do futuro próximo” [Tradução do autor]. Essa previsão se confirmou com a viabilização das grandes pontes da era moderna, como as pontes de arco Eads e Hell Gate, os grandes *cantilevers* Firth of Forth e Quebec, e as pontes suspensas Manhattan e Golden Gate. O emprego desse material também impulsionou a evolução do design de treliça, originando tipologias como o arco treliçado, o *cantilever* de treliça e a ponte suspensa (Steinman & Watson, 1941).

A consolidação do aço na engenharia de pontes pode ser vista na Ponte Dom Luís I, no Porto, inaugurada em 1886, na Figura 4. Projetada por Théophile Seyrig, antigo sócio de Gustave Eiffel ao serviço da empresa belga, *Société Willebroeck* (Infraestruturas de Portugal, [s.d.]). A ponte metálica em aço é composta por um arco, cinco pilares intermediários e dois tabuleiros, com extensões de 391,25 m no superior e 174 m no inferior.



Figura 4 - Ponte Dom Luís I, Porto.
Fonte: Autoria Própria (2025).

2.2.4.3 PONTES DE BETÃO

No contexto das construções de Pontes e na Engenharia Civil num geral, o betão é fundamental por garantir resistência, durabilidade, impermeabilidade e adaptabilidade às obras. Ao ser combinado com agregados e reforçado com aço, abriu caminho para experimentações que resultariam na consolidação do betão armado como solução estrutural inovadora.

A partir das propriedades de impermeabilidade do betão, Joseph Louis Lambot patenteou um método de moldagem de estruturas impermeáveis na aplicação do betão sobre uma trama ou malha composta de finas barras de ferro (ADDIS B., 2009, p. 346 apud Saramago, 2011). Posteriormente, em 1867, Joseph Monier, creditado como o inventor do betão armado, começou a adicionar malhas de aço em vasos de betão, para aumentar sua resistência, ideia que posteriormente levaria a Monier perceber o potencial uso de sua aplicação na construção civil,

garantindo-o patentes que abrangiam edifícios, pontes e outras estruturas. (Marinho, 2012; Saramago, 2011; Spínola, 2020).

Em 1877, o advogado norte americano Thaddeus Hyatt publicou uma série de ensaios em peças de betão armado. Seus estudos destacaram a importância da boa aderência entre os dois materiais e o posicionamento correto das barras de aço, para que esse material pudesse colaborar eficientemente na resistência (Bastos, 2023).

No início do século XX, é que a construção de pontes em betão armado se consolidaria, com a difusão de sistemas estruturais em arco, viga e pórtico, permitindo vencer vãos de até 30m, por mais que o betão armado já tivesse sido utilizado na construção do tabuleiro de pontes de betão simples (El Debs & Takeya, 2007).

De acordo com Steinman & Watson (1941), a Ponte Plougastel (em francês *Pont de Plougastel*), vista na Figura 5, sobre o rio Elorn, na França, projetada e construída por Eugène Freyssinet, é uma das mais notáveis e típicas da construção francesa de pontes em betão armado. Inaugurada para o tráfego em 1930, com três arcos de 186,5 m de comprimento, estabeleceu o recorde mundial de vão em betão armado até 1940.



Figura 5 - Ponte Plougastel, França.
Fonte: Adaptado de Marinho (2012).

O que torna a Ponte Plougastel um marco da Engenharia Moderna, é que ela representa a primeira aplicação de grande escala do método Freyssinet. Ao demonstrar a viabilidade do betão pré-esforçado em arcos de grandes vãos, a obra evidenciou como o pré-esforço controlado dos cabos de aço pode manter o betão comprimido, evitando fissuras e deformações excessivas. Este feito consolidou Freyssinet como referência mundial, inaugurando uma nova era na concepção e execução de pontes de betão.

2.2.4.4 PONTES DE BETÃO PRÉ-ESFORÇADO

Como vimos anteriormente, Freyssinet foi referência mundial na utilização de pré-esforço em suas obras. Em 1928, ele publicou um estudo, propondo a utilização de aços de alta resistência sob a forma de cordoalhas para superar as perdas por retração e fluência do betão, desenvolvendo métodos construtivos, equipamentos e aços especiais (Bastos, 2025).

A Segunda Guerra Mundial (1939-1945) é um marco importantíssimo na Idade Contemporânea. Após o seu fim, grande parte da Europa estava destruída, resultando na necessidade de reconstruir as pontes arrasadas nos conflitos e construir novas. Desse modo, o pré-esforço utilizado principalmente em pontes, ganhou um grande impulso na Europa, o que

viria a difundir por todo o mundo, devido ao seu sucesso (Bastos, 2023; Marinho, 2012; Santos, 2015).

Engenheiros como Ulrich Finsterwalder e Fritz Leonhardt são grandes referências da utilização do betão pré-esforçado em pontes, entre outros profissionais que também contribuíram para esse avanço. Eles foram responsáveis por desenvolver técnicas e sistemas de pré-esforço (Bastos, 2025).

Em 1950, o Engenheiro Finsterwalder introduziu de forma pioneira o método de construção por balanços sucessivos para a construção de pontes em betão pré-esforçado, a partir de então, o método tomou grandes proporcionalidades (Oyamada, 2004). Segundo Marinho (2012), o Engenheiro Finsterwalder consolidou o método de construção em balanço sucessivo, aplicando-o na construção da Ponte Bendorf, na Alemanha, em 1962, que apresenta pilares finos e um vão central de 202 m. A utilização deste método na obra resultou na redução de custos, devido a não utilização de cimbramento sobre a água e permitiu a diminuição da seção da viga, resultando, consequentemente, a economia de material.

Paralelamente, o Engenheiro F. Leonhardt foi pioneiro e se tornou referência na utilização do MLI em pontes, realizado sem a ajuda de cimbramento, método que só foi possível devido o advento do pré-esforço nas vigas de betão e de novos materiais – especialmente o Politetrafluoretileno (PTFE) ou como ficou conhecido comercialmente Teflon[®] – desenvolvido no período pós-guerra.

2.3 MÉTODOS CONSTRUTIVOS DE PONTES

A evolução das pontes, ao longo da história, está intrinsecamente relacionada não apenas ao desenvolvimento dos materiais de construção, como por exemplo, a pedra, o ferro, o aço e o betão, mas também à forma como esses materiais são empregados e às técnicas utilizadas para erigir as estruturas. O aperfeiçoamento dos métodos construtivos representa, portanto, um marco decisivo na engenharia de pontes, influenciando diretamente a viabilidade técnica, o custo, o prazo e a durabilidade das obras.

Os métodos construtivos de pontes podem ser classificados em duas grandes categorias: com apoio provisório, cimbramento, e sem apoio provisório, sendo esta última subdividida em técnicas que utilizam dispositivos ou processos especiais, como o Cimb্রে Autolancável, o Método dos Avanços Sucessivos e o MLI.

Conforme Nunes (2017), a escolha do método construtivo é um processo iterativo que influencia na concepção, no projeto e na avaliação dos esforços solicitantes, e que depende de uma série de fatores relacionados à nova ponte a ser construída, tais como: as condições locais da obra, características geográficas e geotécnicas.

2.3.1 CIMBRAMENTO

O Cimbramento, também referido na literatura portuguesa como cavalete apoiado no terreno, trata-se do processo construtivo mais antigo podendo ser considerado o método tradicional de execução (Almeida, 2016; El Debs & Takeya, 2007; Teixeira, 2015).

No passado, as estruturas de Cimbramento eram feitas em madeira, mas com a evolução dos materiais e das técnicas construtivas, tornou-se mais usual a utilização de perfis ou tubos metálicos (El Debs & Takeya, 2007), que oferecem maior capacidade resistente, durabilidade e rapidez de montagem, podendo também ser reaproveitado em outras obras.

Como visto na Figura 6, a técnica deste sistema construtivo consiste na execução das cofragens do tabuleiro sobre cimbres fixos ao solo, os quais descarregam todas as cargas atuantes do processo executivo diretamente no terreno. Para isso, é essencial que o terreno apresente capacidade de suporte adequada e que a estrutura de cimbra seja dimensionada para resistir às cargas da construção (Almeida, 2016; Teixeira, 2015).

O método do Cimbramento é recomendado para alturas de até 20 m e vãos de até 40 m, pois o custo e o risco deixam de compensar acima destes valores, abrindo espaço para outros métodos.



Figura 6 - Estrutura de Cimbramento utilizada para execução de tabuleiro de ponte.
Fonte: ConstruGomes.

Devido à grande quantidade de solicitações atuantes sobre as estruturas de Cimbramento, é conveniente a adoção de contraventamentos em todos os seus elementos, mesmo quando a altura não é elevada. Quanto maior a altura do sistema, maior é a suscetibilidade a instabilidade, como a flambagem. Além disso, para ajudar a distribuição das forças ao solo, convém apoiar a estrutura sobre tábuas de madeira ou blocos maciços de betão, aumentando a área de contato e reduzindo as tensões transmitidas ao terreno.

Trata-se de um método que permite a execução de diferentes tipos de tabuleiros e comprimentos de vãos. Contudo, ocupa toda a área do terreno abaixo da obra, já que o Cimbramento precisa acompanhar a extensão total do vão, impossibilitando a travessia de veículos e pessoas durante a fase executiva. Em vãos relativamente curtos, é possível adotar o Cimbramento total, no qual todo o tabuleiro é executado em uma única fase, permitindo que a estrutura entre diretamente em funcionamento com o seu esquema estrutural final. Entretanto, por não se tratar de um processo cíclico, a estrutura do Cimbramento deve ser totalmente

desmontada para ser utilizada em outro trecho, caso seja uma obra extensa – Construção Tramo-a-Tramo, o que se torna desvantajoso. Além disso, a grande quantidade de material necessária para montar o cembre ao longo de todo o vão faz com que o custo da obra aumente significativamente. Dessa forma, para vãos maiores ou condições menos favoráveis, outros métodos tornam-se mais adequados.

2.3.2 CIMBRE AUTOLANÇÁVEL

O método do Cembre Autolanzável é, para alguns autores portugueses, também conhecido como método de Viga de Lançamento (LIN, 1963 apud Afonso, 2007, p. 22). Em Portugal, os Cimbres Autolanzáveis são o método mais utilizado na construção de pontes, principalmente porque muitos dos equipamentos empregados nesse processo foram adaptados com a adição de cofragens, aproveitando-se recursos originalmente destinados ao método de Viga de Lançamento (Afonso, 2007; Marinho, 2012).

Este método trata-se da utilização de equipamentos completos com estrutura metálica, que é suportada pelos próprios apoios das pontes, sem requerer escoramento ao solo. A estrutura é provida com cofragens para cobrir um vão inteiro e pode se deslocar mecanicamente de um vão para outro, construindo a superestrutura em uma única direção, tramo a tramo. As juntas de betonagem são geralmente localizadas nas zonas de momento nulo. O método caracteriza como uma verdadeira oficina móvel, que se desloca deixando para atrás um tabuleiro já auto-suportado em sua posição definitiva (Baptista, 1995).

Conforme Baptista (1995), os Cimbres Autolanzáveis podem ser classificados essencialmente em dois tipos, sendo, a Viga Autolanzável Superior, visto na Figura 5, e a Viga Autolanzável Inferior, na Figura 6. Esta designação surge da sua posição em relação ao tabuleiro. Na viga superior, a estrutura metálica que sustenta a cofragem fica acima do tabuleiro, sendo indicada quando o espaço abaixo da ponte é limitado. Já na viga inferior, a estrutura de suporte está abaixo do tabuleiro, transmitindo o peso da superestrutura diretamente para os apoios, o que é vantajoso em vãos altos ou quando se deseja manter os espaços livres acima da ponte.



(a)

Figura 7 - Cembre autolanzável superior no Viaduto Rodoanel, São Paulo.
Fonte: ConstruGomes.



(b)

Figura 8 - Cembre autolanzável inferior no Viaduto do Corgo, Vila Real.
Fonte: ConstruGomes.

Os Cimbres Autolançáveis são compostos por (Afonso, 2007):

- Vigas autoportantes;
- Cofragens;
- Estrutura de apoio nos pilares da ponte;
- Sistema de movimentação.

Uma vez montados, os cimbres permitem a execução de um tramo inteiro em um único ciclo de betonagem, que, ao ser finalizado, possibilita o avanço para o próximo tramo. Esse método se mostra eficiente e suficientemente rápido para a construção do tabuleiro, já que os ciclos são repetitivos e aumentam o rendimento das equipas de trabalho. Em média, o ciclo de construção de cada tramo dura cerca de uma semana (Baptista, 1995).

2.3.2.1 VANTAGENS E DESVANTAGENS POR CIMBRE AUTOLANÇÁVEL

A seguir são apresentadas algumas das principais vantagens a respeito do Cimbra Autolançável (Baptista, 1995; Barbedo, 2013; Marinho, 2012):

- Quando comparado a outros métodos construtivos, o método do Cimbra Autolançável se mostra mais eficiente, principalmente pela rapidez com que o equipamento chega ao local de trabalho. Além disso, ele concentra todas as operações necessárias em um único equipamento, tornando o processo mais seguro. As equipas trabalham sobre amplas plataformas, muitas vezes cobertas, o que as protege das intempéries e melhora as condições de trabalho.
- Possibilidade de realizar alterações durante a execução da obra, graças à sistematização das operações.
- Rapidez de execução do tabuleiro, visto que, o método permite concluir cada tramo em um único ciclo de betonagem, o que reduz significativamente o tempo total da obra. Reduzindo ainda mais o tempo se o tabuleiro for executado através de seções pré-moldadas.
- Dispensa o uso de escoramento, os trabalhos podem ser realizados sem depender das condições do terreno.

Como desvantagem, a estrutura utilizada no processo construtivo é demasiado cara, sendo competitiva para vãos de aproximadamente 50 m, dependendo, é claro, do peso de cada tramo. Ela pode ser aplicada em comprimentos totais da ordem de 300 m, desde que os custos com equipamento, transporte, montagem e desmontagem possam ser razoavelmente amortizados (Baptista, 1995; Barbedo, 2013; Marinho, 2012).

2.3.3 AVANÇOS SUCESSIVOS

O método dos Avanços Sucessivos consiste na construção do tabuleiro em segmentos, iniciando a construção a partir dos pilares ou a partir de um dos encontros. O primeiro segmento é executado no topo do pilar. A partir dele, os segmentos subsequentes são expandidos

sucessivamente para ambos os lados, de forma simétrica, visando manter o equilíbrio estrutural, reduzindo os esforços de flexão nos pilares e fundações. Quando iniciada a partir de um encontro, a expansão ocorre unilateralmente, até se encontrar com o segmento vindo do lado oposto. A utilização desse método permite a construção simultânea a partir de um ou mais pilares, de modo que os segmentos se encontrem ao meio do vão, completando assim a totalidade do tabuleiro. Os seguimentos são geralmente constituídos por aduelas de betão pré-fabricadas ou moldadas *in loco*, apresentando comprimentos entre 3 e 6 m.

Até que os segmentos se encontrem com o segmento vindo na direção oposta ou com os apoios, o momento negativo sobre eles é gerado a cada aduela assentada, exigindo a aplicação de pré-esforço no topo da seção para equilibrar esses momentos negativos (Peres, 2016). O suporte para cada nova aduela, seja construída *in loco* ou alocada, no caso das pré-fabricadas é fornecido pela aduela anterior, desde que esta tenha atingido resistência suficiente para a aplicação do pré-esforço, permitindo a construção da aduela seguinte. Além de suportar o peso da nova aduela, a aduela anterior deve resistir ao peso dos equipamentos utilizados na execução da estrutura, assim como ao das cofragens, no caso das aduelas moldadas *in loco*. À medida que cada nova aduela é concluída, novos cabos são introduzidos para suportar as cargas aplicadas (Marinho, 2012).

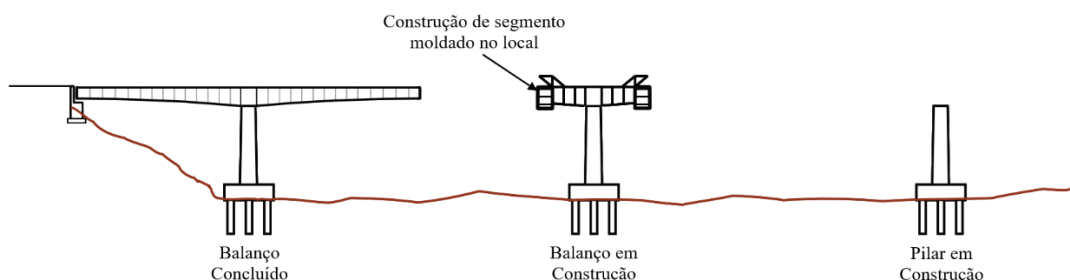


Figura 9 - Esquema dos Avanços Sucessivos com Aduelas betonadas *in loco*.

Fonte: Adaptado de Veletzos (2007).

A aplicação do método por Avanços Sucessivos ocorre principalmente em obras de Pontes e Viadutos com vãos médios e longos, geralmente entre os 50 m e 150 m por ser a solução mais satisfatória tanto do ponto de vista econômico como do ponto de vista técnico, com capacidade de alcançar vãos superiores a 300 m. Possibilitando a construção de um número menor de pilares de sustentação, sendo especialmente indicada em situações em que o uso de escoramentos convencionais é limitado por condições topográficas, ambientais ou de tráfego (Marinho, 2012; Oyamada, 2004; Peres, 2016). Este método se mostra tecnicamente vantajoso na execução de superestruturas com alinhamentos curvos e raios de curvatura reduzidos.

Por ser um método cíclico de construção, o método dos Avanços Sucessivos se torna vantajoso devido a possibilidade do reaproveitamento das formas a serem empregadas na execução das aduelas reduzindo o custo de mão de obra e aumentando significativamente a rapidez de execução. As aduelas moldadas *in loco* possuem um ciclo de aproximadamente sete dias para serem executadas e, a cada avanço do processo, a execução torna-se mais eficiente devido à pouca mudança de uma aduela a outra (Oyamada, 2004).



Figura 10 - Método dos Avanços Sucessivos sobre o Rio Kwanza, em Angola.
Fonte: ARMANDO RITO ENGENHARIA.

De acordo com Moás (1994), esse método pode-se adaptar a diversos tipos de sistemas estruturais, como:

- Pontes em viga (contínua ou Gerber);
- Pontes em pórtico (com rótulas ou sem rótulas);
- Pontes em arco;
- Pontes de tirantes.

2.3.3.1 VANTAGENS E DESVANTAGENS POR AVANÇOS SUCESSIVOS

O uso deste método dispensa a necessidade de cimbres e escoramentos, permitindo a construção da estrutura com pilares altos sobre vales profundos, rios com correntezas intensas, vias de tráfego intenso ou com gabarito limitado, locais onde a utilização de pilares intermediários de sustentação da superestrutura seria inviável. Dessa forma, todo o espaço inferior permanece livre, favorecendo a continuidade das atividades abaixo da obra (Moás, 1994; Nunes, 2017; Oyamada, 2004; P. J. L. e Silva, 2005).

Este método permite a construção de pontes com vão livres, que podem ultrapassar os 300 m, reduzindo, conseqüentemente, a necessidade de um maior número de pilares de apoio, os quais, em muitos casos, interferem no fluxo de tráfego sob a estrutura (Oyamada, 2004).

A construção da superestrutura é realizada a partir das partes já executadas, após estas atingirem a resistência necessária. Como os materiais e equipamentos são movimentados sobre as seções já completas da estrutura, minimizam-se os distúrbios na área ao redor da zona de construção.

Um fator importante para a redução do custo total da construção é a reutilização das formas durante o processo. Por se tratar de um método cíclico, as mesmas cofragens podem ser reaproveitadas a cada aduela finalizada, o que reduz o consumo de materiais e de mão de obra, além de aumentar consideravelmente a rapidez de execução. Após a execução da primeira aduela, as etapas subsequentes tornam-se mais fáceis, devido às poucas alterações necessárias no processo.

Além das vantagens mencionadas, o método dos avanços sucessivos apresenta alta produtividade, permitindo que a execução do tabuleiro atinja velocidade de até 10 m por dia, no caso de aduelas pré-fabricadas, e dependendo das condições do canteiro (Moás, 1994). Segundo Oyamada (2004), cada aduela moldada *in loco* pode ser executada em aproximadamente 7 dias, mesmo com uma equipa de produção reduzida, o que torna o processo facilmente programável e controlável.

Uma das principais desvantagens desse método é a necessidade de contar com um empreiteiro responsável pela obra, devido à elevada exigência de capacidade técnica para sua execução. Além disso, exige-se controlo geométrico rigoroso durante toda a obra e grande rigor na execução dos avanços das cofragens (Ferraz, 2001 apud Barbedo, 2013, p. 41).

2.4 MÉTODO DE LANÇAMENTO INCREMENTAL

O MLI é um processo construtivo altamente mecanizado utilizado na construção de pontes. Nesse método, a superestrutura, geralmente em betão pré-esforçado, é executado em tramos sucessivos em um estaleiro localizado atrás de um dos encontros da ponte. Cada novo segmento é betonado diretamente contra a anterior e, após o ganho de resistência do betão, a estrutura resultante é deslocada para frente pelo comprimento de uma unidade. Esse procedimento é repetido sucessivamente até que o tabuleiro alcance sua posição final, formando uma estrutura contínua (VSL International Ltd., 1977).

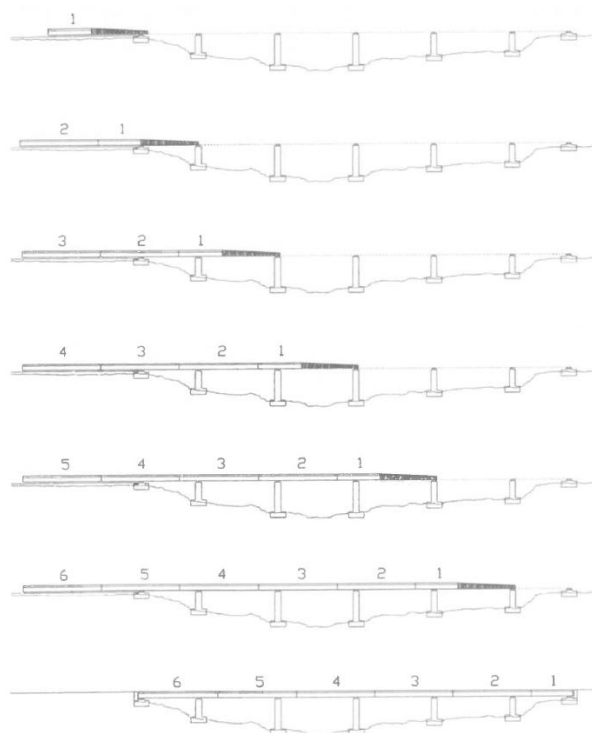


Figura 11 - Sequência de lançamento do tabuleiro no MLI.
Fonte: Waimberg (2002).

2.4.1 LANÇAMENTO INCREMENTAL

Como já vimos, o Engenheiro F. Leonhardt foi o precursor na utilização do MLI para pontes em betão pré-esforçado, sem o auxílio de cimbramento. No entanto, segundo Waimberg (2002), as primeiras aplicações desse princípio construtivo, que consistia estruturar os elementos fora de sua posição definitiva e deslocá-las até a posição final, ocorreram em viadutos metálicos, em meados do século XIX, período em que o ferro forjado abria espaço ao aço. Neste contexto, as primeiras operações de lançamento, realizadas de modo incremental em viadutos metálicos datam de 1860 (Martins, 2009).

A aplicação dessa técnica no viaduto metálico foi possível devido as características de elevada resistência do material, tanto na tração quanto na compressão, permitindo a absorção dos esforços durante o lançamento da estrutura, que está sujeita a variações nas condições de apoio, além de ser relativamente leve (Martins, 2009; Waimberg, 2002). A estrutura era deslocada sobre apoios de madeira engraxados ou roletes metálicos, que apresentavam fatores de atritos relativamente altos, mas utilizavam equipamentos simples para a execução, como guinchos (Waimberg, 2002).

A aplicação do método em pontes de betão, só foi possível com o advento do betão pré-esforçado, já que o betão convencional apresenta baixa resistência a tração. Consequentemente, a primeira utilização desse método em betão pré-esforçado ocorreu na Ponte *Vaux-Sur-Seine*, pela empresa Coignet, em 1950, na França.

As primeiras tentativas de lançamento incremental de pontes em betão ainda contavam com o auxílio de cimbramento, que sustentava a estrutura até que os pilares sucessores pudessem suportá-la. Na Ponte *Vaux-sur-Seine* o cimbramento era de madeira e utilizava de estaiamento na extremidade da obra para auxiliar.

Tempos depois, a primeira ponte em betão pré-esforçado que F. Leonhardt e Willi Baur lançou através do lançamento incremental foi composta de segmentos pré-moldados de 9,50 m de comprimento, vencendo um vão de 280 m e que também recorria ao uso de cimbramento para sua execução, onde os segmentos pré-moldados se deslocavam para sua posição final através de trilhos de madeira lubrificados com óleo de motor para redução do atrito entre os apoios e os segmentos deslocados. Essa ponte foi erguida sobre o rio Ager, na Áustria, em 1959 (Martins, 2009; Waimberg, 2002).

A ponte sobre o Rio Caroni, na Venezuela, que F. Leonhardt projetou em 1961 e foi executada pela empresa Ed. Züblin AG entre 1962 e 1964, foi a primeira a dispensar totalmente o uso de cimbramento para sustentar a estrutura, processo que ficou conhecido como *Taktschiebeverfahren* ou processo de lançamento cíclico (Waimberg, 2002).



Figura 12 - Ponte sobre o Rio Caroni, Venezuela.

Fonte: VSL International Ltd. (1977).

Esta ponte foi projetada com 15,6 m de largura, vãos de extremidades de 48 m e vãos intermediários de 96 m de comprimento ao longo de 500 m de extensão. Atrás de um dos encontros eram executados os segmentados pré-moldados de 9,20 m de comprimento, sendo posteriormente empurrados até a posição final, conectados com juntas de 40 cm betonadas *in-loco* (Seabra, 2014; Waimberg, 2002). Segundo Waimberg (2002), após a conclusão do lançamento dos tabuleiros, aplicava-se um pré-esforço centrado por meio de cabos externos, posicionadas internamente ao caixão, junto às almas.

Para o lançamento dos pré-moldados, foi conectada uma treliça metálica, nomeada de nariz metálico, de 17 m de comprimentos à frente do primeiro segmento. De forma provisória, foram construídos pilares metálicos intermediando os vãos de 96 m, com o intuito de reduzir o vão a ser vencido e, conseqüentemente, diminuir os esforços durante o lançamento (Seabra, 2014; Waimberg, 2002).

Durante o deslizamento dos segmentos, a força necessária era gerada por dois macacos de protensão ancorados no encontro, que tracionavam as cordoalhas fixadas nas laterais da seção. Os apoios, sobre os quais os tabuleiros se deslocavam, eram revestidos por chapas de aço inoxidável, recobertas com uma camada de apoio em Teflon®, a fim de reduzir o atrito de arrasto e, conseqüentemente, tornar o processo mais eficiente e dinâmico (Waimberg, 2002). A camada de apoio em Teflon®, permite um deslize melhor do tabuleiro, uma vez que o material apresenta coeficiente de atrito próximo de 0,05, valor significativamente inferior ao do aço (Seabra, 2014). Como esses aparelhos de deslizamento se deslocavam durante o processo, ao atingirem o limite da chapa metálica era necessário interromper a operação para reposicioná-las ao início. Para possibilitar essa realocação, o tabuleiro era elevado alguns centímetros com o auxílio de dois macacos hidráulicos sobre cada um dos apoios e, depois que realocassem a operação era reiniciada, caracterizando um processo descontínuo no MLI (Waimberg, 2002).

Bernhard Gohler se juntou a equipa de Leonhardt nos acabamentos da obra sobre o Rio Caroni, contribuindo com a melhoria do método construtivo – que permanecem até o momento. Dentre essas melhorias são listadas (GOHLER; PERSON, 2000, apud Martins, 2009, p. 21):

- Com o intuito de ciclar a betonagem em períodos de 1 semana, foi adicionado um canteiro de pré-fabricação do tabuleiro com cofragem fixa localizada atrás do encontro;

- Lançamento em estrutura contínua simplificando o processo, evitando elevações adicionais sobre os apoios e reduzindo o caráter descontínuo do lançamento;
- Distinção entre o pré-esforço aplicado a fase inicial e aquele destinado a fase final.

O processo contínuo viria a ser implementado nos anos seguintes, com a colocação manual e sucessiva dos aparelhos de apoio em Teflon[®] entre o tabuleiro e o apoio, sendo também aplicados nos apoios laterais responsáveis pela guia do tabuleiro. Ao final do processo, com os segmentos já posicionados em sua localização definitiva, o tabuleiro é elevado por meio de macacos hidráulicos, para que os apoios provisórios sejam substituídos pelos permanentes.

O MLI na forma que conhecemos hoje, resultou do aprimoramento obtido a partir das experiências adquiridas anteriormente nas pontes sobre os rios Caroni e Ager, as quais evidenciaram elevada precisão na montagem e grande esforço para betonar as juntas entre as seções pré-moldadas. Dessa forma, a primeira aplicação consolidada do método ocorreu somente em 1965, em uma ponte rodoviária sobre o rio Inn em Kufstein, na Áustria.

O tabuleiro da ponte sobre o rio Inn foi construído segmentado atrás do encontro, sobre uma plataforma alinhada ao eixo da ponte. Cada novo segmento era moldado, e após a cura, o tabuleiro era empurrado a frente, liberando espaço para moldar a próxima seção. Essa sequência repetia-se sucessivamente até que o tabuleiro estivesse completo. Para evitar a necessidade de pré-esforço durante a etapa de lançamento, recorreu-se ao uso de pilares intermediários, enquanto as tensões de lançamento eram controladas. Ao final, aplicou-se pré-esforço parabólico para garantir o desempenho estrutural do tabuleiro (Rosignoli, 2014).

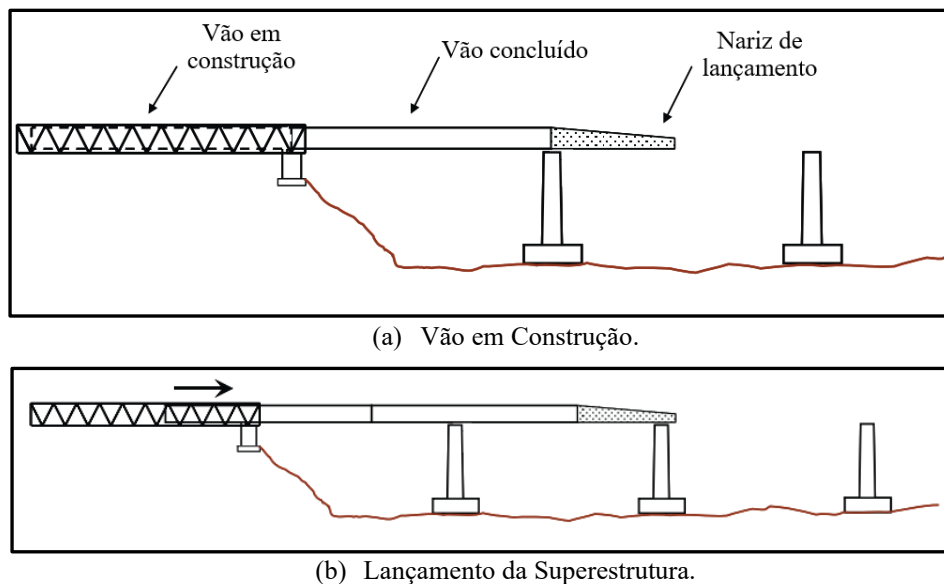


Figura 13 - Esquema do MLI.
Fonte: Adaptado de Veletz (2007).

Segundo Martins (2009), os anos subsequentes foram marcados pela competição intensa entre os diferentes processos construtivos. Neste período, a construção em Avanços Sucessivos também começou a ser aplicada em pontes de longos vãos em betão pré-esforçado (Rosignoli, 2014).

2.4.1.1 LANÇAMENTO INCREMENTAL NO BRASIL

No Brasil, o MLI (em inglês: *Incremental Launching Method*), é conhecido por outros nomes, como *Deslocamento Sucessivo*, *Deslocamento Progressivo*, *Segmentos Empurrados*, *Obra Empurrada* ou *Lançamento Progressivo*.

A primeira ponte a ser executada por esse método no país foi uma passarela que conecta o bairro do Jaguaré à estação Presidente Altino, em São Paulo, em 1978. O vão vencido sobrepunha o pátio de manobras de trens, apresentando, em uma extremidade, acesso por escadas e, na outra, uma rampa de vão curvo. A passarela foi executada pela empresa Azevedo & Travassos S/A e projetada por Maubertec Engenharia e Projetos Ltda (Waimberg, 2002).

Na ficha técnica disponibilizada pela Maubertec, o método foi apresentado como uma solução alternativa e inovadora no país. Sua adoção ocorreu por dispensar o uso de cimbramento durante a execução, já que o vão a ser vencido situava-se acima de várias linhas ferroviárias com intenso movimento de cargas e passageiros. O documento também destaca que a metodologia empregada possibilitou a continuidade das obras sem interrupção das operações ferroviárias, além de proporcionar economia e maior velocidade em sua execução (Maubertec, 1979).



Figura 14 - Passarela para pedestres sobre Ferrovia da FEPASA.

Fonte: Maubertec (1979).

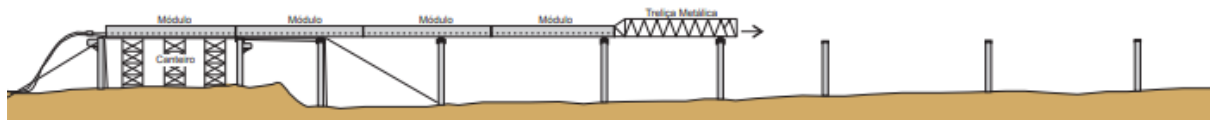


Figura 15 - Esquema representativo da construção pelo MLI da Passarela.

Fonte: Maubertec (1979).

A passarela foi construída em betão pré-esforçado, com comprimento total de 170 m. No estaleiro de obras de apenas 200 m², executavam-se betonagens segmentadas com comprimento de 19 m lançadas sucessivamente, sempre utilizando da mesma forma. O primeiro módulo era acoplado ao nariz metálico reduzindo os esforços solicitantes. Por um sistema de tração, o módulo era deslocado sobre os aparelhos de apoio revestido com teflon sobre a chapa de aço inoxidável, liberando a forma para a betonagem do segmento seguinte. Em seguida, o novo módulo era pré-esforçado e solidarizado ao anterior por pré-esforço central. Após a solidarização, o conjunto é novamente empurrado, reiniciando a operação. Na passarela de Presidente Altino, cada ciclo tinha duração aproximada de uma semana, sendo executados ao todo 9 módulos de 19 m de comprimento cada (Maubertec, 1979).

2.4.1.2 LANÇAMENTO INCREMENTAL NA EUROPA

Na Europa, o método teve ampla aceitação. Em Portugal, nota-se sua aplicação na montagem dos viadutos sobre o rio Sousa II (2010) e no viaduto de S. Sebastião (2005), executados pela empresa Teixeira Duarte Engenharia e Construção; no Viaduto IX (2005) e na ponte sobre o rio Tâmega (2005), projetados pela Armando Rito Engenharia; no viaduto de Águeda (1998); e no viaduto sobre o rio Sado.



Figura 16 - Viaduto sobre o Rio Sousa II.
Fonte: Teixeira Duarte Construção.



Figura 17 - Viaduto IX.
Fonte: Armando Rito Engenharia.

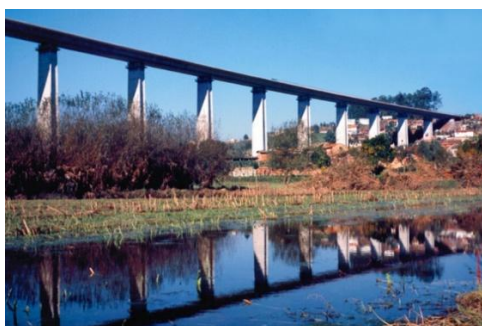


Figura 18 - Ponte sobre o rio Águeda.
Fonte: LCW Consult.



Figura 19 - Viaduto de S. Sebastião.
Fonte: Teixeira Duarte Construção.

Ainda na Europa, o Viaduto Millau de 2004, visto na Figura 20, é uma obra excepcional da Engenharia Civil, detendo o recorde de ponte mais alta do continente e figurando entre as mais altas do mundo. Possui também o pilar mais alto do planeta e é amplamente reconhecido como um dos melhores exemplos da aplicação do MLI.

Localizado em uma das principais rodovias que ligam o Norte ao Sul da França – Rodovia A75 – O Viaduto estaiado múltiplo de Millau transpõe o desfiladeiro do Tarn a 270 m acima do fundo do vale. O viaduto tem 2.460 m de extensão e apresenta tabuleiro de aço apoiado em 7 pilares, sendo o pilar número 2 o pilar mais alto do mundo, com 245 m, e o pilar número 3 com 220 m de altura (S. Doyle, 2021, apud Lin, 2022, p. 86).



Figura 20 - Avanço do tabuleiro pelo MLI do Viaduto Millau, na França.
Fonte: Martin et al. (2004).

No que se refere ao processo construtivo, o lançamento da ponte foi dividido em 6 etapas principais, conforme descrito por Lin (2022):

- 1ª Etapa: Escavação da fossa de fundação do pilar da ponte;
- 2ª Etapa: Betonagem dos pilares;
- 3ª Etapa: Suporte temporário;
- 4ª Etapa: Construção do tabuleiro da ponte;
- 5ª Etapa: Tração dos cabos de aço;
- 6ª Etapa: Pavimentação do tabuleiro.

Como o objetivo deste trabalho é o estudo do MLI, serão analisadas apenas as etapas 3 e 4, conforme apresentadas por Lin (2022), não sendo objeto de estudos as demais fases do processo.

O tabuleiro em viga-caixão metálica foi lançado em seções de 171 m partindo de ambos os encontros da estrutura, onde encontraram-se acima do rio Tarn, entre os pilares P2 e P3, para o fechamento final.

O processo de construção do Viaduto Millau consistiu na instalação de apoios provisórios necessários no MLI em vãos maiores. Esses apoios intermediários foram essenciais para controlar os efeitos da gravidade e o atrito entre o tabuleiro e apoio, prevenindo deformações excessivas do tabuleiro durante o avanço. O único trecho que não foi possível a instalação dos apoios provisórios, foram entre os pilares P2 e P3, devido à grande altura do vale, razão pela qual este local foi escolhido para fazer o fechamento final do tabuleiro.

Além disso, foram empregados os macacos hidráulicos sincronizados – elaborados especialmente para esta obra –, instalados sobre os pilares definitivos e os apoios temporários. Cada ciclo de avanço consistia em elevar, deslocar cerca de 600 mm e depois rebaixar o tabuleiro, com uma taxa de avanço aproximada de 10 m/h (National Geographic, 2004).

Para auxiliar ainda mais o controle estrutural, antes de iniciar o lançamento foram construídos em ambos os lados mastros de cabeceira metálicos acoplados com estais com a função de sustentar a frente do tabuleiro enquanto ele se estende sobre o vale – mastros que já faziam parte do projeto final. Esses cabos reduziram momentos fletores e evitaram oscilações do tabuleiro durante o lançamento. Só após a conclusão do deslizamento e da conexão entre as duas partes, que foram montados os outros mastros estaiados da ponte posicionados sobre os pilares. Adicionalmente, foi utilizada uma treliça de lançamento, acoplado à extremidade do tabuleiro e para reduzir os erros de construção, simultaneamente era utilizado um sistema de posicionamento por satélite.



Figura 21 - Viaduto Millau, França.
Fonte: Buckley (2024).

2.4.2 CAMPO DE APLICAÇÃO

De acordo com Martins (2009), o MLI foi desenvolvido para aplicação em pontes implantadas sobre vales e regiões montanhosas, com vãos da ordem de 50 m. Contudo, ao longo do tempo, a sua utilização passou a ser amplamente adotada também em áreas planas, especialmente em situações nas quais o acesso ao nível do solo é restrito ou em que não se mostra conveniente impor interferências significativas, como em travessias sobre vias com tráfego intenso ou linhas ferroviárias.

Sendo um método consideravelmente utilizado em pontes de grande extensão e com múltiplos vãos, o comprimento do vão considerado ideal para aplicação não é consensual na literatura, apresentando divergências entre diferentes autores. Para Martins (2009), o vão ideal situa-se entre os 45 e os 50 m, tornando-se economicamente vantajoso o aumento do comprimento do vão quando a altura dos pilares é elevada. Duarte (2011), indica um intervalo entre 30 e 60 m, podendo ser considerados vãos superiores a 100 m, desde que observadas determinadas restrições técnicas. Já Bernardo (1999) destaca que este método é aplicado na construção de tabuleiros de pontes de betão com vãos médios, da ordem dos 35 a 45 m. Dessa forma, verifica-se que a definição do vão ideal depende das condições estruturais, construtivas e econômicas do empreendimento, não podendo ser estabelecida como um valor único e absoluto. Portanto, é estimado que o comprimento mínimo do tabuleiro para aplicação deste método em uma obra de arte especial, de modo a justificar economicamente os custos associados à sua adoção, seja da ordem de 200 m. Atualmente, admite-se também a aplicação

do método a tabuleiros com comprimentos da ordem de 150 m (Duarte, 2011; Martins, 2009). Martins (2009) também aponta que, para tabuleiros com comprimentos superiores a 600 m, o custo associado ao pré-esforço adicional pode ultrapassar aquele necessário à adoção de outros métodos construtivos mais econômico, tornando recomendável a análise de soluções alternativas. Contudo, o autor ressalta que essa viabilidade é fortemente dependente de diversos fatores, havendo referências na literatura que indicam que esta solução continua a ser economicamente competitiva para comprimentos totais de tabuleiro que variam desde cerca de 100 m até aproximadamente 1000 m.

Estes tabuleiros podem ser executados em betão armado pré-esforçado, metálicos ou mistos de betão e aço, sendo previamente executados em uma das extremidades da ponte, atrás de um dos encontros, sendo que, o tabuleiro pode ser usado em pontes com eixo longitudinal em tangente ou com raio de curvatura constante, tanto em planta como em elevação (Duarte, 2011; Martins, 2009; Schmid, 2005).

Visto que cada seção do tabuleiro é submetida a diferentes estados de momento fletor ao longo do processo de lançamento, alternando entre valores máximos positivos e negativos, a aplicação deste método exige que a altura da seção transversal do tabuleiro seja constante ao longo de toda a sua extensão. Nesse contexto, o tipo de seção mais apropriado e mais frequentemente utilizado é a viga caixão, em razão de sua elevada eficiência estrutural e da boa relação entre os módulos resistentes superior e inferior durante as fases construtivas do lançamento.

2.4.3 PRÉ-ESFORÇO

O pré-esforço de tabuleiros lançados incrementalmente pode ser dividido em duas fases principais: fase de execução e fase de serviço. O pré-esforço de execução corresponde ao sistema necessário para resistir às solicitações durante a fase construtiva, enquanto o pré-esforço de serviço corresponde ao que é instalado após o tabuleiro ser totalmente lançado, com a finalidade de atender às condições estruturais definitivas (Duarte, 2011).

Como já visto anteriormente, os tabuleiros de pontes lançados de forma incremental estão destinados a sofrerem grandes alternâncias entre máximos momentos fletores positivos e negativos durante a fase de lançamento, devido as diferentes configurações de apoio em que a obra passa ao longo do processo construtivo (Martins, 2009; Waimberg, 2002). Nesse contexto, o traçado curvo do pré-esforço, utilizado comumente em pontes de viga contínua, não são eficientes para resistir às solicitações que surgem nessa fase. Isso ocorre porque durante o lançamento, ora as fibras superiores da seção encontram-se tracionadas, ora as fibras inferiores, tornando mais adequada a adoção de pré-esforço com traçado centrado.

Segundo a VSL International Ltd. (1977), o pré-esforço centrado significa que os cabos de pré-esforço são dispostos de forma que as tensões de compressão resultantes em todos os pontos da seção transversal sejam iguais e, portanto, não faz diferença se as tensões de tração produzidas durante a fase de lançamento ocorrerem nas fibras superiores ou inferiores na seção.

Entretanto, essa disposição de cabos adotadas durante a fase de lançamento não se faz eficaz na fase de serviço da estrutura, uma vez que os cabos centrais fornecem suporte, em conjunto com as armaduras, principalmente para resistir às solicitações que surgem durante a

construção. Segundo Martins (2009), ao longo do tabuleiro os cabos de pré-esforço são dispostos retos nos banzos superior e inferior da seção. O autor acrescenta que, na fase final, parte desses cabos pode exercer efeito desfavorável na condição estrutural definitiva e são retirados. Os cabos que permanecem favoráveis na fase de serviço são mantidos e posteriormente complementados com o pré-esforço suplementar, necessário para atender as solicitações da fase de serviço.

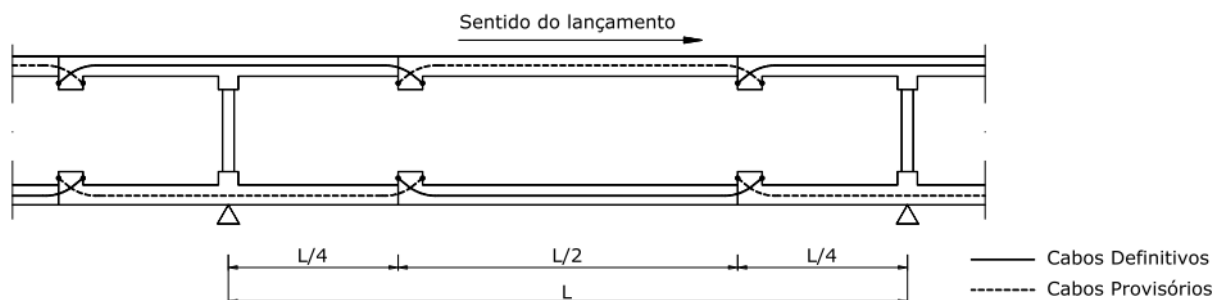


Figura 22 - Pré-esforço centrado. Corte vertical longitudinal do tabuleiro.

Fonte: Martins (2009).

2.4.4 ORGANIZAÇÃO DO ESTALEIRO

O estaleiro está associado como uma das principais vantagens do MLI, devido toda a área de fabricação do tabuleiro estar localizada fixa atrás de um dos encontros da ponte. Em alguns casos, o tabuleiro pode ser lançado a partir de ambos os encontros, fazendo com que tenha a instalação de estaleiros em cada extremidade da estrutura. Normalmente o estaleiro deve possuir pelo menos o dobro do comprimento do maior segmento a ser empurrado na obra, com espaço suficiente para conter as formas, a central de produção do betão, um guindaste sobre trilhos, a central de armadura passivas e ativas, além do equipamento de lançamento. Eventualmente deve possuir uma estrutura simples de betão servindo de apoio para as formas, onde será executado todo o lançamento do tabuleiro bem como uma área destinada à montagem dos cabos de pré-esforço caso eles forem confeccionados no local. Por se tratar de uma instalação fixa, o estaleiro pode ainda ser coberto e protegido das intempéries, o que contribui para maior controlo das condições de produção e qualidade da obra (Duarte, 2011; Schmid, 2005; VSL International Ltd., 1977). Nesse contexto, VSL International Ltd. (1977) acrescenta que, por se tratar de um estaleiro onde as distâncias de transporte são muito curtas, a concentração de equipamentos permite alcançar níveis de qualidade semelhante aos de um processo fabril, alta qualidade.

A área de pré-fabricação do tabuleiro é posicionada alinhadamente ao eixo geométrico longitudinal da ponte, que corresponde a direção de deslocamento do tabuleiro durante o processo de lançamento. Esse alinhamento é essencial porque o tabuleiro é empurrado exatamente no eixo da ponte, passando sobre os apoios provisórios e definitivos até atingir sua posição final (Martins, 2009).

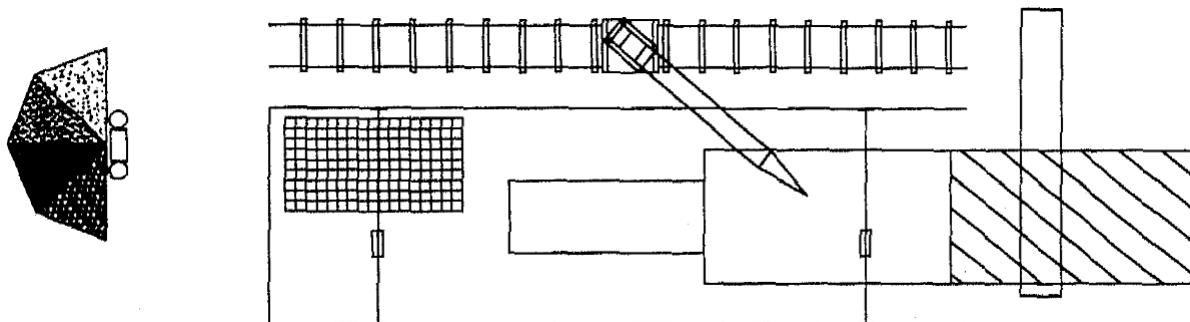


Figura 23 - Exemplo de planta para um estaleiro de MLI.
Fonte: VSL International Ltd. (1977).

O equipamento de macaqueamento localizado no encontro devem ser acessíveis para as operações de lançamento do tabuleiro. Da mesma forma, os apoios temporários instalados nos pilares e na área de fabricação devem permanecer acessíveis (VSL International Ltd., 1977).

2.4.5 ESTRUTURAS AUXILIARES

Vários equipamentos auxiliares são necessários durante a construção da superestrutura da ponte construída por lançamento incremental (VSL International Ltd., 1977). Entre os principais estão o nariz metálico, os macacos hidráulicos e os aparelhos de apoios.

2.4.5.1 NARIZ METÁLICO

O nariz metálico, também denominado *Avant-bec*, é um dos principais equipamentos que caracterizam o MLI, é uma estrutura metálica leve, que tem como principal função reduzir os momentos fletores negativos do segmento atuantes durante a fase de lançamento. Como alternativa ao uso do nariz metálico para reduzir o momento, a extremidade frontal da estrutura pode ser ancorada a partir de um mastro, como representado na Figura 24 (Schmid, 2005; VSL International Ltd., 1977).

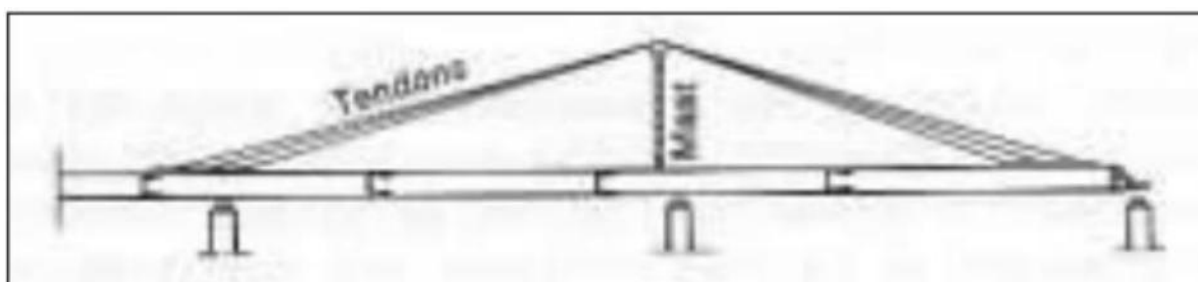


Figura 24 - Exemplo da extremidade frontal ancorada a partir de um mastro.
Fonte: VSL International Ltd. (1977).

O comportamento elástico do nariz metálico pode ser distinguido a partir de três parâmetros adimensionais: (i) a relação entre o comprimento do equipamento e o vão a ser vencido; (ii) a relação entre o peso específico do equipamento e do tabuleiro; e (iii) a relação entre a rigidez à flexão do equipamento e da parte frontal do tabuleiro.

Quando o comprimento do nariz metálico é reduzido, o valor do momento fletor negativo no apoio aumenta significativamente. Por outro lado, quando a extensão do equipamento é maior, observa redução desse momento durante a fase de lançamento (Marinho, 2012; Martins, 2009)

Segundo Schmid (2005), o nariz metálico é constituído por duas vigas de alma cheia, devidamente contraventadas, acopladas no extremo da superestrutura da direção que será lançada. Contudo, quanto à geometria do equipamento, ao longo do tempo já se usaram diferentes tipos de estruturas metálicas, podendo ser mais ou menos rígidas, treliçadas ou formadas por vigas de alma cheia, executadas em aço ou em betão pré-esforçado. Além disso, podem incorporar perfis metálicos de realinhamento ou sistemas hidráulicos para recuperar a deformação elástica durante a fase em consola (Martins, 2009). Atualmente, as estruturas empregadas são feitas de formas modular, permitindo um transporte e montagem facilitado em obra, sendo conectadas através de juntas parafusadas, com peças dimensionadas adequadamente para o serviço proposto.

Segundo Waimberg (2002), a conexão entre nariz metálico e estrutura de betão deve ser adequadamente detalhada, para que garanta a continuidade da estrutura durante o lançamento, permitindo a transmissão de momentos fletores e forças constante entre os elementos. Além disso, após o tabuleiro atingir o último apoio, o equipamento pode ser facilmente desacoplado da estrutura definitiva. Martins (2009) acrescenta que, para que as duas peças, tanto o nariz metálico quanto a estrutura de betão, trabalhem em conjunto na transferência dos momentos fletores, normalmente são adaptadas barras de pré-esforço na região da junta entre os dois elementos.

A medida que o nariz metálico se aproxima ao pilar, é necessário que o equipamento seja realinhado, uma vez que, devido às grandes cargas suportadas, o bico, geralmente, tende estar mais baixo que o nível da obra, caracterizando o comportamento típico de uma viga em balanço. Para recuperar o alinhamento com o topo do pilar, utiliza-se normalmente um macaco hidráulico na ponta do nariz metálico, permitindo o reposicionamento do equipamento antes do apoio no pilar e posteriormente o resto do tabuleiro (Waimberg, 2002).



Figura 25 - Nariz metálico na construção da Ponte sobre Rio Cubal da Hanha.
Fonte: Armando Rito Engenharia (2009).

2.4.5.2 MACACOS HIDRÁULICOS

O deslocamento dos tramos, após o ganho de resistência necessário para a aplicação do pré-esforço de execução, é feito pela combinação de vários macacos hidráulicos no caso de tabuleiros pesados, ou com equipamento mais ligeiros quando se trata de tabuleiros de menor peso, sendo as barras de pré-esforços a solução mais utilizada para esse caso (Seabra, 2014).

O equipamento utilizado para o lançamento de tabuleiros pesados opera em um ciclo composto por quatro etapas: (i) levantar; (ii) empurrar; (iii) abaixar; e (iv) recolher. Após a conclusão desse ciclo, o processo é repetido sucessivamente até que o tabuleiro atinja sua posição final (Martins, 2009):

- i. **Levantar:** O macaco hidráulico eleva o tabuleiro alguns milímetros, de modo que, na próxima fase, seja possível o macaco hidráulico empurrar o tabuleiro sem que o atrito entre o tabuleiro e os apoios gere forças resistentes significativas.

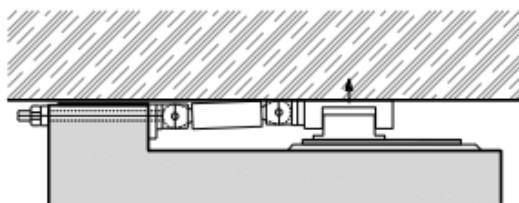


Figura 26 - Esquema do macaco hidráulico levantando o tabuleiro.
Fonte: Adaptado de Martins (2009).

- ii. **Empurrar:** Nesta etapa, o macaco hidráulico aplica uma força horizontal no tabuleiro, promovendo o seu deslocamento longitudinal sobre os apoios temporários, que possuem superfícies projetadas para reduzir o atrito.

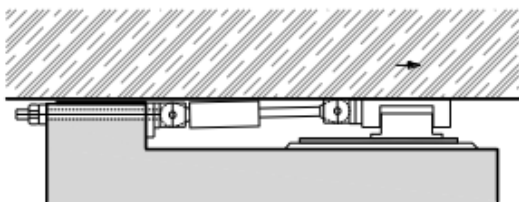


Figura 27 - Esquema do macaco hidráulico empurrando o tabuleiro.
Fonte: Adaptado de Martins (2009).

- iii. **Abaixar:** Após o macaco hidráulico atingir o seu limite máximo de expansão horizontal, o sistema hidráulico vertical retrai, permitindo que o tabuleiro seja novamente apoiado nos apoios temporários.

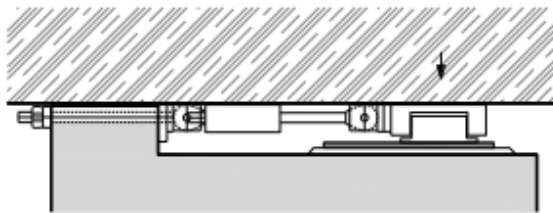


Figura 28 - Esquema do macaco hidráulico descendo o tabuleiro.
Fonte: Adaptado de Martins (2009).

- iv. **Recolhe:** Depois de retraído e assentar o tabuleiro sobre os apoios, o macaco hidráulico retorna a sua posição inicial, preparando para reiniciar o ciclo de lançamento.

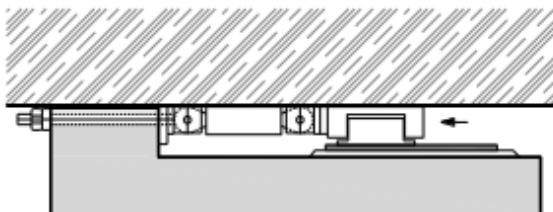


Figura 29 - Esquema do macaco hidráulico voltando a origem.
Fonte: Adaptado de Martins (2009).

Todos os movimentos do equipamento e do tabuleiro são monitorados a partir de uma central de controlo localizada no estaleiro. Nessa central são registrados os valores operacionais necessários ao acompanhamento do processo, especialmente as reações verticais nos macacos hidráulicos. A partir desses dados, é possível analisar se há necessidade de aumentar o atrito entre os elementos do sistema de deslocamento, de modo a garantir o controlo adequado do deslocamento durante o lançamento (Marinho, 2012; Martins, 2009). Martins (2009) acrescenta que, esse registro serve apenas como verificação, pois os procedimentos já devem estar previamente programados.

2.4.5.3 APARELHO DE APOIO E GUIAS LATERAIS

Os aparelhos de apoios provisórios, assim como os guias laterais, são equipamentos fundamentais no MLI. Os apoios provisórios têm a função de sustentar o tabuleiro durante o seu deslocamento longitudinal, enquanto os guias laterais mantêm o alinhamento da estrutura no eixo da ponte, além de resistirem às forças transversais geradas pelo vento ou eventuais ações sísmicas durante o lançamento.

Como visto anteriormente, os apoios por onde o tabuleiro são deslocados são revestidos com chapas de aço inoxidável, recobertas por uma camada de Teflon®, que auxilia a reduzir o atrito de arrasto entre o tabuleiro e os pilares, além de outras camadas constituintes, como ilustrado na figura a seguir.

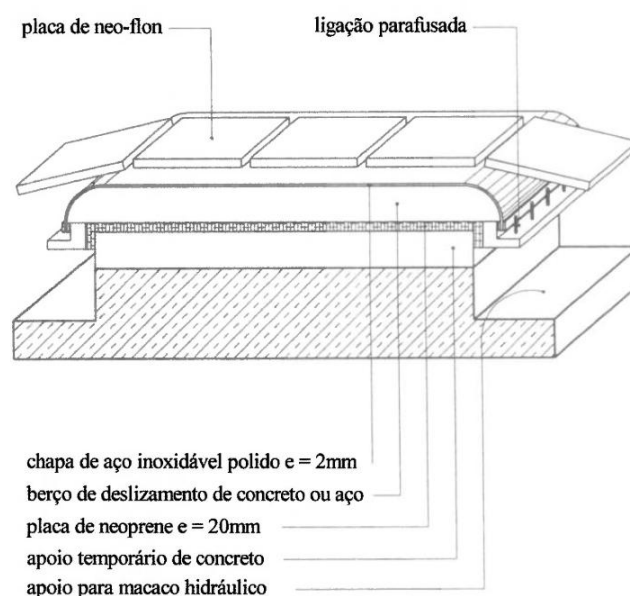


Figura 30 - Aparelho de apoio provisório de deslizamento.
Fonte: Waimberg (2002).

Os guias laterais seguem princípio semelhante ao dos apoios provisórios, sendo responsáveis por manter o tabuleiro alinhado ao eixo da ponte durante o processo de lançamento. Esses dispositivos são geralmente instalados à frente da área de pré-fabricação e, em alguns casos, também em determinados pilares, quando a extensão da ponte justificar (Duarte, 2011; Martins, 2009; Waimberg, 2002). Em pontes com curvatura em planta, a utilização dos guias laterais torna-se particularmente importante para garantir o correto direcionamento do tabuleiro ao longo do traçado.

A parte superior do guia lateral possui a mesma inclinação das almas do tabuleiro e pode ser ajustada por meio de um sistema hidráulico (Martins, 2009).

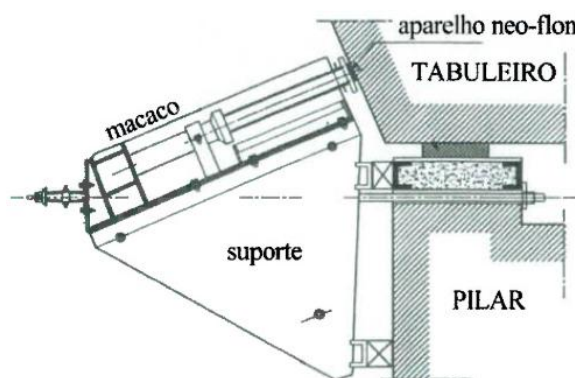


Figura 31 - Guia lateral com macaco hidráulico.
Fonte: Waimberg (2002).

Martins (2009) acrescenta que as operações de lançamento nesse processo construtivo são bastante delicadas, devendo ser projetadas com o rigor necessário, e que a sequência de execução deve ser rigorosamente cumprida. O autor destaca ainda a necessidade de utilização de várias estações de trabalho distribuídas ao longo da estrutura, comunicadas entre si por meio

de rádio ou linhas telefônicas. Em caso de emergência ou intervenção no sistema, todas as equipas são avisadas por circuitos elétricos de alarme que travam automaticamente os equipamentos de lançamento.

2.4.6 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO MÉTODO DE LANÇAMENTO INCREMENTAL

Como todo método construtivo, o MLI apresenta vantagens e desvantagens que devem ser analisadas para avaliar a viabilidade de sua aplicação e permitir a comparação com outros métodos construtivos. A seguir são apresentadas as principais vantagens e desvantagens associadas a esse processo.

2.4.6.1 VANTAGENS

Com base na literatura sobre o MLI, é possível identificar as principais vantagens associadas ao método (Duarte, 2011; Martins, 2009; VSL International Ltd., 1977):

- A execução da superestrutura dispensa a necessidade da utilização de escoramento inferior, permitindo a transposição de obstáculos como rios, rodovias, ferrovias e vales sem interferências significativas no terreno, como ilustrado na Figura 32;
- O estaleiro é fixo localizado atrás do encontro com características compactas e distâncias de transporte curtas. Neste contexto, permite um processo produtivo que se assemelha ao de uma indústria favorecendo a alta qualidade na produção. Além de manter os investimentos e custos indiretos no local relativamente baixo concentrando a planta em uma única área;
- Ciclos de produção rápidos e repetitivos, de modo que, mesmo uma equipa sem experiência, consegue executar o serviço de forma eficiente, sendo possível a construção do tabuleiro e dos pilares simultaneamente;
- O estaleiro pode ser coberto, protegendo as operações contra intempéries e garantindo maior segurança e qualidade na construção;
- Alta mecanização do processo construtivo contribuindo para a eficiência do método e reduzindo a quantidade de mão-de-obra necessária no local;
- Os equipamentos auxiliares de construção são relativamente leves, de fácil manuseio e transporte, podendo alguns ser reutilizados em outras obras;
- Segurança elevada dos trabalhadores, uma vez que grande parte das atividades é realizada em uma área fixa e de grande controlo.

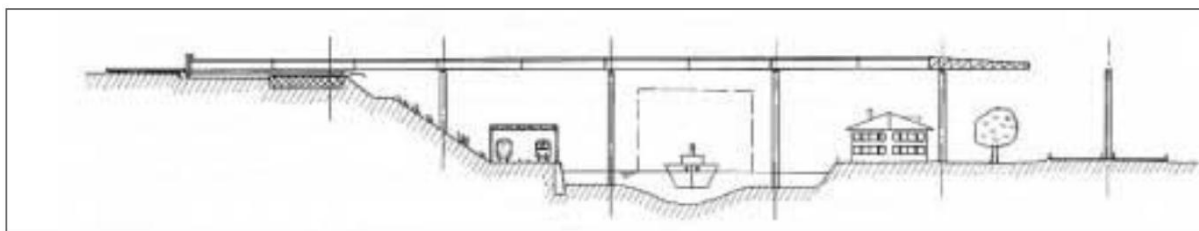


Figura 32 - Transposição de obstáculos sem interferência.
Fonte: VSL International Ltd. (1977).

2.4.6.2 DESVANTAGENS

A seguir são apresentadas algumas das desvantagens associadas ao método (Duarte, 2011; Ferraz, 2001; Martins, 2009):

- O método é mais adequado para pontes retas ou com raio de curvatura constante, condicionados pelo próprio processo construtivo, podendo, em alguns casos, limitar a liberdade de concepção arquitetônica e comprometer os aspectos estéticos da estrutura;
- Devido à necessidade de a seção transversal da superestrutura permanecer constante ao longo do tabuleiro, a viabilidade do método fica comprometida para vãos superiores a 60 m;
- Exige tratamento e preparação adequada do terreno para que não haja imperfeições geométricas no local onde serão instaladas as cofragens fixa;
- Exige uma elevada utilização de pré-esforço durante a fase de lançamento, o que pode influenciar negativamente na viabilidade econômica;
- O deslocamento exige nível técnico especializado por parte do empreiteiro.
- Requer uma área considerável atrás de um dos encontros para implementação do estaleiro de pré-fabricação. Em determinados casos, a aplicação do método pode se tornar inviável quando não há esta disponibilidade de espaço para a implantação da área.

2.4.7 CICLO CONSTRUTIVO

O MLI se caracteriza por um processo construtivo de natureza cíclica e repetitiva, que se mantém desde a execução do primeiro até o último segmento do tabuleiro. A duração média para a construção de cada segmento gira em torno de uma semana, sendo que para otimizar esse processo, o fim da betonagem deve ser realizado na sexta-feira, de modo que, durante o sábado e domingo ocorra a cura do betão e o ganho de resistência suficiente para que, na segunda-feira, possa ser feito a pré-tensão do segmento e, posteriormente, o seu lançamento (Ferraz, 2001; Schmid, 2005).

Segundo Schmid (2005), a equipa de trabalho é formada por 40 a 50 operários especializados nesse processo. Contudo, devido a elevada repetitividade das etapas construtivas, o autor destaca que mesmo equipas inexperientes conseguiriam desempenhar o serviço com eficiência.

Ferraz (2001) acrescenta que o lançamento dos segmentos representa uma pequena parcela do tempo total de construção. Segundo o autor, a velocidade de avanço do tabuleiro durante o lançamento é da ordem de 5 m/h, de modo que o deslocamento correspondente a um segmento pode ser realizado em aproximadamente meio-dia de trabalho.

A seguir é apresentado um cronograma semanal das etapas de execução para uma estrutura com seção transversal em caixão construída pelo MLI, conforme descrito por Schmid (2005).

Tabela 1 - Sequência de trabalhos para a construção do tabuleiro.

ETAPAS	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	SAB	DOM
Liberação das formas inferiores e lateral	II						
Protensão do segmento anterior	II						
Deslocamento	II						
Instalação da forma da laje inferior		III					
Instalação da forma externa		III					
Armadura da laje de fundo			III				
Instalação da forma interna			III				
Betonagem da laje inferior				III			
Armadura das almas e da laje superior				IIII			
Betonagem das almas e laje superior					IIII		
Cura do betão				III	IIII	IIII	IIII

Fonte: Adaptado de Schmid (2005).

2.4.8 EXEMPLOS DE PONTES CONSTRUÍDAS POR LANÇAMENTO INCREMENTAL

– **Ponte sobre o Rio Caroni, Venezuela, 1964:**

A Ponte sobre o Rio Caroni, na Venezuela, é reconhecida como a primeira ponte a ser executada pelo MLI.



Figura 33 - Ponte sobre o Rio Caroni, Venezuela.
Fonte: Piqueras (2015).

- Projetista: Fritz Leonhardt.
- Vão principal: 96 m.
- Extensão: 500 m.
- Vãos: 48 m – 4x 96 m – 48 m.
- Material do tabuleiro: Betão pré-esforçado.

– **Ponte Wildbichler sobre o Rio Inn, Áustria:**

A Ponte Wildbichler sobre o Rio Inn, na Áustria, é considerada a obra responsável pela consolidação do MLI.



Figura 34 - Ponte Wildbichler sobre o rio Inn, Áustria.
Fonte: RUFUS46 (2025).

- Projetista: Leonhardt e Andrä.
- Vão principal: 103,40 m.
- Extensão: 451 m.
- Vãos: 84 m – 3x 103,40 m – 59 m.
- Material do tabuleiro: Betão pré-esforçado.

– **Viaduto Millau, França:**

O Viaduto Millau trata-se de um dos viadutos mais altos do mundo, destacando-se também por possuir o pilar mais alto já construído em uma ponte, com 245 m de altura.



Figura 35 - Viaduto Millau, França.
Fonte: TEKHTON ENGENHARIA.

- Projetista: Michel Virlogeux (Engenheiro Estrutural) e Norman Foster (Arquiteto).
- Vão principal: 342 m.
- Extensão: 2.460 m.
- Vãos: 204 m – 6x 342 m – 204 m.
- Material tabuleiro: Aço.

2.5 LEAN CONSTRUCTION

Nesta seção serão apresentados os principais conceitos da LC, abordando a sua origem, evolução, fundamentação e ferramentas.

2.5.1 LEAN

A década de 1950 foi marcada pela consolidação do Fordismo, um modelo de produção desenvolvido por Henry Ford, baseado na produção em massa, caracterizada pela produção em larga escala de produtos padronizados e na divisão intensiva do trabalho. Esse sistema procurava atender a um amplo mercado de consumidores, sendo amplamente aplicado,

sobretudo, na indústria automobilística. Esta forma de produção mostrou-se altamente eficaz enquanto o mercado absorvia a totalidade da produção, permitindo que as empresas produzissem de forma antecipada à demanda, gerando estoque de produtos que, em momento posterior, seriam vendidos (Arantes, 2008).

Após a Segunda Guerra Mundial, a partir de 1945, no Japão, os engenheiros da *Toyota Motor Company*, Taiichi Ohno e Shigeo Shingo, juntamente com suas equipas, desenvolveram a filosofia *Lean Production*.

Após visitar a empresa *Ford Motor Company* nos Estados Unidos, que utilizava o sistema de produção em massa, Ohno constatou que a simples aplicação desse modelo que era caracterizado pela produção de larga escala, nas empresas japonesas seria inviável, devido ao Japão ainda estar em processo de se recuperar da Segunda Guerra Mundial, enfrentando severa escassez de recursos humanos, financeiros e materiais.

Contudo, tornou-se necessário que Taiichi Ohno e suas equipas adaptassem o modelo de produção em larga escala à realidade japonesa, uma vez que não seria possível obter as mesmas vantagens alcançadas pelas empresas dos Estados Unidos que adotavam esse sistema.

Baseando-se na realidade do período pós-guerra japonês, caracterizado por uma economia fragilizada, limitações de recursos e diante as novas leis trabalhistas, o TPS, desenvolvido por Taiichi Ohno, surgia como uma resposta às necessidades específicas do mercado japonês, tendo que se adaptar as novas restrições do mercado, sendo necessário a produção de pequenas quantidades de uma ampla variedade de produtos e a escassez de recursos.

Esse novo sistema procurou unificar as vantagens da produção artesanal aos benefícios da produção em massa, juntando a ideia de trabalhadores com qualidades superiores e uso de ferramentas flexíveis com a eficiência de elevados níveis de produtividade e baixos custos de produção. Com a ideia de produzir uma variedade de modelos em pequenas quantidades, sem aumentar os custos produtivos.

De acordo com a leitura apresentada por Arantes (2008), para Ohno, o principal objetivo do TPS, consistia em aumentar a eficiência da produção pela eliminação consistente e completa dos desperdícios. E foi com esse pensamento, na eliminação completa dos desperdícios, que está atrelada toda a filosofia *Lean Production*, que por sua vez foram definidos sete tipos de desperdícios associados aos processos produtivos, que serão explicados posteriormente nesta dissertação:

- Superprodução;
- Tempo de espera;
- Transporte desnecessário;
- Processamento desnecessário;
- Estoques;
- Movimento desnecessário;
- Defeitos.

Estes desperdícios correspondem a atividades que utilizam recursos adicionais ao longo do processo produtivo, mas que não acrescentam valor ao produto final, não sendo percebidas como valor pelo cliente.

2.5.1.1 JUST IN TIME E JIDOKA

O TPS, visando atingir a máxima qualidade do produto com o menor custo e tempo possível, resultou no desenvolvimento de dois conceitos fundamentais, sendo esses, o *Just-in-Time* (JIT) e o *Jidoka*. Este último é outra base do TPS, que é denominado por Ohno como Autonomia, que não pode ser confundido com a simples automação.

De acordo com Tavares (2020), ambos os conceitos compõem a formação clássica da chamada Casa do TPS, representando pilares essenciais para o desenvolvimento da melhoria contínua. A filosofia do TPS pode ser compreendida de forma sintética por meio desse esquema em forma de casa, como visto na Figura 36, amplamente utilizado por facilitar a compreensão visual e conceitual dos seus princípios fundamentais (Genestretti, 2018).

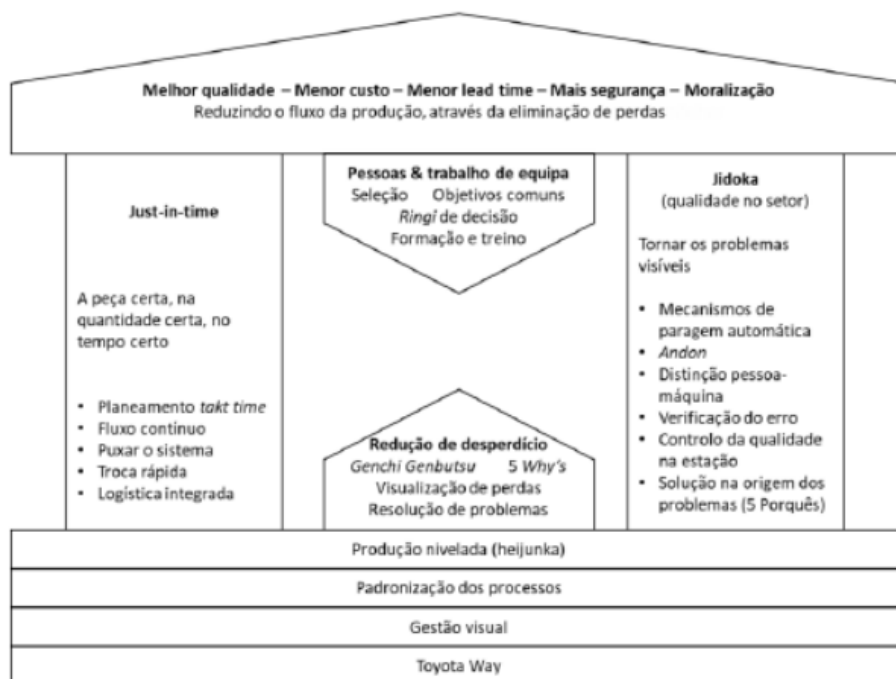


Figura 36 - Casa do TPS.
Fonte: Tavares (2020).

De acordo com Ohno (1997), JIT consiste na produção em fluxo contínuo, em que cada processo produz apenas o que é solicitado pelo processo subsequente, evitando interrupções e excedentes. Trata-se de assegurar que cada etapa receba o item necessário, no momento certo e na quantidade exata.

Partindo dessa perspectiva, o sistema produtivo passa a ser analisado de trás para a frente, em que apenas o material estritamente necessário deve ser introduzido no início da linha de produção para satisfazer a procura do processo final, Taiichi Ohno desenvolveu um sistema de sinalização destinado a indicar as necessidades entre os diferentes processos. Esse

mecanismo permitia o controlo da quantidade produzida e ficou conhecido como *Kanban*, sendo o método ao qual o TPS flui suavemente.

Paralelamente, a Autonomia, conhecida como automação com toque humano, é o segundo pilar fundamental do TPS (*Jidoka* – Qualidade incorporada no processo).

Ciente que uma máquina sem sistema de conferência automática funcionando sozinha, pode produzir uma quantia significativa de itens defeituosos perante qualquer anomalia, gerando desperdícios acumulativos, o TPS, visou unificar os serviços das máquinas acoplando-as a dispositivos de parada automática com o toque humano, para que o processo seja imediatamente interrompido sempre que ocorre uma irregularidade, impedindo a propagação de defeitos ao longo da cadeia produtiva e garantindo a qualidade na origem.

Além disso, o *Jidoka* alterou o próprio conceito de gestão da produção, permitindo que um único operador supervisione várias máquinas simultaneamente, deslocando-se apenas quando surge uma situação anormal. Dessa forma, reduz a necessidade de mão de obra direta contínua, aumenta a eficiência operacional e promove uma utilização mais racional dos recursos humanos.

2.5.2 LEAN THINKING

Segundo Arantes (2008), John Krafcik do IMVP (*International Motor Vehicle Program* – Programa Internacional de Veículos Automotores) designou a expressão *Lean Production*. “*Lean*” sendo entendido como enxuto, consiste em uma filosofia de gestão orientada para a maximização do valor ao cliente por meio da eliminação sistemática de desperdícios e da melhoria contínua dos processos. Mais do que um conjunto de ferramentas, trata-se de uma abordagem integrada que busca identificar e otimizar as atividades que efetivamente agregam valor, promovendo maior eficiência e desempenho (Campos, 2017).

O conceito de *Lean Thinking* surge como uma sistematização dos princípios do TPS, expandindo a sua aplicação para além da indústria automobilística. Desenvolvida por Womack & Jones (1997), o *Lean Thinking* estrutura-se como uma filosofia de gestão orientada para a criação de valor com a eliminação sistemática de desperdícios ao longo do fluxo produtivo.

Estes autores estabelecem um conjunto de cinco princípios orientadores da *Lean Thinking*:

1. Valor

Segundo Womack & Jones (1997), valor é o ponto de partida essencial para o pensamento enxuto, sendo definido exclusivamente pelo cliente final. Ele só é significativo quando expresso em termos de um produto específico, seja um bem, um serviço ou ambos, capaz de satisfazer as necessidades do cliente a um preço determinado e no momento exato em que é requerido.

2. Cadeia de Valor

Corresponde à sequência completa de atividades pelas quais um produto ou serviço deve passar, desde a extração da matéria-prima até à entrega ao cliente final. O seu mapeamento permite identificar e analisar cada etapa do processo produtivo, com o

objetivo de eliminar desperdícios e otimizar o fluxo de valor. Pode ser resumido na soma de todas as etapas da cadeia de produção que levam um produto ao cliente. Estas atividades podem ser classificadas em três categorias, sendo, atividades ou processos que agregam valor, atividades que não agregam valor, mas são necessárias e atividades que não agregam valor e que devem ser eliminadas da cadeia (Campos, 2017; Genestretti, 2018; Tavares, 2020).

3. Fluxo de Valor

Para a filosofia *Lean*, após a especificação do valor e a identificação da cadeia de valor, com vista à redução ou eliminação das atividades que não acrescentam valor ao produto final, torna-se necessário promover o fluxo do produto. Assim, para que a produção ocorra sem interrupções, o ideal é manter um fluxo contínuo, peça a peça, evitando a formação de estoques desnecessário e paragens ao longo do processo. O fluxo contínuo assenta na eliminação dos tempos de espera entre as etapas e no aumento da transparência do processo, o que facilita a deteção de erros e contribui para a melhoria da qualidade do produto final (Arantes, 2008; Campos, 2017; Tavares, 2020).

4. Cliente Puxa

Um dos pontos mais relevantes da *Lean Production*, que difere o *Lean* da produção em massa, associada ao Fordismo, é a adopção do Sistema *Pull*, no qual a produção é desencadeada pela procura do cliente. Nesse modelo, produz-se apenas o que é necessário, quando necessário e na quantidade necessária, contribuindo para a redução de estoques e para um processo mais eficiente e alinhado com a procura real (Arantes, 2008; Tavares, 2020).

5. Perfeição

A perfeição, atrelada à busca da melhoria contínua, *Kaizen*, constitui um dos princípios da *Lean Production*, estabelecendo como meta o aperfeiçoamento constante dos processos em direção à excelência. Essa abordagem agrega maior valor ao produto final e ao cliente. É algo que as empresas que pretendem manter-se competitivas ao longo do tempo devem adotar, sobretudo face às contínuas mudanças do mercado (Arantes, 2008; Tavares, 2020).

2.5.3 DESPERDÍCIOS

Na produção, o desperdício refere-se a qualquer elemento ou atividade que não agrega valor ao produto final, mas que, ainda assim, contribui para o aumento dos custos (Ohno, 1997).

Como já visto antes, Ohno identificou sete tipos de desperdícios que um processo de produção possa apresentar:

- **Desperdício de superprodução:** A superprodução está relacionada à produção de maiores quantidades à demanda exigida, sendo uma das formas mais significativa de desperdício. A superprodução utiliza as matérias-primas de forma antecipada à sua

necessidade, implicando na necessidade de maior espaço de armazenamento e a geração de custos adicionais, além de gerar transportes adicionais.

- **Desperdício de tempo de espera:** Consiste no tempo em que operários, materiais ou equipamentos permanecem parados, aguardando a finalização de outras etapas, a chegada de informações ou a disponibilidade de recursos, prejudicando o fluxo contínuo.
- **Desperdício em transporte desnecessário:** É a movimentação de elementos da produção como materiais ou produtos entre locais distantes sem acrescentar valor.
- **Desperdício do processamento desnecessário:** Ocorre quando são utilizados processos, tecnologias ou especificações de forma incorreta ou de forma desnecessária.
- **Desperdício de estoque disponível:** Relacionada a superprodução, resultando no aumento da quantidade no estoque, implicando a necessidade de maior espaço, equipamentos adicionais, tempo e mão-de-obra para realização do transporte, gerando custos.
- **Desperdício de movimento:** Pode ser considerado como qualquer movimento desnecessário que não acrescenta valor ao produto, desde procurar ferramentas e/ou contar peças, podendo ser causado também pela má organização do local de trabalho.
- **Desperdício de produzir produtos defeituosos:** São produtos ou elementos que apresentam falhas durante a produção ou no produto final. Esses defeitos exigem retrabalho, reparação ou substituição, consumindo tempo, materiais e mão-de-obra adicionais. Além disso, caso este produto defeituoso chegue ao cliente, poderá haver reclamações por parte dele.

2.5.4 INTRODUÇÃO A LEAN CONSTRUCTION

Segundo Leite (2015), a LC corresponde à adaptação da *Lean Production* e seus conceitos à indústria da construção civil.

Em Tavares (2020), esta filosofia adaptada para a indústria da construção foi fortemente impulsionada pelo pesquisador finlandês Lauri Koskela. Durante o seu estágio na Universidade de Stanford, Koskela publicou, em 1992, a obra *Application of the New Production Philosophy to Construction*, se tornou uma referência clássica para a construção civil (Mourão, 2023). Posteriormente, criou o IGLC – *International Group for Lean Construction*, composto por profissionais e acadêmicos do setor da construção, com o propósito de discutir e disseminar os conceitos da LC em diversos países, bem como desenvolver um novo paradigma para a gestão desse setor (Arantes, 2008; Mourão, 2023; Tavares, 2020).

Koskela (1992), diferencia a indústria da construção civil em três características às restantes indústrias, sendo elas:

- Natureza específica de cada projeto: Produto singular;
- Produção em locais distintos, em função do produto;
- Multi organização de diversas especialidades, de caráter temporário.

Estas circunstâncias fazem com que a indústria da construção apresente elevada variabilidade, pois cada empreendimento possui características únicas e recorre a subprodutos de diferentes origens. Essa diversidade desafia as empresas construtoras, que podem enfrentar processos, materiais e tarefas fora do seu domínio (Mourão, 2023; Tavares, 2020).

Koskela (1992), atribui onze princípios a LC, estruturando-os a partir de uma visão sistêmica da produção. Esses princípios partem da premissa de que a redução das atividades que não agregam valor, aliada à melhoria contínua, é condição essencial para a aplicação eficaz da filosofia enxuta na construção (Morais, 2024). Sendo estes princípios detalhados e discutidos a seguir:

1. Reduzir a parcela de atividades que não acrescentam valor

Nem todas as atividades executadas em um processo produtivo geram valor ao produto final na perspectiva do cliente. Muitas dessas atividades consomem tempo, recursos materiais, mão de obra, equipamentos e espaços, sem, contudo, contribuírem diretamente para agregar valor ao produto final. Essas atividades devem ser analisadas, de modo que, possa ocorrer a redução ou eliminação sempre que possível, bem como a identificação daquelas que demandam maior controle e monitorização (Genestretti, 2018; Moraes, 2024).

De acordo com Arantes (2008), Moraes e Rodrigues (2024), embora a Construção Enxuta tenha como princípio a eliminação de desperdícios e a redução de custos, é fundamental assegurar que a qualidade e eficiência do processo sejam mantidas. Além de que, nem todas as atividades que não acrescentam valor ao produto final podem ser eliminadas, uma vez que algumas são necessárias para o processo global dos processos e realização do trabalho.

2. Aumentar o valor do produto através da consideração das necessidades dos clientes

Para Koskela (1992), em cada etapa do processo produtivo podem ser identificados dois tipos de clientes, o cliente final ou externo, que utilizará o produto final, e o cliente interno, representado pelas atividades subsequente do processo. O valor é gerado como consequência da satisfação dos requisitos desses clientes. Assim, para mensurá-lo, é necessário compreender e mapear o processo produtivo, analisando suas etapas e identificando as necessidades específicas de cada uma delas (Arantes, 2008; Moraes, 2024; Mourão, 2023).

3. Reduzir a variabilidade

Quanto maior for a padronização do produto, menor tende a ser a variabilidade do processo e consequentemente, menor a probabilidade de insatisfação do cliente. A padronização constitui um dos principais mecanismos para reduzir variações tanto na conversão quanto no fluxo produtivo. Adquirir métodos de padronização e uniformização nos processos construtivos e implementar equipamentos que minimizem a possibilidade de erro humano, são meios estratégicos eficazes para o aumento da qualidade e da produtividade (Genestretti, 2018; Tavares, 2020).

Segundo Isatto (2000 apud Arantes, 2008, p. 41), destaca-se que existem diversos tipos de variabilidade associados aos processos de produção, tais como variações dimensionais de materiais; diversidade na execução de tarefas e variabilidade dos requisitos dos clientes. Além

disso, Arantes (2008) ressalta que a natureza da variabilidade pode estar relacionada a qualidade do produto, à duração das atividades ou aos recursos consumidos.

4. Reduzir o tempo de ciclo

Sendo a soma de todos os tempos necessários para a produção de um produto, incluindo transporte, espera, processamento e inspeção. A redução do tempo de ciclo é reduzir os desperdícios tanto no meio de produção quanto nas esperas dos clientes externos e internos. Esse princípio está diretamente relacionado a filosofia JIT, que preconiza a produção no momento certo e na quantidade necessária.

De acordo com Morais e Rodrigues (2024), a LC defende que os ciclos produtivos devem ser otimizados e encurtados para que permita entregas mais rápida e previsíveis aos clientes, sem comprometer a qualidade. Para garantir maior fluidez aos ciclos, torna-se essencial investir em planejamento adequado, alocação estratégica de tarefas e seleção melhor dos fornecedores, reduzindo gastos desnecessários e retrabalhos.

5. Simplificar através da redução do número de passos ou partes

Relacionado a exclusão de tarefas ou número de componentes que não adquire valor ao produto, pois quanto maior o número de componentes ou etapas em um processo produtivo maior a sua complexidade e atividades que não agregam valor.

6. Aumentar a flexibilidade de saída

O aumento da flexibilidade de saída está relacionado à capacidade de adaptar o produto final, de acordo com o gosto do cliente, elevando sua percepção de valor (Arantes, 2008; Genestretti, 2018). No contexto LC, essa flexibilidade, não está atrelada a um aumento significativo aos custos dos mesmos. Assim, busca-se conciliar personalização e controle da variabilidade, garantindo satisfação do cliente com estabilidade operacional.

7. Aumentar a transparência do processo

Aumentar a transparência do processo possibilita uma melhor percepção dos colaboradores, das atividades a eles destinadas. Além disso, aumenta a disponibilidade de informações relevantes, tantas informações técnicas, relacionadas ao projeto, quanto informações de produtividade, necessárias para a execução das tarefas. Essa maior visibilidade facilita a identificação de falhas no sistema, contribui para a redução de erros e estimula o engajamento na melhoria contínua do processo produtivo (Arantes, 2008; Genestretti, 2018; Tavares, 2020).

8. Focar o controle no processo global

Este conceito está relacionado ao enxergar um processo como um todo e não apenas a soma das atividades individuais. De acordo com Koskela (1992), com a otimização do fluxo total é possível gerar benefícios mútuos para os fluxos interorganizacionais, cooperação de longo prazo com fornecedores e formação de equipes. Uma das formas de otimizar o fluxo global do processo, segundo Tavares (2020), consiste na definição de estágios de aprovação apoiados por listas de verificação e indicadores de desempenho.

9. Introduzir melhoria contínua no processo

Para Koskela (1992), o esforço para reduzir desperdícios e aumentar o valor constitui uma atividade interna, incremental e iterativa, que deve ser realizada de forma contínua. O autor acrescenta que existem diferentes métodos necessários para institucionalizar a melhoria contínua.

10. Manter um equilíbrio entre melhorias nos fluxos e nas conversões

Para Koskela (1992), ao se pensar na melhoria das atividades produtivas, devem ser consideradas tanto as atividades relacionadas às conversões quanto aquelas associadas aos fluxos. O autor questiona como essas duas dimensões devem ser equilibradas em cada processo construtivo, uma vez que ambas apresentam diferentes potenciais de melhoria. Como regra geral, quanto maior a complexidade do processo produtivo, maior tende a ser o impacto das melhorias no fluxo e quanto maiores os desperdícios inerentes ao processo, mais vantajosa se torna a melhoria do fluxo em comparação com a melhoria das conversões.

Considerando que ambas as atividades estão intimamente interligadas, Koskela (1992) argumenta que melhores fluxos requerem menor capacidade de conversão e, consequentemente, menor investimento em equipamentos; fluxos mais controlados facilitam a implementação de novas tecnologias de conversão; e novas tecnologias de conversão podem proporcionar menor variabilidade e, assim, gerar benefícios ao fluxo.

11. Fazer benchmarking

Benchmarking consiste na adoção de experiências e boas práticas de instituições ou empresas que se destacam como referência em determinado setor (Genestretti, 2018), buscando incorporar o que há de melhor por meio da adaptação, modificação ou integração dessas práticas na própria empresa, alcançando a superioridade ao combinar as práticas internas existentes com as adquiridas externamente (Koskela, 1992).

2.5.5 FERRAMENTAS E PRÁTICAS DA FILOSOFIA PRODUÇÃO LEAN

Na sequência, serão apresentadas algumas ferramentas utilizadas na filosofia LC, as quais têm origem nos princípios do *Lean Thinking*. A filosofia *Lean* contempla diversas ferramentas voltadas à melhoria do fluxo produtivo, à redução de desperdícios e ao aumento da eficiência. Entretanto, considerando os objetivos desta pesquisa, optou-se por aprofundar apenas aquelas diretamente relacionadas à otimização do MLI, cuja seleção dessas ferramentas fundamenta-se por meio de estudos bibliográficos e na análise de sua aplicabilidade ao objeto deste trabalho.

2.5.5.1 VALUE STREAM MAPPING

Segundo (Shook; Rother, 1998 apud Settyvari, [S.d.], p. 21), fluxo de valor corresponde ao conjunto de todas as ações, tanto as que agregam valor quanto as que não agregam, necessárias para levar um produto desde a matéria-prima até o cliente subsequente. Nesse contexto, o *Value Stream Mapping* (VSM) constitui a ferramenta utilizada para mapear e

analisar esse fluxo, apresentando fornecedores, clientes, estoque, fluxo de informações, movimentações de materiais e todas as etapas do processamento produtivo (Morais, 2024).

Conforme apresentado por Settyvari ([S.d.]), o livro “*Learning to See*” de Shook e Rother (1998), foi a primeira publicação dedicada especificamente ao VSM. Nessa obra, os autores apresentam um guia prático e estruturado para a aplicação da ferramenta, organizado em quatro etapas:

1. Escolher uma família de produtos
2. Desenhar o estado atual
3. Desenhar o estado futuro
4. Escrever o plano de trabalho

Os autores também destacam que o VSM é uma ferramenta poderosa porque (Shook; Rother, 1998 apud Settyvari, [S.d.], p.23):

- Ajuda a visualizar mais de um processo;
- Permite identificar desperdícios e suas fontes;
- Funciona como uma linguagem comum para todos os participantes;
- Constitui a base para a elaboração de um plano de implementação;
- Torna evidentes as decisões relacionadas ao fluxo;
- Integra conceitos e técnicas da produção enxuta;
- Evidencia a ligação entre o fluxo de informações e o fluxo de materiais.

O VSM é uma ferramenta de aplicação relativamente fácil, que possibilita a melhoria do processo produtivo por meio da identificação de etapas geradoras de desperdícios.

2.5.5.2 VISUAL MANAGEMENT

O *Visual Management* (VM), em português denominado como Gestão Visual, é definido por Esteves et al. (2015), como a exposição visível de ferramentas, processos, atividades e indicadores de desempenho do sistema de produção, de modo que todos os colaboradores possam compreender o funcionamento global do processo a partir dessa visualização.

Calvão (2019) acrescenta que essa fácil compreensão por parte dos colaboradores, permite um ganho de eficiência geral das equipas, bem como para a maior integração e motivação entre os membros, a partir de uma participação ativa na identificação e discussão de problemas.

2.5.5.3 TOTAL PRODUCTIVITY MAINTENANCE

A *Total Productivity Maintenance* (TPM), em português Manutenção Produtiva Total, é uma ferramenta da filosofia *Lean* de origem japonesa, voltada a eficiência máxima dos equipamentos por meio do envolvimento de todos os colaboradores, desde os operadores até a alta gestão. O TPM tem como objetivo capacitar os próprios operadores dos equipamentos para

realizarem as atividades de manutenção e monitorização, sendo capaz de identificar os possíveis problemas nas máquinas, através de procedimentos de manutenção regulares (Barros, 2010 apud Araújo, 2015, p. 14).

Complementarmente, Lean Production ([s.d.]) define a TPM sendo uma abordagem holística para a manutenção de equipamentos que busca alcançar a produção perfeita sem avarias, sem paradas curtas ou corridas lentas e sem defeitos. O mesmo autor atribui 8 pilares ao TPM concentrados principalmente em técnicas proativas e preventivas para melhorar a confiabilidade do equipamento:

1. Manutenção autônoma;
2. Manutenção programada;
3. Manutenção de qualidade;
4. Melhoria focada;
5. Gestão inicial de equipamentos;
6. Formação e educação;
7. Segurança, saúde, Meio ambiente;
8. TPM na administração.

2.5.5.4 KAIZEN

O termo *Kaizen* tem origem japonesa e sua tradução literal significa “Melhoria Contínua”, sendo formado pela junção das palavras *kai*, que significa “mudança”, e *zen* que significa “melhor”.

Mais do que uma simples ferramenta de gestão, o *Kaizen* é uma filosofia que defende que o nosso modo de vida, seja no ambiente de trabalho, na sociedade ou em casa, merece ser constantemente aprimorado. A essência desta metodologia reside no melhoramento contínuo envolvendo todos os membros da organização, desde a alta gerência até os operários do chão de fábrica.

É um conceito transversal a todas as outras ferramentas, orientado ao aperfeiçoamento contínuo dos métodos e processos nos quais é aplicado (Pinto, 2012; Tavares, 2020)

Segundo Briaes & Ferraz ([s.d.]), esta filosofia baseia-se na eliminação de desperdícios por meio do uso do bom senso e da adoção de soluções baratas, sustentadas na motivação e criatividade dos colaboradores, com objetivo para uma melhor eficiência do processo de trabalho e manter o foco na melhoria contínua.

O Instituto Kaizen, fundado por Masaaki Imai (1930-2023), reconhecido pela própria instituição como o “pai do KaizenTM”, estrutura essa filosofia em algumas fundamentações (Kaizen Institute, [s.d.]):

- Conhecer o cliente, com foco na geração de valor;
- Criar fluxo, visando a eliminação total de desperdícios;
- Ir ao Gemba, observar e compreender os problemas desde a raiz;
- Capacitar as pessoas, promovendo o desenvolvimento e organização das equipas;
- Ser transparente, fundamentando decisões em dados reais e mensuráveis.

“A metodologia *Kaizen* pode ser aplicada em qualquer processo produtivo em que exista um padrão nas tarefas ou atividades” (TBM Consulting 2000, p. 08 apud Briaes & Ferraz, [s.d.], p. 3).

2.5.5.5 TAKT-TIME

“*Takt*” é um termo de origem alemã que serve para designar o compasso de uma composição musical, ritmo, posteriormente incorporado à indústria japonesa como ritmo de produção. *Takt-Time* pode ser compreendido como o tempo disponível para a produção atender a demanda do Mercado. Matematicamente, é definido pela razão entre o tempo disponível para a produção e o número de unidades a serem produzidas (Alvarez & Antunes Jr., 2001).

Para Grenho (2009), esta ferramenta organiza o fluxo da matéria-prima ao longo dos processos produtivos com o objetivo de alinhar a produção à procura com precisão, ordenando o ritmo do sistema.

Ainda na perspectiva de Alvarez & Antunes Jr. (2001), o *Takt-Time* corresponde ao tempo que rege o fluxo dos materiais em uma linha ou célula produtiva. Os autores destacam que o tempo disponível para produção não é necessariamente igual à duração do expediente. Devendo ser descontadas as paradas programadas, como manutenções preventivas e interrupções por razões ergonômicas.

Para Arantes (2008), “O *Takt-Time* para a construção pode ser entendido como o ritmo para a execução de actividades, segundo o planeamento das acções futuras a serem realizadas no processo de produção”.

2.5.5.6 LAST PLANNER SYSTEM

O *Last Planner System* (LPS) foi desenvolvido por Ballard & Howell na década de 1990, o sistema foi destinado ao planejamento e controlo da produção no nível operacional, com aplicação direta em estaleiros de construção. Talvez, seja a ferramenta mais popular das ferramentas que tem por base os princípios LC, sucesso esse devido a sua implementação na indústria da construção ter demonstrado bastante sucesso (Araújo, 2015; Grenho, 2009; Isatto et al., 2000).

Esta ferramenta valoriza os profissionais responsáveis pelo último nível de planeamento que precede a execução das atividades, devido serem os últimos a definir o trabalho a ser realizado em determinado período, por isso *Last Planners*. Denominados “últimos planejadores”, esses são aqueles que, mais próximos da execução, decidem quando e qual atividade de curto prazo deve ser realizada a partir do fluxo de trabalho. O planeamento do LPS é dividido em três planos principais: longo, médio e curto prazo (Arantes, 2008; Campos, 2017; Genestretti, 2018; Isatto, 2000; Tavares, 2020):

1. **Plano geral de longo prazo (*Master Schedule*)** – Corresponde ao planejamento global do projeto, apresentando uma visão estratégica e panorâmica da obra. Neste plano são definidas as principais fases, metas, os marcos a serem cumpridos e sequências

construtivas. O plano de longo prazo inclui considerações relativas a calendarização geral, custos e alocação de recursos, apresentando baixo nível de detalhamento.

2. **Plano de antevisão de médio prazo (*Lookahead Plan*)** – Este nível estabelece a ligação entre o planeamento de longo prazo com o plano de execução de curto prazo, disponibilizando maior detalhamento do planeamento, com foco na identificação e remoção de restrições que possam comprometer o fluxo produtivo. O planeamento de médio prazo permite preparar as atividades futuras, garantindo que apenas as atividades “executáveis” avancem para o plano semanal. Podendo ser executada tanto por uma equipa interna da empresa, quanto diretamente nas obras, pois o objetivo é que todos os participantes compreendam e apoiem o plano.
3. **Plano semanal de trabalho (*Weekly Work Plan*)** – Representa o núcleo operacional do LPS. Neste nível são definidas as atividades que serão realizadas naquele período, geralmente com ciclo semanal, sendo elaboradas, detalhadas e atualizadas com a participação dos “*Last Planners*”. O objetivo é sequenciar as atividades de forma a assegurar o fluxo de trabalho, maximizando a utilização de recursos e minimizando interrupções. O plano é detalhado e atualizado semanalmente, o que permite ajustes conforme a realidade do estaleiro.

2.5.5.7 ENGENHARIA SIMULTÂNEA

Engenharia Simultânea (ES) é uma abordagem sistemática voltada ao desenvolvimento interligado e análogo de um produto e todos os processos relacionados, abrangendo do projeto ao suporte. Seu objetivo é fazer com que todos os colaboradores envolvidos no desenvolvimento considerem pontos importantes, como qualidade, custos, testes, fabricação, montagem, prazos e requisitos dos clientes, durante todas as fases do ciclo de vida do produto (Mariquito et al., 2016).

Ainda segundo Mariquito et al. (2016) a aplicação da ES no desenvolvimento de produtos está associada a três objetivos principais: a redução de custo com a ampliação da manufaturabilidade dos projetos; diferenciação perante o mercado consumidor, com a introdução de produtos inovadores e de qualidade; e a ampliação da qualidade do produto ofertado. Adicionalmente, os autores destacam outros objetivos relevantes associados a ferramenta, como:

- Análise dos requisitos dos clientes e adaptações dos projetos;
- Desenvolvimento de soluções de fácil junção e manipulação;
- Integração de manufatura e projeto, a fim de melhor atingir as necessidades e requisitos;
- Foco contínuo no incremento do processo de manufatura e produção;
- Times multifuncionais atuando juntos, visando uma melhor comunicação e desenvolvimento do produto;
- Redução do tempo de manufatura.

Segundo Arantes (2008), a introdução da ES em uma organização contribui para uma maior integração entre os diferentes departamentos, bem como entre a empresa, seus

fornecedores e clientes, tornando os processos de produção mais robustos que contribuem para uma maior qualidade do produto ao longo do seu ciclo de produção e de utilização.

2.5.5.8 DIAGRAMA DE ESPAGUETE

O Diagrama de Espaguete (DE) é uma ferramenta *Lean* que auxilia no dimensionamento do *layout* ideal do ambiente de trabalho, com base nas distâncias percorridas durante a execução de uma definida atividade ou processo (Deguirmendjian, 2016). Essa ferramenta permite identificar *layouts* ineficientes, bem como deslocamentos excessivos e desnecessários entre as diferentes etapas do processo.

A elaboração do DE consiste em desenhar o *layout* da operação e sobrepor a ele linhas que representam a movimentação física. Dessa forma, a ferramenta torna-se essencial para o redesenho de processos, evidenciando oportunidades para otimizar o fluxo e reduzir deslocamentos (Faveri, 2013).

O passo a passo para elaborar o DE é fundamento nas seguintes etapas (Deguirmendjian, 2016):

- Identificação do *layout* a ser otimizado e elaboração de um esboço preliminar da área de estudo;
- Elaboração da planta baixa respeitando as características reais do ambiente, incluindo a disposição de mobiliários, equipamentos, estações de trabalho e áreas de estoque;
- Adaptação do esboço inicial à planta baixa do local para o início do traçado técnico;
- Observação direta e registro do percurso físico de pessoas, materiais, e informações, traduzindo-os em linhas que representam o fluxo operacional;
- Análise do diagrama, com base na identificação de desperdícios relacionados à movimentação e ao transporte no processo; quando necessário, mensurar o tempo desperdiçado nas atividades;
- Proposição de melhorias no *layout* com base nos resultados obtidos.

3 METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO CIENTÍFICA

Este capítulo tem por objetivo apresentar os procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento do estudo, a fim de cumprir os objetivos apresentados anteriormente no Capítulo 1 desta dissertação.

3.1 ESTRUTURA METODOLÓGICA DA INVESTIGAÇÃO

A presente investigação caracteriza-se como pesquisa aplicada e exploratória, uma vez que se destaca por seu interesse prático na aplicação das propostas de otimização de problemas identificados no Método de Lançamento Incremental (MLI) de pontes em contexto real de obra, bem como investiga um tema com pouca literatura disponível (Silva, 2015). Adicionalmente, pode ser classificada como uma pesquisa de problemas complexos, ao qual visa solucionar diferentes problemas com diferentes soluções (Fellows & Liu, 2015).

Segundo Fellows & Liu (2015), “Na pesquisa qualitativa, realiza-se uma exploração do tema, às vezes sem formulações prévias – o objetivo pode ser obter compreensão e coletar informações e dados para que teorias emergam e, portanto, tende a ser exploratória”. Essa investigação adotou uma abordagem predominantemente qualitativa, com suporte quantitativo, permitindo combinar a interpretação técnica dos problemas identificados com a análise dos resultados obtidos.

Como instrumentos de pesquisa, foram utilizados a revisão bibliográfica através de análise documental e a aplicação de questionários. A revisão bibliográfica serviu para fundamentar teoricamente o estudo, enquanto a pesquisa exploratória, realizada por meio de questionário, possibilitou expandir a visão além da teoria do MLI para compreender também as problemáticas encontradas em campo (Silva, 2015).

A aplicação de um segundo questionário permitiu realizar a validação das propostas de otimização desenvolvidas apresentadas através de um *Framework*, o que possibilitou também complementar a investigação com uma análise qualitativa e quantitativa das respostas obtidas.

A investigação foi dividida em cinco etapas sequenciais. A Figura 37 apresenta, de forma esquemática, a metodologia adotada na investigação, evidenciando a interligação das cinco etapas referidas anteriormente entre revisão bibliográfica, a pesquisa exploratória, a síntese dos problemas identificados, as ferramentas a serem aplicadas, a etapa de otimização e a respectiva validação por profissionais da área, proporcionando uma visão abrangente e estruturada do processo.

FUNDAMENTAÇÃO DA PESQUISA						
1.REFERÊNCIAL TEÓRICO						
Revisão Bibliográfica:	• Artigos científicos; • Livros; • Teses e dissertações; • Relatórios e documentos técnicos.			Número de problemas identificados no MLI:	5	
2.PESQUISA EXPLORATÓRIA VIA QUESTIONÁRIO						
Agrupamento das questões:	• Planeamento e gestão; • Execução do ciclo; • Problemas, atrasos, condicionantes e desperdícios; • Materiais; • <i>Lean</i>; • Encerramento.			Vias de contacto:	• E-mail; • Telefone; • Instagram; • LinkedIn.	
Número de pessoas/empresas contactadas:	17 Empresas 14 Pessoas	Respostas Obtidas:	2	Número de problemas identificados no MLI:	21	
		1x Projetista 1x Gerente de obra				
3.SÍNTESE DOS PROBLEMAS IDENTIFICADOS E FERRAMENTAS APLICADAS				4.OPTIMIZAÇÃO E FRAMEWORK		
Síntese e agrupamento por familiaridade dos problemas identificados:	16			• Optimização do processo construtivo a partir da síntese de problemas identificados; • Faseamentos das etapas construtivas; • Desenvolvimento do <i>Framework</i>.		
Ferramentas a serem utilizadas:	• VSM; • VM; • TPM; • <i>Kaizen</i>; • <i>Takt-Time</i>.	• JIT; • LPS • ES; • DE.				
5.VALIDAÇÃO DO FRAMEWORK VIA QUESTIONÁRIO						
		Validação do <i>Framework</i> com profissionais da área.	Respostas Obtidas:	3		
			3x Gerente de obra			

Figura 37 - Metodologia de investigação utilizada.

Fonte: Autoria própria.

Dessa forma, a estrutura metodológica adotada permite assegurar a coerência entre as diferentes etapas da pesquisa e os objetivos propostos, possibilitando a obtenção de resultados consistentes, fundamentados e alinhados ao problema de investigação.

3.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica consta como a primeira fase investigativa deste trabalho. Inicialmente, foi efetuada a procura por elementos bibliográficos cujo foco principal é o estudo do MLI. Este estudo busca aprofundar o conhecimento sobre o método, de modo a possibilitar a identificação de eventuais problemas nas suas diversas fases construtivas, principalmente no que tange à prática real de obra. As bases de dados utilizadas para realizar o levantamento bibliográfico abrangeu artigos científicos, livros, teses, dissertações, relatórios e documentos técnicos.

Este levantamento possibilitou realizar a contextualização inteiriça do MLI e compreender os seus fundamentos teóricos a respeito do processo. Contudo, constatou-se uma disponibilidade relativamente limitada de publicações específicas sobre o tema, sobretudo no que se refere à análise detalhada do processo construtivo em contexto real de obra, ao que rege o interesse desta pesquisa. Observa-se ainda, que além da escassez de estudos que aborda de forma aprofundada a aplicação prática do método, à falta de identificação sistemática de dificuldades operacionais ao longo das diferentes fases construtivas.

Apesar dessa restrição na literatura disponível, foi possível levantar uma hipótese inicial de 5 problemas relacionados ao MLI, os quais serão detalhadamente apresentados na subseção 4.1.1 do Capítulo 4 e identificados no Quadro 3.

Essa limitação dificulta o desenvolvimento de estudos voltados à aplicação de princípios e ferramentas *Lean Construction* (LC) no contexto do MLI. Diante deste cenário, optou-se pela realização de uma pesquisa exploratória junto a profissionais familiarizados com o método, visando compreender, sob a perspectiva prática, os reais desafios e oportunidades presentes na sua implementação em obras, a qual, em contextos específicos, pode divergir da teoria.

3.3 PESQUISA EXPLORATÓRIA

Como complemento à revisão bibliográfica, tem-se a pesquisa exploratória com o intuito de captar mais informações e identificar os principais desafios enfrentados na aplicação do MLI em contexto real, sob as perspectivas de profissionais já familiarizados com o método. Com esse propósito, recorreu-se ao uso de questionário como ferramenta metodológica, permitindo uma imersão direta na realidade prática do setor e a recolha de dados alinhados ao foco da investigação fundamentados nas experiências dos profissionais.

3.3.1 QUESTIONÁRIO EXPLORATÓRIO

O questionário foi elaborado com base na revisão bibliográfica, a qual abrange a teoria a respeito do MLI, os diversos processos construtivos de pontes, e os princípios da LC para assimilação e caracterização de problemas passíveis de otimização. Além disso, foram considerados, sob uma perspectiva geral, problemas recorrentes em obras de infraestrutura e no gerenciamento de obras que pudessem apresentar semelhanças com o método em estudo. Paralelamente, para a elaboração do questionário da pesquisa exploratória foi a percepção prática associada ao tema, englobando a experiência do investigador, conversas informais com profissionais e observações preliminares relacionadas ao processo construtivo de pontes.

A partir dessa literatura e o conhecimento técnico adquirido, foi possível identificar elementos relevantes para a estruturação do questionário. Diante disso, o instrumento de pesquisa, conforme apresentado no Apêndice A, foi estruturado considerando diferentes dimensões e processos do MLI, ao qual foi dividido em blocos de perguntas categorizadas de acordo com o fluxo do processo construtivo. O Quadro 2 apresenta a estrutura temática do questionário exploratório, evidenciando a distribuição das perguntas por tema e o respectivo foco de investigação pretendido para cada um deles.

Quadro 2 - Estrutura temática do questionário exploratório.

Temática	Questões	Foco da Investigação
Planeamento e Gestão	1, 2, 3 e 4	Identificar os meios de planeamento e gestão, o fluxo de informação entre estaleiro e gestão, além de investigar as ferramentas de controlo utilizadas para a eficiência do ciclo produtivo.
Execução do Ciclo	5, 6, 7, 8, 9 e 10	Perceber os desafios que ocorrem durante o ciclo do MLI, bem como sua logística na mobilização de operários e equipamentos, além dos processos de fiscalização adotados.
Problemas, Atrasos, condicionantes e Desperdícios	11, 12, 13 e 14	Elencar os desperdícios que contribuem para atrasos ou ineficiências no processo construtivo geral do MLI.

Materiais	15 e 16	Compreender as principais perdas de materiais e como é realizado o controlo de qualidade ao longo da execução.
Lean	17 e 18	Verificar a aplicação das ferramentas LC na gestão da obra.
Encerramento	19, 20 e 21	Reconhecer a experiência dos profissionais, bem como as suas sugestões de melhoria, além de identificar faseadamente o método do MLI, assim como etapas e tempos de duração.

Fonte: Autoria Própria.

3.3.2 ESTRATÉGIA DE AMOSTRAGEM E CONDUÇÃO DA PESQUISA EXPLORATÓRIA

Após o questionário ter sido elaborado, procedeu-se à identificação do público-alvo a ser contactado para contribuir com a investigação, a qual abrangeu empresas, profissionais e estudantes que possuíam familiaridade com o método em estudo. Por se tratar de um método construtivo bastante específico e relativamente pouco difundido, a procura por tais respondentes com conhecimento técnico adequado apresentou ser uma tarefa desafiadora, condicionada pelos seguintes fatores:

- População restrita: a quantidade de profissionais que domina o assunto é limitada;
- Dispersão geográfica: foi necessário ampliar a busca e contactar empresas e profissionais de outras nacionalidades e países;
- Barreira linguística: tem-se variação na nomenclatura técnica internacional, com potencial risco de traduzir de forma incorreta os termos adotados;

A priori, realizou-se uma busca por empresas que atuassem no setor de construção de pontes e infraestrutura, com potencial envolvimento na execução ou no projeto de obras de arte especiais construídas pelo MLI. A identificação dessas organizações possibilita a localização de profissionais potencialmente familiarizados com o tema, constituindo assim a primeira estratégia de abordagem da pesquisa exploratória. Dessa forma, após a identificação das empresas, é estabelecido o contato por meio dos canais disponíveis, tais como e-mail, formulários de contato e, em alguns casos, o contato telefónico ou departamentos específicos. Ao todo, foram identificadas e selecionadas aproximadamente 17 empresas, distribuídas em diferentes países, apresentando atuações consolidadas no setor da engenharia civil, especialmente nas áreas de projetos, construção de pontes e desenvolvimento de sistemas de cofragem.

Entre as empresas selecionadas, destacam-se empresas com forte atuação tanto no mercado nacional, caracterizado ao país de origem, quanto no cenário internacional, por meio de sedes ou filiais em outros países. Grande parte dessas empresas apresentam características de atuação multinacional. Diante disso, buscou-se ampliar as possibilidades de contato, realizando tentativas de comunicação não apenas com a sede principal das empresas, mas também com suas filiais internacionais. Essa estratégia teve como objetivo aumentar a probabilidade de estabelecer comunicação com profissionais potencialmente familiarizados

com o MLI, considerando que diferentes filiais podem atuar em projetos distintos e, consequentemente, possuir equipas técnicas com experiências variadas.

Paralelamente, através do LinkedIn, plataforma de cunho profissional amplamente utilizada para a divulgação de experiências profissionais, partilha de conhecimento técnico e estabelecimento de conexões na Engenharia e demais áreas, foi possível encontrar e estabelecer contacto com profissionais potencialmente relacionados ao tema da investigação. Por meio desta plataforma foram identificados e contactados 14 profissionais de forma direta, incluindo especialistas de diferentes nacionalidades e países de atuação, o que reflete a dispersão geográfica e as barreiras linguísticas apontadas anteriormente como limitações deste estudo.

Nesse sentido, buscou-se priorizar contato direto com profissionais envolvidos em projetos ou processos construtivos, de forma a obter percepções práticas sobre o método e sobre eventuais dificuldades observadas durante a execução das obras.

Ao final do processo da coleta de dados, foram obtidas duas respostas válidas ao questionário da pesquisa exploratória. Apesar do número reduzido de participantes, ainda assim, as respostas obtidas forneceram percepções profundas e qualificadas sobre o processo construtivo analisado e os desafios a ele associado, muito devido à grande experiência dos mesmos. Além das limitações já apresentadas anteriormente, o número de respostas obtidos também pode estar associados aos seguintes fatores, como:

- Escassez de tempo: indisponibilidade de agenda por parte dos profissionais;
- Receios: hesitação de alguns em compartilhar informações internas sobre processos, falhas ou métodos construtivos de empresas;
- Baixa taxa de retorno: a ausência de resposta por parte da grande maioria dos contactados.
- Conhecimento: Apesar de conhecimento e experiência em pontes, nem sempre o MLI é alvo de experiência por todas as empresas e técnicos selecionados.

Um dos respondentes atua predominantemente na fase de projeto, sendo responsável pelo dimensionamento e concepção estrutural da ponte antes da etapa de lançamento, com experiência nessa atuação em 7 pontes construídas pelo MLI. Já o outro respondente possui experiência na fase de execução, estando diretamente envolvido no processo de lançamento da estrutura após a conclusão do projeto. Essa distinção é particularmente relevante, pois permite analisar o método a partir de duas perspectivas complementares: a visão do projetista, associada à concepção e planeamento da estrutura, e a visão do executor, relacionada à implementação prática do processo construtivo. Dessa forma, mesmo com um número reduzido de respostas, torna-se possível identificar percepções distintas sobre o método ao longo de diferentes fases da sua aplicação. Essa diferença de perfis contribui para uma compreensão mais abrangente do processo construtivo do método, possibilitando identificar desafios tanto na fase de planeamento e projeto quanto na fase de execução, aspectos relevantes para a análise de oportunidades de otimização com base nos princípios LC.

Com as respostas obtidas no questionário da pesquisa exploratória, foi possível identificar 21 problemas relacionados ao MLI, os quais serão detalhadamente apresentadas e discutidas na subseção 4.1.2 do Capítulo 4 e identificados no Quadro 4.

3.4 SÍNTESE DOS PROBLEMAS E APLICAÇÕES LEAN

Após a identificação dos problemas na revisão bibliográfica e na análise prévia das respostas obtidas através da pesquisa exploratória, realizou-se um processo de filtragem em dois níveis para eliminar redundâncias. Primeiramente, sintetizaram-se os problemas de forma interna na pesquisa exploratória, unificando os de aspectos semelhantes, como, por exemplo, as diferentes menções ao uso do macaco hidráulico, evidenciadas no Quadro 4 na subseção 4.1.2.6, tornando-o em um único aspecto. Posteriormente, sintetizaram-se os problemas equivalentes, semelhantes ou congruentes identificados entre ambas as fontes de dados. Ao final da sintetização, foram identificados 16 problemas com intuito de propor as otimizações fundamentas a partir das ferramentas *Lean*.

Na sequência, foram estabelecidas categorias para que os problemas pudessem ser distribuídos em diferentes dimensões do processo construtivo com suas respectivas características, facilitando a visualização e a compreensão. Estas categorias foram definidas em diferentes índices, como:

- Índice A: Gestão;
- Índice B: Fluxo de Trabalho;
- Índice C: Material;
- Índice D: Equipamentos;
- Índice E: Fatores Externos.

A síntese dos problemas, categorizados em suas respectivas dimensões do processo permite identificar melhor os desafios e oportunidades associados ao MLI, possibilitando reconhecer fatores recorrentes relacionados ao planejamento, execução dos ciclos de lançamento, materiais, condicionantes operacionais e atrasos no processo construtivo. Esta análise contribui para uma melhor compreensão dos desafios identificados, para que possa ser feita a integração da boa prática das ferramentas *Lean* como suporte ao desenvolvimento das propostas de otimização.

Neste contexto, as ferramentas *Lean* que serão aplicadas para o desenvolvimento das propostas de otimização dos desafios encontrados, já abordadas no referencial teórico, são:

- *Value Stream Mapping* (VSM);
- *Visual Management* (VM);
- *Total Productivity Maintenance* (TPM);
- *Kaizen*;
- *Takt-Time*;
- *Just-in-Time* (JIT);
- *Last Planner System* (LPS);

- Engenharia Simultânea (ES);
- Diagrama de Espaguete (DE).

Essas ferramentas servirão como base para o desenvolvimento das propostas de otimização apresentadas nas seções subsequentes.

3.5 OTIMIZAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO FRAMEWORK

Com os diagnósticos da revisão bibliográfica e da pesquisa exploratória devidamente sintetizados, procede-se ao desenvolvimento de propostas de melhoria fundamentadas nas ferramentas LC previamente selecionadas. O intuito é buscar não só mitigar falhas pontuais, mas também promover a otimização do fluxo produtivo, a redução de desperdícios e o aumento da eficiência global, solucionando as ocorrências identificadas na subseção 4.1.3 do Capítulo 4.

A estrutura da seção 4.2, dedicada à apresentação das propostas de otimização, foi organizada de modo a manter a sequência de índices e aspectos previamente estabelecidos no Quadro 5. Dessa forma, a discussão avança de forma sistemática pelas cinco categorias mapeadas: índice A (Gestão), Índice B (Fluxo de Trabalho), Índice C (Material), Índice D (Equipamentos) e Índice E (Fatores Externos). Sob esta configuração, cada subseção aborda e integra os seus respectivos entraves, contextualizando e correlacionando as diferentes ocorrências às ferramentas LC, bem como o resultado esperado para a adoção de cada estratégia. Nesse sentido, essa abordagem visa melhorar a eficiência, a previsibilidade, o controle, a comunicação, a produtividade, padronização, a segurança e a continuidade do fluxo produtivo.

No final da seção, fica claro e de compreensão dinâmica em que cada problema identificado no MLI se desenvolve, bem como as estratégias e abordagens de melhorias baseadas na LC para mitigá-las e os resultados esperados com essas contribuições. Adicionalmente, a seção retém estratégias apresentadas por diagramas e figuras que reforça a compreensão do leitor e que tem como principal objetivo serem adotadas em contextos reais.

Nota-se que alguns dos problemas identificados podem ser tratados em diferentes blocos, enfatizando-se, principalmente, aqueles relacionados aos Fatores Externos. Estes, em algumas ocasiões, são abordados de maneira paralela e integrada em outros tópicos, uma vez que as interferências climáticas e meios logísticos externos impactam diretamente o fluxo de trabalho e a gestão operacional.

Ainda sobre os diagramas e figuras apresentados, com o resultado da pesquisa exploratória e a revisão bibliográfica pertinente foi possível fazer o levantamento das principais fases de construção do MLI, tomando como referência o estudo de caso da obra sobre o rio Cubal da Hanha, em Angola, disponibilizada por um dos respondentes da pesquisa exploratória, bem como a construção do Viaduto Millau, na França, descrito por Lin (2022). A partir deste levantamento, estruturaram-se as várias fases e conteúdo do processo construtivo de pontes pelo MLI, evidenciando a sequência de atividades, as suas inter-relações e os principais pontos de controle, conforme apresentado na Figura 38, na subseção 4.2.1. Adicionalmente, elaborou-se um modelo de organização em ciclo semanal para a construção do tabuleiro através do MLI,

detalhado na Figura 42, na subseção 4.2.2. Ambos os casos, partindo de princípios fundamentados na filosofia LC.

A partir da integração dessas soluções, na seção 4.3 será abordado o desenvolvimento de um *Framework*, apresentado no Apêndice C. O *Framework* tem como objetivo organizar e sintetizar as propostas de melhoria, facilitando a compreensão e a aplicação do modelo por parte dos profissionais envolvidos na projeção e gestão da obra.

3.6 VALIDAÇÃO DO FRAMEWORK

Com o intuito de aferir a aplicabilidade, relevância, adoção e adequação prática do *Framework* que apresenta as propostas de otimização desenvolvidas para o MLI, realizou-se uma etapa de validação junto de profissionais familiarizados com o método. A validação foi realizada por meio da aplicação de um questionário, elaborado especificamente para avaliar as soluções propostas ao longo dessa investigação.

As questões do questionário foram desenvolvidas de forma a traduzir de maneira assertiva a relação entre os problemas sintetizados e as soluções sugeridas, permitindo aos respondentes avaliar a pertinência dessas soluções no contexto real de obra. O questionário foi organizado por blocos, buscando manter a estrutura metodológica utilizada na pesquisa, sendo estas: Gestão, Fluxo de Trabalho, Material, Equipamentos e Fatores Externos, bem como para o questionário de validação foram implementados conceitos a respeito do *Framework* e questões a respeito sobre aceitação das propostas e sugestões de melhorias. Os conceitos utilizados na elaboração do questionário para validação das propostas, bem como sua lógica estrutural são apresentadas detalhadamente na seção 4.3. Esta seção ainda contextualiza os procedimentos avaliativos que serão utilizados para a análise dos resultados e discussão, assim como discute os resultados dos questionários aplicados. O questionário completo utilizado na validação encontra-se disponível no Apêndice D.

A validação teve como objetivo obter a percepção técnica dos participantes quanto ao nível de adequação, aplicabilidade e potencial contribuição prática das propostas desenvolvidas. Para isso, adotou-se um sistema de pontuação estruturado em escalas de avaliação, permitindo a análise quantitativa das respostas obtidas. Adicionalmente, realizou-se uma análise qualitativa complementar com base nos comentários e observações apresentados pelos participantes, permitindo uma interpretação mais aprofundada da aplicação prática das soluções propostas no contexto real de obras executadas pelo MLI.

O envio do questionário de validação enfrentou as mesmas condicionantes e limitações já citadas para o envio da pesquisa exploratória, resultando na obtenção de 3 respostas válidas. É importante ressaltar que, embora o número de respostas para o questionário de validação seja relativamente baixo, os profissionais familiarizados com o método são de grande referência no âmbito de lançamento incremental, o que torna o pouco número de respostas em grande potencial de argumentação. Visto isso, a análise dos resultados e discussão será feita detalhadamente na subseção 4.3.2.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia proposta, organizados conforme as etapas definidas anteriormente, o que permite a identificação dos principais problemas e a proposição de soluções voltadas à otimização do Método de Lançamento Incremental (MLI).

4.1 PROBLEMAS IDENTIFICADOS

Os problemas apresentados a seguir foram identificados e analisados com base na revisão bibliográfica e na pesquisa exploratória, sendo, ao final do capítulo, apresentada uma síntese consolidada dos principais desafios associados ao MLI.

4.1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A partir da revisão bibliográfica realizada nessa dissertação, foi possível identificar, ainda que de forma limitada, possíveis aspectos problemáticos associados a prática do MLI em contexto real de obra. Conforme sintetizado no Quadro 3, os desafios identificados concentram-se em questões relacionadas à precisão executiva, ao comportamento e instalações dos aparelhos de apoio, bem como o controle de recalques e à variabilidade dos ciclos construtivos.

Quadro 3 - Problemas Identificados na Revisão Bibliográfica.

Autores	Problemas identificados
Manfred Theodor Schmid (2005)	Primeiro ciclo apresenta maior tempo de duração
Manfred Theodor Schmid (2005) Marcelo Waimberg (2002)	Erro acumulado de detalhamento ou imprecisão executiva
Marcelo Waimberg (2002) Xiangchen Lin (2022)	Erro de introdução do aparelho de apoio de Teflon no apoio deslizante
Marcelo Waimberg (2002)	Desnívelamento entre apoios
	Detalhamento dos aparelhos de apoio provisório

Fonte: Autoria própria.

A utilização de suportes temporários e cabos de estabilização funciona como uma estratégia essencial de controle de variabilidade. Como a estrutura sofre deformações inevitáveis devido à ação da gravidade durante o avanço, esses apoios atuam como dispositivos de padronização geométrica, reduzindo as flechas no vão central e garantindo o posicionamento preciso. Sem essa estabilização, o fluxo de produção seria constantemente interrompido por erros de alinhamento, gerando desperdícios de tempo e recursos, além de comprometer a segurança operacional e a integridade final da obra. Os problemas relacionados à degradação da camada de Teflon e à necessidade de utilização de suportes temporários evidenciam desafios críticos no processo do MLI, sobretudo no que se refere ao controle das cargas atuantes e à estabilidade estrutural durante as fases transitórias. A danificação do Teflon, decorrente da elevada concentração de tensões normais não devidamente consideradas em projeto, revela uma

lacuna no planeamento integrado entre conceção e execução, resultando em falhas que impactam diretamente a continuidade e eficiência do processo.

O primeiro ciclo do processo apresenta, frequentemente, um tempo de execução superior aos demais, uma vez que envolve a fase inicial de adaptação da equipa, montagem do estaleiro de obra, ajuste dos equipamentos e nivelamento das formas. Após as primeiras repetições, observa-se uma tendência de otimização do desempenho, decorrente do caráter repetitivo do método, que permite ganhos progressivos de produtividade e eficiência.

A precisão na execução assume um papel crítico ao longo de todo o processo. Pequenos desvios no alinhamento, no nivelamento ou na geometria das cofragens podem resultar em erros acumulados ao longo dos segmentos, comprometendo o desempenho global da estrutura e exigindo correções ao final da construção. Tal problemática evidencia a elevada sensibilidade do método à qualidade do controlo executivo, sendo fundamental a implementação de rigorosos procedimentos de verificação e monitoramento contínuo.

Referente aos recalques nos apoios apresentados por Waimberg (2002), o autor relata duas situações principais quando da chegada do nariz metálico a um dos apoios. Quando o apoio subsequente está acima do nível previsto, a força necessária para ajustar o tabuleiro ao apoio acaba superando a necessária para corrigir a deformação da estrutura, reduzindo, assim, os esforços no apoio imediatamente anterior. No entanto, quando o apoio subsequente está abaixo do nivelamento esperado, pode acarretar um esforço solicitante maior que o esperado no apoio anterior ao subsequente, devido ao nariz metálico apresentar uma reação menor.

O autor acrescenta ainda um caso em que ocorreu recalque no estaleiro de obra, o qual provocou um giro na estrutura em torno do encontro, evidenciando a necessidade de considerar, ainda na fase de projeto, as possíveis deformações no solo, tanto no estaleiro quanto nas demais zonas de apoio.

4.1.2 PESQUISA EXPLORATÓRIA

A fim de complementar a revisão bibliográfica, a pesquisa exploratória permitiu compreender informações e identificar problemas práticos, que vão além da teoria disponível.

A pesquisa sobre este estudo envolveu diferentes dimensões, temáticas e processos do MLI, ao qual foi dividido em blocos de acordo com o fluxo do processo construtivo. Esta organização permitiu captar mais informações e identificar os principais desafios enfrentados na aplicação do MLI na prática, nomeadamente nas áreas de: Planeamento e Gestão; Execução do Ciclo; Problemas, Atrasos, Condicionantes e Desperdícios; Material; e *Lean*.

As respostas obtidas no questionário exploratório foram de grande relevância técnica, devido os profissionais apresentarem experiência relevante ao tema.

4.1.2.1 PLANEAMENTO E GESTÃO

Conforme relata ambos os profissionais, o MLI trata-se de um método de grande planeamento e estudo antes da sua execução. Para estudar e determinar o melhor método construtivo, apresentar a proposta ao respectivo cliente que contratou o serviço, acontece a procura por profissionais terceirizados, engenheiros de obras temporários, para realizar todos

os cálculos de tempo e custos, definir os equipamentos e métodos específicos. São considerados também os fatores de tempo e clima perante a execução, confirmando que é de extrema rigorosidade o planeamento geral para que nem mesmo os pormenores atrapalhem o ciclo de lançamento. Perante as respostas do executor, no decorrer da obra havia reuniões de ciclos semanais com os gerentes que são ativamente presentes para conduzir e impulsionar o projeto, método esse que se assimila a ferramenta de *Last Planner System (LPS)* da *Lean Construction (LC)*, aplicada de forma implícita informal, o que ainda é muito comum no ramo da construção civil, conforme averiguado durante a pesquisa.

Por mais que é confirmado o uso de MS Project para criação do cronograma encontrado em campo, não existe evidência da elaboração de relatórios e utilização de indicadores de desempenho durante o acompanhamento do cronograma no período da obra. Afirma-se que eram realizadas reuniões semanais, porém não se tem a confirmação das ferramentas de controlo utilizadas nesses encontros, como cronogramas visíveis ou até mesmo painéis, que auxiliavam a visualização do processo. Por outro lado, o projetista nos dá uma diferente visão pra quem atua no escritório e não vive a prática da obra no dia a dia, ainda mais em um projeto de caráter intercontinental. Em seu relato, por mais que a comunicação era um problema, ainda sim foi possível manter uma comunicação entre a equipa de obra e a equipa de projeto, fato esse que se assemelha a uma engenharia simultânea entre projetistas e executores. O mesmo volta a esclarecer que um bom projeto elaborado é a melhor garantia para não haja dúvidas em obra.

Ambos os entrevistados evidenciam que o planeamento de alto rigor é a solução mais satisfatória para que não ocorra nenhuma avaria durante a execução do lançamento incremental, assim como uma forte presença da gestão e um projeto bem detalhado. Nota-se isso quando citam “O mais importante de tudo é ter um bom projeto, com o detalhe necessário para que não se levantem dúvidas em obra” e “O forte envolvimento rigoroso e a motivação da gestão resultaram na ausência de atrasos no projeto”.

4.1.2.2 EXECUÇÃO DO CICLO

No que se refere a execução do ciclo do processo construtivo, ambos os respondentes relataram problemas com o betão somente nas etapas de lançamento, cura e ensaios do betão, considerando ser a fase mais crítica o controlo de qualidade e a cura adequada. O executor relata que em uma das cabeças de pré-esforço ocorreu uma pequena bicheira, mas que foi reparada ainda dentro do período de cura, sem causar qualquer atraso na obra, porém, essa ação corretiva realizada na obra é identificada como retrabalho e no conceito geral da *Lean* é considerado como um desperdício (Ohno, 1997).

Quando falamos em execução do ciclo, logo pensamos em uma linha de produção cíclica, ou seja, uma produção que tem a característica de reproduzir algo repetidamente, em um modelo “começar-finalizar-começar-finalizar” e assim sucessivamente.

Para os respondentes, dependendo das condições da obra, o ciclo para produzir um segmento tem como *Takt-Time* (ritmo de produção) aproximadamente 2 semanas, podendo ser otimizado facilmente para 1 semana. Eles acrescentam que já existem estratégias para otimizar

qualquer tempo ocioso, caracterizando um planeamento inicial bem definido, que já previu as ociosidades da obra e contornou a situação.

A boa otimização do estaleiro de obra é um fator importante para que o processo seja de caráter eficiente e otimizado, reduzindo desperdícios no ciclo de execução. Conforme literatura (Schmid, 2005; VSL International Ltd., 1977), o MLI se mostra um processo muito otimizado e de fácil aplicação de estaleiro de obra, destacado por muitos como uma vantagem do método e confirmado pelos respondentes na pesquisa exploratória, onde têm-se resposta para questões da implementação do *Layout* do estaleiro tais como: “O processo foi simples” e “Esta é uma das grandes vantagens deste método construtivo”.

Ainda a respeito do lançamento em ciclo, o macaco hidráulico é uma das ferramentas principais para o progresso do MLI e quando se trata de ciclo, é uma das ferramentas mais cíclicas que existem em um contexto global do método. A escolha do instrumento, assim como a fiscalização e o monitoramento rigoroso sobre o mesmo, é de extrema importância para evitar qualquer infortúnio. As respostas tanto do Executor quanto do Projetista remete-se a isso, ambos enfatizam que o teste previamente feito são de extrema importância para evitar falhas e que as ferramentas devem ser bem escolhidas antes de sua implementação. “Barato sai, normalmente, caro” é uma afirmação do Projetista que se deve refletir na implementação da LC.

Ao serem questionados sobre como é feito a revisão técnica e/ou fiscalização antes de cada deslocamento, têm-se uma resposta esperada, que é ligada mais a parte executiva do que projetista. Conforme relato, as inspeções são feitas por profissionais e técnicos durante 1 hora de forma visual. Para auxiliar essa etapa do MLI, pode-se aplicar checklists e orientações espalhadas pelo campo. Além disso, a ferramenta que auxiliaria essa prática seria o Diagrama de Espaguete (DE), traçando o melhor percurso para realizar a inspeção visual mais rápida e a *Visual Management* (VM) que torna as informações do processo claras e visível, facilitando o controlo das atividades e garantindo que pontos específicos não sejam esquecidos (Deguirmendjian, 2016; Esteves et al., 2015).

4.1.2.3 PROBLEMAS, ATRASOS, CONDICIONANTES E DESPERDÍCIOS

Em relação a problemas, atrasos, condicionantes e desperdícios, os respondentes voltam a afirmar que a melhor opção sempre será planejar da melhor forma. Portanto, relatam que um dos principais desafios técnicos está relacionado ao sistema de cofragem do betão e todos os seus componentes, como por exemplo, o seu difícil manuseio e falta de detalhamento das formas em projeto, além da escassez da mão de obra especializada no MLI.

Como já visto antes, a cura do betão é uma das principais condicionantes para o lançamento do tramo, podendo acrescentar também que a questão do clima é um fator crítico para o planeamento inicial, como relatado pelo projetista e validado em referências bibliográficas (Schmid, 2005). No inverno, esse processo tende a ser mais lento e, no verão, é necessário controlar o calor de hidratação; uma das formas de combater isso é planejar o cronograma de fases considerando o fator clima. O respondente que atuou na Ponte sobre o Rio Cubal da Hanha, na Angola, discorre que “O planeamento (e também a concepção) da obra foi feito de forma a construir as fundações e os pilares no período do ano em que as chuvas são menos intensas, por forma a construir o tabuleiro na época das chuvas, em que o caudal do rio

era mais forte.” e o respondente que trabalhou em uma ponte localizada em Pretoria, na África do Sul, afirma que “Em áreas com alta pluviosidade e durante lançamentos no verão, construíamos um abrigo (cobertura) sobre a baía de lançamento”. Com isso, evidencia-se a importância de assegurar que o clima seja um fator crítico a ser considerado no planejamento.

4.1.2.4 MATERIAIS

De acordo com ambos os respondentes, não há desperdícios excessivos de materiais, mas podemos considerar que isso vai além de um projeto e planejamento bem estruturado, pois equipes de campo experientes, um gestor rigoroso e maquinários eficientes auxiliam na mitigação da perda de materiais. Ressalta-se que o MLI é um processo construtivo que visa eliminar os desperdícios e não se caracteriza por ter grandes estoques de materiais em estaleiro (Martins, 2009; Schmid, 2005; VSL International Ltd., 1977). Porém, como relatado anteriormente, existem avarias que surgem de formas indesejadas, como bicheiras, em que acabam sendo necessário materiais que não estavam previstos no orçamento inicial para restaurar os imprevistos, além do retrabalho já mencionado anteriormente.

4.1.2.5 LEAN

A aplicação das ferramentas LC não foi considerada em nenhuma das abordagens. Ao longo da pesquisa, notou-se que poucos profissionais dessa área possuem conhecimento a respeito do *Lean*, porém mesmo leigos no assunto aplicam indiretamente em sua prática real.

Então se faz necessário explicar que a filosofia *Lean* está ali para ajudar a mitigar desperdícios, mesmo que sejam mínimos na produção do MLI. Por mais que nenhum respondente relata a aplicação da *Lean* nos projetos analisados, nota-se muitas práticas observadas que se alinham com as ferramentas da *Lean*, como:

- Forte ênfase no planejamento;
- Controle de qualidade rigoroso e no desempenho do processo;
- Coordenação de equipa controlado.

4.1.2.6 DISCUSSÃO DE RESULTADOS COM BASE NAS RESPOSTAS DOS INQUÉRITOS

A sessão de encerramento foi introduzida a fim de perceber, através das experiências práticas dos respondentes com o MLI, quais mudanças implementariam se tivessem que pensar no planejamento de uma obra com este processo executivo hoje, e se havia alguma aprendizagem de obras passadas que poderia ser transformada em modelo padrão para obras futuras para o MLI.

Para a questão “O que você faria de diferente se tivessem que iniciar esse processo hoje? Existe alguma aprendizagem que poderia ser transformada em um modelo padrão para futuras obras com o lançamento incremental?” tivemos respostas diferentes, mas que atendem o que foi questionado. E um dos desafios que sugere o projetista para melhoria nas próximas obras é verificar a necessidade de criar melhores condições aos operários que trabalham assegurando a passagem das almofadas de Neoprene de forma correta entre o tabuleiro e os aparelhos de apoio,

que deve manter o contato adequado. Já o executor afirma que nas áreas de alta pluviosidade e durante lançamento no verão eram construídos abrigos nos estaleiros sobre a baía de lançamento, e que em uma obra construída em Lisoto, foi instalado um abrigo de caráter duplo, de modo que permitia a extensão do mesmo, caso necessário, e permitia a instalação de aquecedores durante o inverno para que fosse possível o controle de temperatura na área interna.

Além de tentar entender o ganho de experiência em cada obra, ainda no encerramento, tentou-se compreender qual era a sequência de atividades e a duração de cada etapa do processo construtivo do MLI para as diferentes obras. Com isso, têm-se uma base se o que está escrito na teoria está de acordo com a prática, sendo possível refinar o faseamento do processo construtivo para tornar de base em obras futuras. Adicionalmente, o projetista disponibilizou o projeto com o faseamento construtivo esquemático no qual trabalhou, assim foi possível realizar um comparativo entre a prática e teoria.

Diante disso, o MLI é um método de construção de pontes que os profissionais a cada obra que executam podem aprimorar suas técnicas para as demais obras. Na engenharia civil, nenhum produto é igual o outro, mas as técnicas de construção são sempre similares e sempre é possível melhorar. Isso relacionado ao *Lean*, se trata de melhoria contínua, *Kaizen*, que é a busca constante por pequenas melhorias nos processos para aumentar eficiência, qualidade e reduzir desperdícios (Pinto, 2012). A afirmação a seguir do projetista reflete este conceito *Kaizen*, “Em cada obra que se projeta e acompanha há sempre uma aprendizagem constante e compete aos Engenheiros a adoção de soluções que vão melhorando os projetos e processos em obra.”.

O Quadro 4 apresenta a síntese dos potenciais problemas identificados pelo autor, com base na análise da pesquisa exploratória realizada junto a profissionais com experiência no MLI, tanto na parte de projetos quanto na área de gerenciamento.

Quadro 4 - Problemas Identificados na Pesquisa Exploratória.

Aspecto	Problemas identificados
Planeamento rigoroso global do processo	Necessidade de planeamento detalhado antes da execução do lançamento incremental
Experiência Profissional	Necessidade de profissionais com experiência prévia no método
Reuniões	Reuniões semanais entre gestores e equipa de obra
Programas para controlo de obra	Utilização de software de planeamento (MS Project) para controlo do cronograma
Comunicação entre equipa de obra e equipa de projeto	Comunicação entre equipa de execução e projetista
Ciclos de lançamentos repetitivos	Execução do processo em ciclos sucessivos de aproximadamente 1 a 2 semanas
Linha de produção	Processo executado de forma sequencial e repetitiva
Fluxo de produção	Sequência contínua de execução dos segmentos
Controlo de qualidade do betão	Realização de ensaios e controlo da resistência do betão
Tempo de cura do betão	Necessidade de aguardar resistência adequada para pré-esforço
Bicheira	Falha identificada e corrigida durante o processo

Aspecto	Problemas identificados
Estaleiro de obra bem definido	Layout do estaleiro simples e eficiente
Macaco hidráulico - Escolha do instrumento	Escolha adequada dos equipamentos antes da execução
Macaco hidráulico - Constante monitoramento	Monitoramento constante das forças durante o lançamento
Macaco hidráulico - Fiscalização	Verificação das condições de funcionamento
Revisão técnica/Fiscalização	Avaliação técnica antes de cada lançamento
Inspeção visual	Inspeção com duração em cerca de 1 hora realizada por técnicos antes do avanço do tabuleiro
Mão de obra especializada	Necessidade de profissionais experientes no método
Clima	Influência da temperatura e condições climáticas na cura do betão
Restrição externa ao processo	Problemas logísticos ou operacionais externos
Aprimoramento de técnica	Aprendizado obtido em cada obra executada

Fonte: Autoria própria (2026).

4.1.3 SÍNTESE DOS PROBLEMAS IDENTIFICADOS

A seguir, no Quadro 5 é apresentada a síntese dos problemas identificados, tanto na revisão bibliográfica (Quadro 3) quanto na pesquisa exploratória (Quadro 4).

Para facilitar a compreensão, os problemas foram categorizados e distribuídos em diferentes dimensões do processo construtivo, entre: gestão, fluxo de trabalho, materiais, equipamentos e fatores externos. Demonstrando que as ineficiências no MLI não se concentram em uma única etapa, mas sim ao longo de todo o processo produtivo.

As ferramentas *Lean* selecionadas nesta dissertação foram conectadas aos problemas identificados, com o objetivo de assegurar uma aplicação direcionada à eliminação de desperdícios e à melhoria do desempenho do processo.

Quadro 5 - Síntese dos Problemas Identificados.

Índice	Aspecto	Problemas Identificados	Ferramentas Lean	Fonte de dados
A	Gestão	A1. Dificuldade na comunicação à distância entre equipa de execução e projetista durante o processo executivo	ES VM LPS	Pesquisa Exploratória
		A2. Aplicação informal de preceitos <i>lean</i> , devido falta de conhecimento na aplicação de indicadores e ferramentas	<i>Kaizen</i> LPS VSM	Pesquisa Exploratória
		A3. Fiscalização técnica realizada apenas por inspeção visual	LPS VM	Pesquisa Exploratória
		A4. Escassez de mão de obra especializada	<i>Kaizen</i> TPM	Pesquisa Exploratória
		A5. Necessidade de aprimoramento de técnicas, como erro de introdução do aparelho de apoio de Teflon no apoio deslizante	<i>Kaizen</i> TPM	Pesquisa Bibliográfica
		A6. Erro acumulado de detalhamento ou imprecisão executiva	JIT LPS VSM	Pesquisa Bibliográfica

Índice	Aspecto	Problemas Identificados	Ferramentas Lean	Fonte de dados
B	Fluxo de trabalho	B1. Execução do processo em ciclos sucessivos de aproximadamente 1 a 2 semanas, porém o primeiro segmento possui ciclo maior	<i>Takt-Time</i> LPS <i>Kaizen</i> VSM VM	Pesquisa Bibliográfica Pesquisa Exploratória
		B2. Condições desfavoráveis dos trabalhadores que estão juntos aos apoios nos pilares	<i>Kaizen</i>	Pesquisa Exploratória
C	Material	C1. Controlo de qualidade do betão	VSM JIT LPS VM <i>Kaizen</i>	Pesquisa Exploratória
		C2. Tempo de cura do betão		Pesquisa Bibliográfica Pesquisa Exploratória
		C3. Bicheira		Pesquisa Exploratória
D	Equipamento	D1. Falta de detalhamento dos aparelhos de apoio provisório	ES	Pesquisa Bibliográfica
		D2. Macaco hidráulico, necessidade de constante monitoramento durante o lançamento	TPM	Pesquisa Exploratória
E	Fator externo	E1. Influência da temperatura e condições climáticas durante todo o processo do MLI	LPS <i>Takt-Time</i>	Pesquisa Bibliográfica Pesquisa Exploratória
		E2. Desnívelamento entre apoios causados por recalque	TPM VM	Pesquisa Bibliográfica
		E3. Problemas logísticos ou operacionais externos	VSM LPS DE	Pesquisa Exploratória

Fonte: Autoria própria.

A síntese dos problemas identificados no Quadro 5 evidencia uma lacuna entre o referencial técnico exigido pelo MLI e os processos de gestão adotados na prática. Enquanto os desafios de engenharia, como o controlo de recalques e a precisão na instalação dos aparelhos de apoio, demandam elevado nível de especialização, observa-se que as principais ineficiências estão associadas à falta de integração entre planeamento, execução e controlo. Nesse contexto, as ferramentas da filosofia *Lean*, especialmente o LPS, a VM e o TPM, surgem como elementos estruturantes para a transformação do processo em um sistema mais estável, previsível e orientado ao controlo contínuo, reduzindo a dependência de práticas reativas.

Adicionalmente, a sensibilidade do método a fatores externos, como condições climáticas e variações de apoio, reforça a necessidade de adopção de um modelo de gestão mais robusto e antecipatório.

A introdução da VM associada ao TPM permite maior transparência das informações e monitoramento contínuo das variáveis críticas, como o desempenho dos macacos hidráulicos e o comportamento estrutural durante o lançamento. Dessa forma, torna-se possível manter a estabilidade do ritmo produtivo, *Takt-Time*, sem comprometer a segurança da operação.

Por fim, a correlação entre os problemas práticos observados na pesquisa exploratória e as diretrizes da literatura técnica reafirma que a otimização do sequenciamento executivo é o caminho para a viabilidade econômica do MLI. Embora o consumo de materiais seja

inerentemente maior nesse método, a aplicação rigorosa do JIT e a redução da curva de aprendizado nos primeiros segmentos são fundamentais para compensar esses custos. Essa reflexão demonstra que o sucesso da engenharia de pontes não depende apenas de materiais mais resistentes, mas de uma arquitetura de gestão que harmonize a complexidade do projeto com a simplicidade e a fluidez dos princípios *Lean*.

4.2 OTIMIZAÇÃO E CONTRIBUTOS PARA DESENVOLVIMENTO DO FRAMEWORK

Esta seção tem como objetivo propor soluções para os problemas identificados ao longo da pesquisa, a partir da aplicação das ferramentas LC. Com base na estruturação prévia das etapas construtivas do MLI, bem como na sistematização dos problemas segundo os índices A, B, C, D e E, apresentados anteriormente no Quadro 5, torna-se possível estabelecer uma abordagem organizada e direcionada para a sua resolução.

Dessa forma, para cada problema identificado, são apresentadas propostas de melhoria fundamentadas nas ferramentas selecionadas, buscando não apenas mitigar falhas pontuais, mas também promover a otimização do fluxo produtivo, a redução de desperdícios e o aumento da eficiência global do processo construtivo.

4.2.1 GESTÃO

A gestão está presente em todas as fases da construção: na fase pré-executiva concentra-se no planejamento e na antecipação de restrições; na executiva, no controle do fluxo produtivo; e na pós-executiva, na análise de resultados e promoção da melhoria contínua. Por conta deste fato, os problemas de gerenciamento identificados se tornam primordiais a serem solucionados previamente, como já listado: A1, A2, A3, A4, A5 e A6.

4.2.1.1 PLANEAMENTO GLOBAL DO LANÇAMENTO INCREMENTAL

O MLI, conforme já discutido ao longo deste trabalho, trata-se como um processo construtivo de pontes com forte natureza cíclica para construção e lançamento do tabuleiro, sendo dependente de um controle técnico bastante rigoroso para que não ocorra falhas durante sua execução, bem como de um projeto bem elaborado, que considera os mínimos detalhes no processo.

Com o objetivo de detalhar as diferentes fases, o conteúdo do processo construtivo pelo MLI e a fim de enxergar melhor a operação em um contexto global, a partir das pesquisas feitas tanto na revisão bibliográfica quanto na pesquisa exploratória, foi possível propor o faseamento das etapas construtivas do MLI, conforme apresentado na Figura 38. Utilizando os princípios do LPS e VM da LC, foi realizada a construção desse diagrama, permitindo uma melhor compreensão do processo global, evidenciando a sequência das atividades, suas inter-relações e os principais pontos de controle ao longo do ciclo, aspecto relacionado diretamente ao problema A1 e A2 identificado no Quadro 5.

A partir da apresentação e análise do diagrama na Figura 38, as etapas do MLI foram divididas e estruturadas em três fases principais: (i) Pré-Execução; (ii) Execução; e (iii) Pós-Execução. Tal organização demonstra que o método não está alinhado somente no lançamento sucessivo dos tramos, mas que há um conjunto integrado de atividades anteriores e posteriores que são essenciais para garantir a eficiência, a continuidade e o controle do processo construtivo.

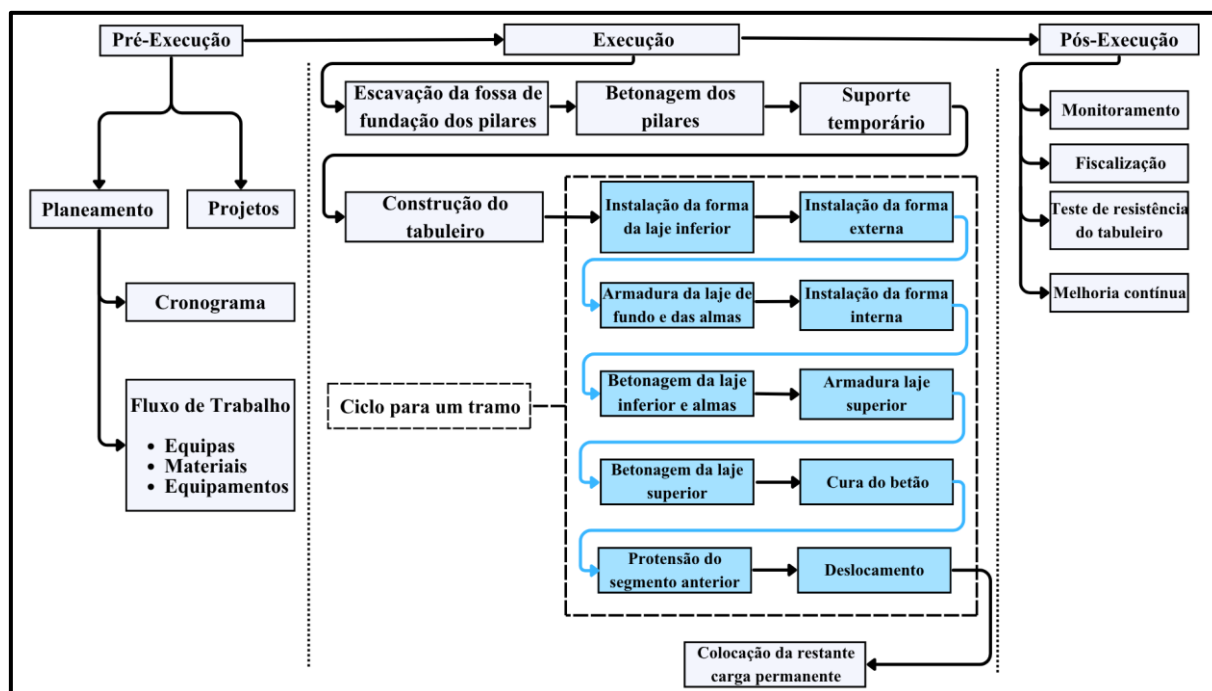


Figura 38 - Faseamento das Etapas Construtivas (LPS).

Fonte: Autoria própria.

O faseamento das etapas construtivas apresentado na Figura 38 evidencia a aplicação de uma das ferramentas mais utilizadas da LC, o LPS, ao facilitar a compreensão do MLI dentro do processo global. O elevado nível de detalhamento é crucial para a melhoria da comunicação entre projetistas, executores e operários, especialmente considerando que os projetistas nem sempre estão presentes em campo, estando este aspecto diretamente relacionado ao problema A1 identificado no Quadro 5. Neste contexto, o detalhamento minucioso tem como objetivo reduzir a dependência de interações diretas e constantes entre obra e escritório, permitindo que a equipa de campo execute o processo com maior autonomia, sem comprometer o alinhamento técnico necessário.

Ainda, como discutido anteriormente na seção 2.4.5.6 desta dissertação, o LPS, permite implementar uma análise mais pormenorizada do processo global, organizando as atividades em horizontes de curto prazo, geralmente semanais. -Essa característica está fortemente alinhada ao MLI, perante na execução de tramos sucessivos em ciclos geralmente semanais. Na prática, essa aplicação ocorre por meio da elaboração de planos de curto prazo (*Weekly Work Plan*), nos quais são definidas e acompanhadas semanalmente as atividades de cada ciclo de lançamento. Dessa forma, o LPS contribui para o adequado sequenciamento das atividades,

assegurando a continuidade do fluxo de trabalho, maximizando a utilização dos recursos e minimizando interrupções.

O conceito da VM, está fortemente atrelado ao LPS, de modo que todos os colaboradores possam compreender o funcionamento do processo por meio da visualização das informações, facilitando a assimilação das atividades e do fluxo produtivo, por meio da utilização de painéis visuais no estaleiro contendo o planejamento das atividades, restrições e indicadores de desempenho (Calvão, 2019; Esteves et al., 2015).

A seguir, é apresentada uma análise mais detalhada da estruturação do faseamento, com ênfase nas etapas de Pré-Execução, Execução e Pós-Execução, evidenciando como a organização das atividades e a aplicação de ferramentas LC contribuem para a estabilidade do fluxo produtivo e a redução de variabilidades no MLI.

4.2.1.1.1 Pré-Execução

A fase de Pré-Execução do MLI, conforme ilustrado no diagrama, é subdividida em duas etapas principais: planejamento e o desenvolvimento do projeto, ambas fundamentais para a adequada preparação e organização do processo construtivo.

O planejamento é essencial para a organização de todo o processo, devendo ser realizado de forma rigorosa e abrangente, considerando todos os pormenores, desde a elaboração do cronograma até à estruturação das atividades, seleção das ferramentas *Lean* de controlo a serem aplicadas e dos recursos envolvidos. Nesse contexto, inclui as equipas especializadas a serem escolhidas para cada etapa, a definição dos materiais a serem utilizados e a escolha adequada dos equipamentos, sendo de extrema importância que as equipas a trabalhar tenham nível adequado de especialização, a fim de evitar falhas operacionais, retrabalhos e custos adicionais (Arantes, 2008; Campos, 2017; Genestretti, 2018; Isatto et al., 2000). Embora a literatura como a de Schmid (2005), aponte que o MLI não exija, necessariamente, mão de obra altamente qualificada, a complexidade das operações envolvidas e a necessidade de precisão durante o processo justifica a adopção de equipas tecnicamente capacitadas. Nesse sentido, em resposta ao problema A4, aplica-se o princípio do *Kaizen*, com foco na capacitação contínua das equipas, considerada um de seus pilares fundamentais, incluindo treinamentos específicos por função, a busca de contratação de profissionais familiarizados com o método e incentivo à proatividade, resultando em maior eficiência e redução de falhas ao longo do processo (Briales & Ferraz, [s.d.]).

Adicionalmente, para uma elaboração mais detalhada do planejamento, deve-se considerar os fatores externos, como as condições climáticas e a sua influência no desenvolvimento das atividades, bem como a estimativa de tempo de execução de modo a garantir maior confiabilidade ao cronograma. Paralelamente, esta fase deve contemplar a definição das estratégias mais adequadas ao MLI, incluindo a adopção de soluções tecnológicas que promovam eficiência, a continuidade do fluxo produtivo e a redução de riscos ao longo da execução.

Diante disso Sánchez-Rivera et al. (2017), aponta que a integração entre o *Bridge Information Modeling* (BrIM) e os princípios LC potencializa os resultados da etapa de planificação, ao permitir a antecipação de problemas e restrições do processo. Tal capacidade,

aliada às ferramentas de visualização e gestão da informação do *Building Information Modeling* (BIM), contribui para um planeamento mais assertivo e orientado à redução de desperdícios.

É de suma importância que o projeto seja compatibilizado pensando no fluxo de trabalho a ser executado, devido ao MLI ser um processo construtivo de elevada agilidade, padronização e estaleiro compacto. Sobretudo ao se tratar da logística do estaleiro, na fase de Pré-Execução, é imprescindível sua otimização para que não haja desperdícios de tempo, material e equipa. Em subseção posterior será apresentada uma proposta de *layout* de estaleiro, a fim de servir como referência para futuras implementações. Durante a fase de projeto também deve-se considerar possíveis recalques não só nas estruturas e apoios, sendo necessário também estudos prévios a respeito do local ao qual será implementado o estaleiro para evitar recalques inesperados, como visto por Waimberg (2002).

Por fim, a colaboração do projetista na fase pré-executiva e a sua comunicação eficiente com executores é fundamental para a otimização da logística e manutenção de um adequado ritmo de produtividade ao longo de toda a produção evitando possíveis desperdícios. Neste contexto, em resposta ao problema A1, a aplicação da ES permite uma melhor relação desta otimização, visto que, tem como um de seus objetivos: Times multifuncionais atuando juntos, visando uma melhor comunicação e desenvolvimento do produto (Mariquito et al., 2016).

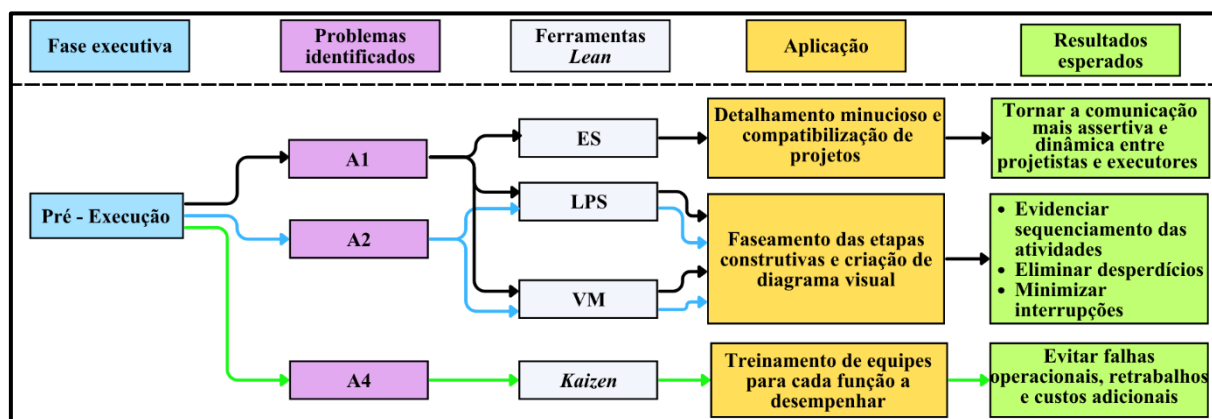


Figura 39 - Aplicação das ferramentas Lean para otimização na Pré-execução do MLI.

Fonte: Autoria própria.

4.2.1.1.2 Execução

A fase de Execução proposta é concebida como o momento mais ativo da produção, concentrando todas as atividades previamente estruturadas na etapa de Pré-execução, sendo dirigidas diretamente pelos executores. Nessa fase, o controlo técnico rigoroso torna-se indispensável para garantir a estabilidade do processo e a conformidade com os requisitos de projeto. Como discutido anteriormente, a colaboração do projetista juntamente com os executores é fundamental na otimização da logística e das estratégias de manutenção, contribuindo para a redução de desperdícios tanto na Pré-execução quanto ao longo da Execução.

Contudo, destaca-se o problema A5, relacionado à necessidade de aprimoramento das técnicas executivas, evidenciando por erros na introdução dos dispositivos de apoio deslizantes.

Embora esse problema possa estar associado ao A4, sua origem está predominantemente ligada à ausência de padronização dos procedimentos executivos. Neste sentido, em resposta ao problema A5, aplica-se o princípio do *Kaizen*, aliado à TPM, por meio da definição de procedimentos operacionais padronizados, elaboração de manuais de instrução e utilização de ferramentas VM no local de trabalho. A aplicação da TPM contribui ainda para a implementação de rotinas de verificação sistemática e controle das condições de execução, permitindo a identificação precoce de falhas durante a instalação dos dispositivos de apoio (Araújo, 2015). Como aplicação prática, recomenda-se a disponibilização de instruções visuais junto às frentes de serviço, especialmente durante a instalação dos dispositivos de apoio, de modo a orientar corretamente as equipes e reduzir a ocorrência de erros. Como resultado, espera-se a diminuição de falhas operacionais, retrabalhos e a padronização de serviço.

A instalação do estaleiro de obra é primordial para o adequado desenvolvimento da fase de execução do MLI, lembrando que, no desenvolvimento de pontes construídas por este método, caracteriza-se, com uma das principais vantagens, o estaleiro eficiente, concentrando toda a área de fabricação atrás do encontro (Schmid, 2005; VSL International Ltd., 1977). Neste contexto, a produção se dá início com a montagem apropriada do estaleiro, conforme planejado singularmente para cada obra. Dando ênfase ao fato que, a área de pré-fabricação do tabuleiro é disposta de forma alinhada ao eixo geométrico longitudinal da ponte, o qual define a direção de deslocamento do tabuleiro ao longo do processo de lançamento.

Em sequência, se dá início a escavação das fundações dos pilares, essa etapa influencia diretamente a segurança global da estrutura, uma vez que os pilares serão responsáveis por absorver tanto as cargas verticais quanto os esforços horizontais gerados durante o lançamento.

Após a preparação das fundações, procede-se à execução dos pilares em betão, que após conclusão, na fase de lançamento da superestrutura, devem resistir aos esforços horizontais adicionais gerados pelo atrito entre o tabuleiro e apoio, além de resistir as cargas definitivas.

Quando necessário, são instalados suportes intermediários temporários, com o objetivo de reduzir os esforços e deformações durante o lançamento. Esses apoios intermediários são fundamentais para limitar as flechas excessivas e garantir a estabilidade do tabuleiro durante o avanço.

A construção e lançamento do tabuleiro constituem a fase fundamental do MLI, estando diretamente associados ao *Weekly Work Plan* (WWP) do LPS, que será detalhada posteriormente na seção de fluxo de trabalho. Trata-se de uma etapa que será desenvolvida em plano de ciclos semanais repetitivos até sua conclusão, conforme a sequência já apresentada na Figura 38. Nessa fase, o erro acumulado de detalhamento e imprecisão executiva, como visto no índice A6 dos problemas identificados, tendem a se manifestar com maior intensidade, propagando-se progressivamente a cada novo lançamento e tornando sua correção cada vez mais complexa.

Dessa forma, torna-se essencial a adoção de um controle rigoroso e contínuo em todas as atividades envolvidas, de modo a garantir a precisão do processo e evitar a ampliação de desvios ao longo da execução, o qual pode ser implementado por meio da verificação sistemática das tolerâncias geométricas a cada ciclo de lançamento, com o auxílio de

instrumentos de medição como sensores e equipamentos a laser, permitindo a identificação precoce de inconsistência e contribuindo para a mitigação dos efeitos associados ao índice A6.

Adicionalmente, o acompanhamento deve ser integrado ao planejamento de curto prazo previsto no LPS, permitindo maior controle e previsibilidade das atividades ao longo dos ciclos produtivos. Nesse contexto, em resposta ao problema A2, recomenda-se a utilização estruturada do LPS, associada à definição de indicadores de desempenho, como o *Percent Plan Complete* (PPC), permitindo formalizar o controle das atividades e avaliar o grau de cumprimento do planejamento.

De acordo com Ballard (2000), o PPC é definido como a razão entre o número de atividades planejadas concluídas e o número total de atividades planejadas, expresso em percentagem. Para a sua implementação, é necessário dispor de cronogramas de projeto, como o LPS comentado, bem como, estratégias de execução, taxas orçamentais, entre outros elementos de controle. Ballard (2000) acrescenta que, dado um plano de qualidade, um PPC mais elevado corresponde à realização de mais trabalho correto com os recursos disponíveis, resultando em maior produtividade e progresso.

Em complemento, aliado a VM por meio de checklists previamente elaborados para cada etapa da obra. Essa abordagem permite maior padronização das inspeções, reduzindo a dependência exclusiva de avaliações visuais e aumentando a confiabilidade do processo, conforme visto no problema A3.

Após conclusão completa do lançamento sucessivo dos tramos, é inerente à colocação das restantes cargas permanentes, bem como, à execução da pavimentação e à instalação dos dispositivos de segurança da estrutura. Adicionalmente, nesta fase são realizados os ajustes finais de alinhamento e nivelamento do tabuleiro, assim como a eventual aplicação de pré-esforço complementar pós executiva. Esta etapa marca a transição do estado construtivo para a condição definitiva de serviço.

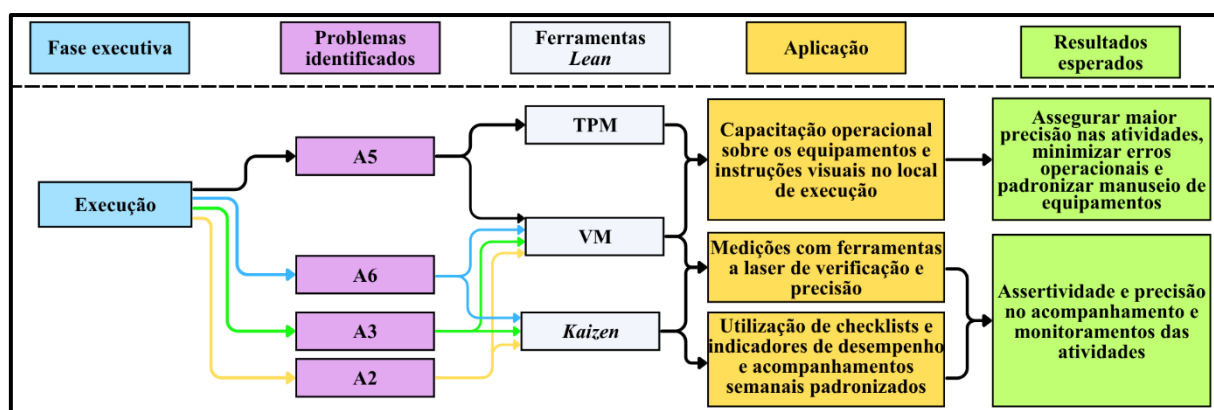


Figura 40 - Aplicação das ferramentas Lean para otimização na Execução do MLI.

Fonte: Autoria própria.

4.2.1.1.3 Pós-Execução

Para garantia de qualidade e eficácia do processo construtivo, após concluído a produção, o monitoramento da estrutura como um todo, assim como a fiscalização e o teste de resistência do tabuleiro, torna-se etapas indispensáveis para a verificação do desempenho

estrutural e da conformidade com os requisitos de projeto. Essas ações permitem identificar possíveis anomalias e assegurar o correto comportamento do tabuleiro após o lançamento.

Além disso, na fase pós-executiva, a melhoria contínua está idealizada para que as percepções e aprendizados da obra concluída possam ser aplicadas em obras futuras evitando erros e otimizando processos, princípio este diretamente relacionado ao *Kaizen*, promovendo o aperfeiçoamento progressivo dos processos e das equipas envolvidas (Kaizen Institute, [s.d.]). No que se refere ao problema identificado A2, a formalização desses aprendizados por meio da elaboração de um manual de práticas construtivas, contemplando procedimentos executivos, boas práticas identificadas e diretrizes operacionais é recomendado, permitindo consolidar os conhecimentos adquiridos durante a execução, promovendo maior padronização dos processos e contribuindo para sua aplicação estruturada em obras futuras.

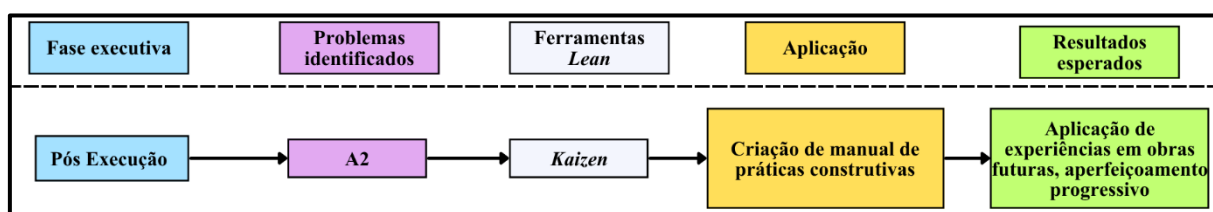


Figura 41 - Aplicação das ferramentas Lean para otimização na Pós-Execução do MLI.

Fonte: Autoria própria.

4.2.2 FLUXO DE TRABALHO

O fluxo de trabalho foi concebido pensando no passo a passo do MLI, elaborado a partir da construção dos tramos e do ritmo produtivo associado a cada atividade integrada a ele. Essa abordagem encontra diretamente alinhada dentro da fase de execução, conforme evidenciado na Figura 38. Neste contexto, o fluxo de trabalho corresponde ao índice B da síntese apresentada no Quadro 5, abrangendo os problemas B1 e B2.

4.2.2.1 CICLO DE CONSTRUÇÃO DO TABULEIRO

O presente capítulo detalhará de forma pormenorizada, o ciclo de construção do tabuleiro da superestrutura da ponte. Como já introduzido na seção 4.2.1.1.2, a construção e o lançamento do tabuleiro constituem a fase fundamental do MLI, estando diretamente associados ao WWP do LPS. Neste caso, o WWP tem como objetivo sequenciar as atividades no curto prazo, de modo a assegurar a continuidade do fluxo de trabalho, sendo planeado e atualizado semanalmente pelos *Last Planners*, responsáveis diretos pela execução das atividades em campo (Arantes, 2008; Campos, 2017; Genestretti, 2018; Isatto et al., 2000; Tavares, 2020).

O tabuleiro da superestrutura, quando executado por meio do MLI, apresenta um processo produtivo caracterizado pela repetição cíclica das atividades, permitindo a adoção de um ritmo de produção relativamente estável. Nesse sentido, observa-se a aplicação do conceito de *Takt-Time*, no qual a execução de cada tramo segue uma lógica temporal padronizada organizada em ciclos semanais.

Para melhor compreensão, a Figura 42 apresenta o sequenciamento das atividades associadas ao WWP para a construção de um tramo, evidenciando não apenas a ordem das

operações, mas também sua distribuição ao longo do tempo. A estrutura elaborada permite visualizar o fluxo produtivo contínuo do processo, no qual cada etapa depende diretamente da conclusão da anterior, reforçando a necessidade de um planejamento rigoroso e de um controle eficiente das atividades. Lembrando que, a partir da visualização de informações, têm-se uma melhor compreensão do funcionamento do processo facilitando a assimilação das atividades e do fluxo produtivo por parte dos colaboradores.

Nota-se que a estrutura apresentada foi projetada de modo a integrar um ciclo produtivo semanal, conforme usualmente observado no MLI. No entanto, ao relacionar esse comportamento com o problema B1 identificado no Quadro 5, verifica-se que o primeiro segmento apresenta um ciclo de execução maior aos demais (Schmid, 2005). Esse acréscimo de tempo no ciclo inicial pode estar associado a fatores como a adaptação das equipes ao processo construtivo, a necessidade de ajustes operacionais, a verificação e calibração dos equipamentos, bem como a consolidação das rotinas de trabalho. Nesse sentido, à medida que o processo evolui e as atividades passam a ser repetidas, tende a ter uma estabilização do ciclo produtivo, alinhando-se ao conceito de *Takt-Time* e permitindo maior previsibilidade, eficiência e controle do fluxo de trabalho ao longo dos tramos subsequentes.

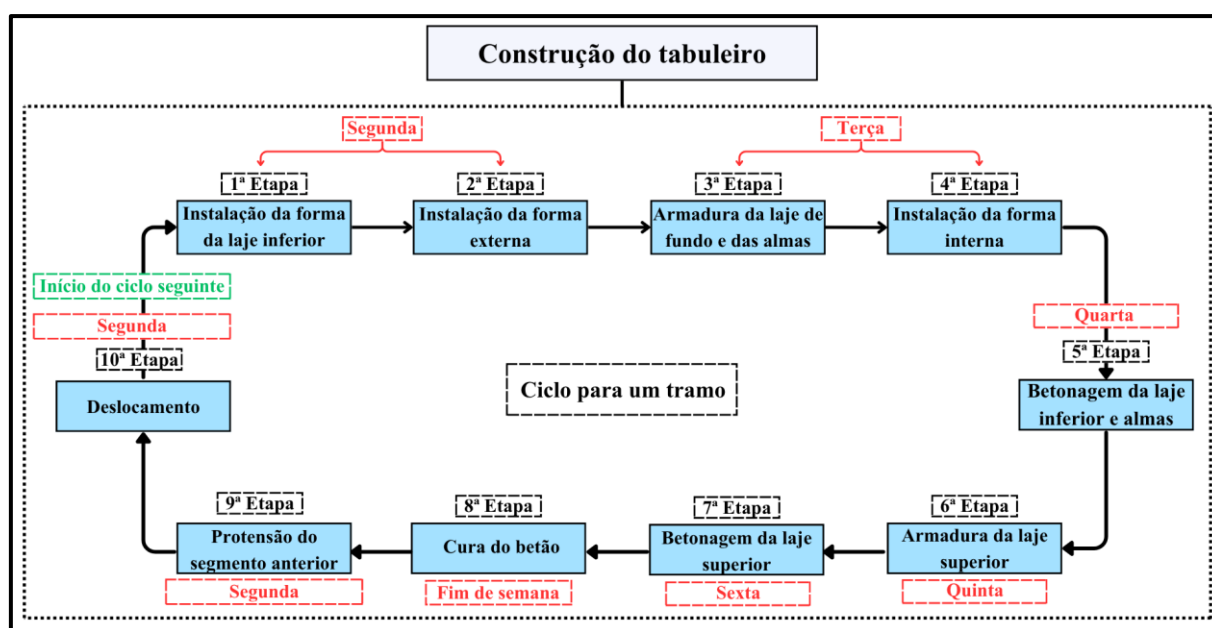


Figura 42 - Ciclo de Construção do Tabuleiro (VSM, VM e Takt-Time).

Fonte: Autoria própria.

Ainda no âmbito do problema B1, ressalta-se que, para o lançamento do primeiro tramo, é de extrema importância a consideração de que o nariz metálico também será executado paralelamente nesta etapa a qual nos ciclos seguintes não será repetido. A montagem desse dispositivo significa um acréscimo de tempo no primeiro ciclo, não sendo, portanto, representativa do ritmo produtivo dos tramos seguintes. Este fator deve ser inerente na fase de planejamento e, sobretudo, comunicado de forma clara pelo projetista aos executores, de modo a evitar interpretações equivocadas do ciclo produtivo e garantir maior precisão na definição do

ritmo de produção, especialmente no âmbito do planeamento de curto prazo, no qual essas variações devem ser incorporadas ao WWP.

A fim de solver o problema B1, propõe-se a aplicação da melhoria contínua, *Kaizen*, através do treinamento correto das equipas a atuarem diretamente no ciclo, promovendo a padronização das atividades e a redução de variabilidades operacionais. Paralelamente, a apresentação e exposição bem elaborada do WWP por parte dos gerentes aos operários, contribuindo para o alinhamento das equipas de execução, aumentando a confiabilidade do planeamento de curto prazo e reduzindo desvios durante o ciclo. Adicionalmente, a adoção de materiais e estratégias construtivas que contribuam para aceleração do método, como a seleção de empresas especializadas em cofragens, capazes de propor soluções mais eficientes e adaptadas às necessidades da obra, promovendo maior agilidade e facilidade de execução.

Como complemento, propõe-se ainda a utilização de protótipos ainda na fase pré-executiva, com o objetivo de validar procedimentos, antecipar dificuldades e reduzir incertezas na produção. Segundo Saffaro (2007), a prototipagem em contexto de incerteza moderada, contribui para a redução da variabilidade randômica, uma vez que tem como principal objetivo, propor soluções para cumprir um método padronizado existente. A autora acrescenta que os recursos necessários para à execução da tarefa, o controlo de qualidade na execução, o emprego de protótipos focados, a utilização prévia de outras prototipagens e o estabelecimento de relações de parcerias são requisitos fundamentais para a implementação da prototipagem.

Conforme a representação da Figura 42, o ciclo de construção do tabuleiro foi elaborado com base na interpretação da literatura (Martins, 2009; Moniz, 2018; Schmid, 2005), nos resultados da pesquisa exploratória e na análise a respeito do método desenvolvida nesta investigação, subsequentemente foram organizadas de forma a melhor percepção e compressão para implementação do método.

Estruturado em 10 etapas, o ciclo de construção do tabuleiro tem início com a etapa 1, correspondente à instalação da cofragem da laje inferior. Em sequência, a etapa 2 contempla a instalação da cofragem externa, sendo recomendado o início dessas atividades na segunda-feira.

Na terça-feira, após a conclusão das cofragens do tabuleiro, procede-se à etapa 3, referente à preparação das armaduras da laje inferior e das almas, sendo acompanhada pela etapa 4, correspondente à instalação da cofragem interna.

A quarta-feira é dedicada exclusivamente para à betonagem tanto da laje inferior quanto as almas da seção (etapa 5). Após a betonagem e o ganho inicial de resistência do betão, inicia-se, na quinta-feira, a etapa 6 relativa à preparação das armaduras da laje superior.

A sexta-feira é reservada para a Betonagem da laje superior (etapa 7), enquanto o fim de semana é destinado ao processo de cura do betão (etapa 8), assegurando o desenvolvimento da resistência necessária para dar sequência.

Na segunda-feira seguinte, realiza-se a etapa 9, correspondente à preparação da protensão de execução em conjunto com o segmento anterior, seguida da etapa 10, referente ao deslocamento do tabuleiro. Concluído o lançamento, o sistema é preparado para o reinício do ciclo.

No que se refere ao problema B2, relacionado às condições desfavoráveis enfrentadas pelos trabalhadores junto aos apoios nos pilares, observa-se que esse fator pode impactar

diretamente a produtividade e a segurança das operações durante a execução. Tais condições estão frequentemente associadas a restrições de espaço, dificuldades de acesso e exposição a situações operacionais desfavoráveis, o que pode comprometer o desempenho das atividades e aumentar a probabilidade de falhas.

Nesse contexto, a aplicação do princípio do *Kaizen*, mostra-se fundamental para a melhoria contínua das condições de trabalho, promovendo a adaptação dos métodos executivos. Como aplicação prática, destacam-se intervenções voltadas à organização do espaço de trabalho, otimizado das condições ergonômicas, redução de movimentação desnecessária, acessos provisórios mais bem posicionados e revisão dos procedimentos construtivos, visando facilitar a execução das atividades. Como resultado, espera-se a melhoria da eficiência operacional, o aumento da segurança dos trabalhadores e a maior estabilidade.

4.2.3 MATERIAL

Em relação a reparação de pontes em betão armado pré-esforçado, têm-se que as origens das falhas neste tipo de pontes ocorre na fase executiva com a inadequada utilização dos materiais de construção, na deficiência da fiscalização dos mesmos, na má execução dos trabalhos ou na combinação destes vários fatores (Ribeiro, 2007).

É de extrema importância a devida atenção relacionada aos materiais a serem implementados na construção no sentido de assegurar melhor o controlo de qualidade do betão para evitar patologias como bicheiras, problemas estes vistos na síntese em C1, C2 e C3. Os principais objetivos do controlo de qualidade do betão inclui: Garantir a integridade estrutural, reduzir a variabilidade, otimizar os custos e atender aos padrões da indústria.

Diante disso, o rastreamento das atividades deve ser realizado integrando as etapas de produção, transporte e controlo do betão, como visto na Figura 43 a seguir, com a ferramenta VSM em conjunto com os princípios do *Kaizen* para facilitar a visualização de melhorias em relação ao principal material. Adicionalmente, o fluxo evidencia princípios do JIT, dada a necessidade de sincronização rigorosa entre as etapas, em função da natureza perecível do betão.

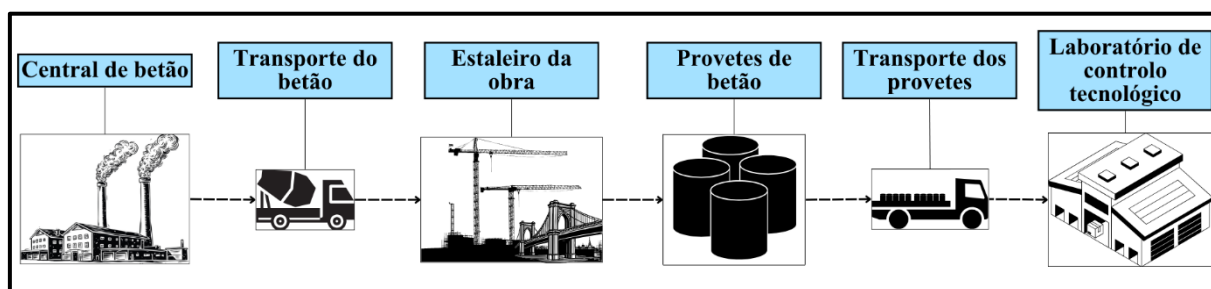


Figura 43 - Percurso da central de betão até laboratório de controlo tecnológico.

Fonte: Autoria própria.

O fluxo de controlo se inicia a partir da central de betão, responsável por garantir a qualidade dos suprimentos e dosagens corretas, conforme as especificações solicitadas com base em projeto. A central também é responsável pelo transporte adequado do material até o estaleiro da obra, cumprindo a duração estimada da mistura, cumprindo a proposta do JIT.

Após chegada do caminhão-betoneira ao estaleiro da obra, são realizados ensaios para aferição das propriedades do betão fresco, como o ensaio de abatimento (*slump test*), que confere a consistência e uniformidade. Em seguida, são feitas moldagens de provetes para análise da sua resistência mecânica, conforme estabelecido em projeto. Estes provetes são transportados para o laboratório de controlo tecnológico, o qual são armazenados por determinadas durações para ensaios de rompimento. A partir desses testes, é esperado que o material a ser utilizado se concentre o mais próximo do especificado na concepção (Helene, 1980).

Finalizada a betonagem, torna-se essencial a adopção de boas práticas para garantir um processo de cura adequado, considerando as condições climáticas locais. Aliado ao WWP, o planeamento semanal permite antecipar as condições climáticas, ajustando os períodos de Betonagem e deslocamento a evitar impactos negativos. Em períodos de verão, pode ser necessária a hidratação contínua do betão durante a cura, de modo a evitar a evaporação excessiva da água, aceleração da hidratação do cimento que comprometem a qualidade do betão fresco e endurecido de modo assegurar a continuidade das atividades subsequentes, mantendo o *Takt-Time* previsto (CIMPOR, 2020). Por outro lado, em condições de inverno, especialmente em regiões com temperaturas mais baixas, existe o risco de congelamento do betão, o que pode comprometer o desenvolvimento das suas propriedades mecânicas e a qualidade final da estrutura (Teixeira et al., 2020).

De modo a facilitar a conformidade técnica das atividades, por meio do VM, é feita à aplicação de checklists, como as Fichas de Verificação de Serviço (FVS) durante todo o fluxo de controlo apresentado na Figura 43, garantindo que cada atividade foi verificada e validada corretamente antes de se iniciar a próxima.

Nesse contexto, foi desenvolvido um checklist específico, estruturado com base nas etapas críticas que ocorrem para o lançamento do tabuleiro, como o fluxo de controlo do betão, contemplando verificações visuais, operacionais e de conformidade com as especificações do projeto, adaptado a partir de Ades (2015).

Devido à sua extensão, o checklist completo encontra-se apresentado no Apêndice B. Nele são apresentados atividades de inspeção e os métodos de verificação a serem tratados para o controlo de qualidade do betão, a fim de mitigar os problemas identificados C1, C2 e C3. O instrumento tem como objetivo padronizar as atividades, apoiar o controlo de qualidade e reduzir a ocorrência de falhas.

Como resultado, a aplicação do VSM no fluxo de controlo do betão permitiu uma melhor compreensão das interações entre as etapas de produção, transporte e verificação, evidenciando pontos críticos de variabilidade e desperdícios (Moraes, 2024; Motavallian & Settyvari, 2013). A integração com os princípios do *Kaizen* possibilita a melhoria contínua dessas atividades, enquanto o alinhamento com o JIT contribui para a sincronização do fornecimento e utilização do material, reduzindo perdas associadas à sua natureza perecível.

Adicionalmente, a utilização de ferramentas do VM, como a FVS, promove maior padronização, rastreabilidade e controlo da qualidade, mitigando falhas recorrentes e retrabalhos. Nesse contexto, o VSM demonstra-se como um instrumento eficaz de apoio à gestão do MLI, contribuindo para redução de desperdícios, otimização do tempo de ciclo (*Takt-*

Time) e diminuição de custos operacionais (Calvão, 2019; Esteves et al., 2015; Motavallian & Settyvari, 2013).

4.2.4 EQUIPAMENTO

Conforme evidenciado na literatura, o MLI envolve a utilização de vários equipamentos auxiliares para a construção da superestrutura da ponte, sendo os principais a serem considerados o nariz metálico, os macacos hidráulicos e os aparelhos de apoio (VSL International Ltd., 1977).

A partir da síntese dos problemas identificados, a respeito dos equipamentos relacionados ao índice D no Quadro 5, observa-se a falta de detalhamento dos aparelhos de apoio provisório (D1) e a necessidade do constante monitoramento dos macacos hidráulicos durante o lançamento (D2).

No que se refere ao problema D1, é fundamental que os apoios provisórios sejam considerados em todas as etapas pré-executivas, como na fase de detalhamento de projetos, na elaboração do planeamento estratégico e na realização de prototipagem como apresentada anteriormente. Quando a disposição dos apoios e a escolha ideal do material são levados em consideração na etapa de projeto a precisão dos resultados são ainda melhores. O detalhamento construtivo deve orientar a sequência de montagem dos apoios, o posicionamento exato no estaleiro, o sistema de guias laterais e a zona efetiva de contacto. Adicionalmente, deve contemplar a análise de estratégias já apresentadas antes para o estudo de apoios e as instruções executivas, em conformidade com o manual de obra mencionado na subseção 4.2.1.1.3 para evitar problemas relatado por Waimberg (2002), onde os apoios não tinham 100% de contato com as almas levando a ruptura no tabuleiro da ponte sobre a laje inferior.

Ainda correlacionando os princípios do ES, na etapa de planeamento estratégico, os desperdícios são drasticamente eliminados em relação a manutenção dos apoios provisórios e de outros aparelhos por conta do monitoramento constante, dos preparos prévios dos operários e da frequente aferição de calibração das máquinas. A prototipagem, a qual simula as reações entre apoio e tabuleiro, avalia o comportamento da estrutura previamente e as atividades a serem executadas no estaleiro, facilitando a tomada de decisão quanto ao *layout* mais adequado, enfatizando o fato de que o local de construção do tabuleiro tem que estar alinhado com os pilares e com o eixo de lançamento, de modo a favorecer o avanço seguro da estrutura por meio dos macacos hidráulicos.

Relativamente ao problema D2, os macacos hidráulicos devem ser previamente selecionados com base na obra em que ele atuará, frente as cargas e ações que enfrentará. Antes do início das atividades em obra, esses equipamentos devem ser calibrados, testados e inspecionados, de forma a reduzir a probabilidade de falhas durante o processo de lançamento.

A TPM é uma ferramenta utilizada visando a eficiência máxima dos equipamentos, baseada na capacitação dos operadores para execução de atividades de manutenção autônoma e monitorização contínua, sendo capaz de identificar os possíveis problemas nas máquinas, através de procedimentos de manutenções regulares. Diante disso, durante a execução, torna-se indispensável a monitorização contínua do macaco hidráulico, de modo a garantir o funcionamento sincronizado do sistema, a estabilidade do tabuleiro e a segurança da operação.

Nesse sentido, a aplicação de práticas associadas ao TPM mostra-se pertinente, ao reforçar inspeções sistemáticas, controlo preventivo, verificação de desempenho, padronização dos procedimentos de operação e manutenção programada dos macacos hidráulicos (Lean Production, [s.d.]).

As inspeções sistemáticas permitem antecipar supostas irregularidades, sendo algo mais objetivo e padronizado previamente a execução, enquanto o controlo preventivo é pensado para reduzir ocorrência de falhas e paragens não programadas, durante a execução.

A verificação de desempenho é realizada por um operário que estará à frente do serviço averiguando os valores operacionais necessários ao acompanhamento do processo, a partir da central de controlo localizada no estaleiro.

A manutenção programada dos macacos hidráulicos consiste em realizar inspeções periódicas do equipamento, por exemplo no final de cada ciclo, garantindo a sua disponibilidade e prolongando a vida útil.

4.2.5 FATORES EXTERNOS

Muito do que se diz sobre os fatores externos já foi abordado nesse capítulo, sendo tratados de forma paralela e implícita com outros problemas, como a influência da temperatura e das condições climáticas que corroboram a cura do betão e o planeamento global para a integração do método (E1). Além dos problemas logísticos ou operacionais externos (E3), ligados fortemente com entrega de material, visto por exemplo no VSM feito a partir do local de produção até a entrega do betão em obra. Adicionalmente, como problemas logísticos, o tempo ocioso entre atividades, característica das movimentações desnecessárias ou prolongadas que os operários realizam, pode ser combatido com o estudo de diferentes adaptações de *layout* do estaleiro, promovendo maior eficiência dos operários, reduzindo desperdícios de tempo realizados a partir do DE.

Para obter a maior eficiência e otimização do *layout* do estaleiro, proposta principal do DE, a Figura 44 foi esquematizada de acordo com as demonstrações feitas por Martins (2009) e Schmid (2005). Lembrando que cada obra tem suas características singulares, a Figura 44 tem o intuito de auxiliar no *layout* e facilitar a adaptação para eliminar desperdícios de movimentações de pessoas, equipamentos e materiais, como elencados na ferramenta DE.

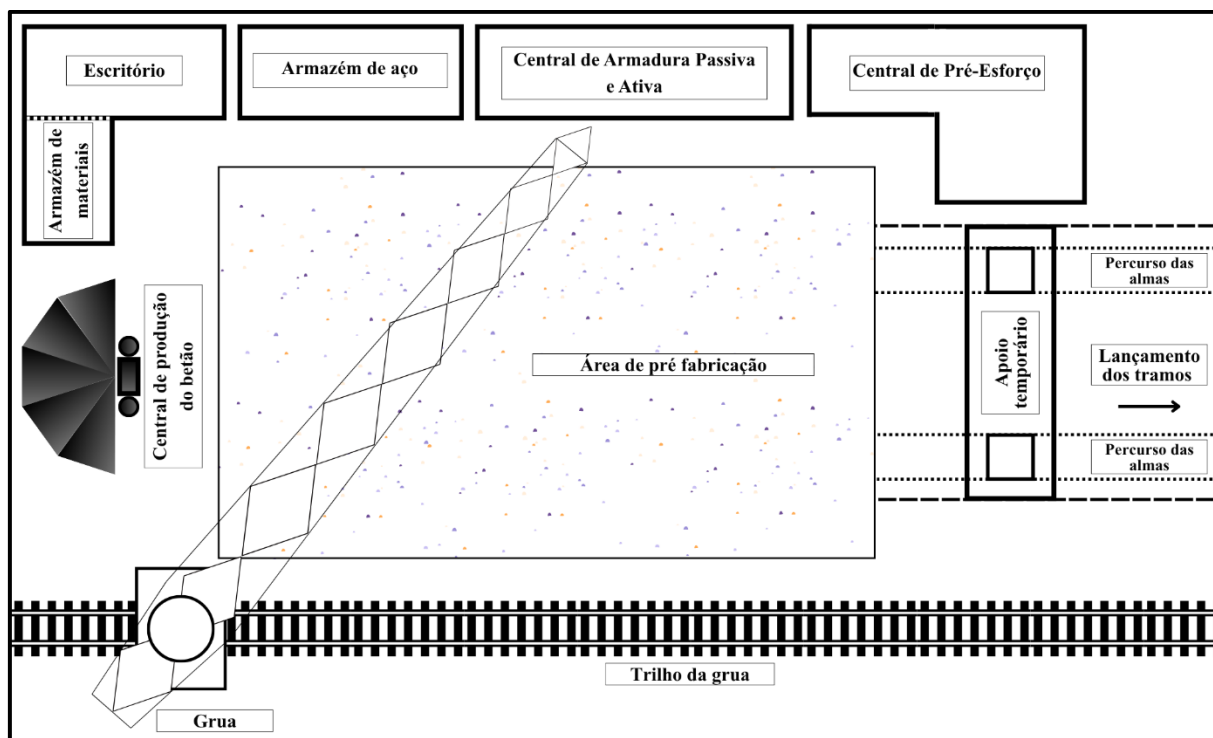


Figura 44 - Proposta de Layout eficiente para o MLI.
Fonte: Autoria própria.

A configuração do *layout* ilustrado é funcional e linear. Representado no canto superior esquerdo, têm-se o escritório da engenharia com visão total para obra, sítio destinado para controlo operacional e organizacional. Juntamente com o armazém de materiais a serem utilizados em todo o processo construtivo, locado estrategicamente próximo das centrais de Betão e de aço.

A central de Betão funciona como o núcleo operacional para Betonagem, servindo de ponto de descarga para os camiões, locação da bomba de lançamento e estação para o controlo tecnológico dos provetes de prova.

A logística interna é ditada pela grua sobre trilhos que alimenta a área de pré-fabricação central, transportando os elementos até a zona de montagem final. O alinhamento das linhas tracejadas na área de apoio temporário delimita a passagem das almas da seção, que concentram os esforços estruturais, devendo manter contato contínuo e preciso com os apoios provisórios e aparelhos de deslizamento para evitar problemas como já visto antes (D1).

Como comentado na subseção 4.1.1, variações de nível nos apoios durante a chegada do nariz metálico podem alterar significativamente a distribuição de esforços, reduzindo-os ou ampliando-os nos apoios adjacentes (E2). Além disso, recalques no estaleiro podem induzir rotações na estrutura, evidenciando a importância de considerar deformações do solo ainda na fase de projeto, em conexão com a abordagem vista para o índice A6, averiguando com o auxílio de instrumentos de medição como sensores e equipamentos a laser, permitindo a identificação precoce de inconsistência e contribuindo para a mitigação dos efeitos de recalque. Adicionalmente, a avaliação do solo preventiva para instalação do estaleiro e execução da obra, com o propósito de mitigar recalques indesejados.

4.2.6 CONVERGÊNCIA DAS TEMÁTICAS PARA DESENVOLVIMENTO DO FRAMEWORK

Com base nas informações dos subpontos 4.2.1 a 4.2.5, do Capítulo 4.2, o esquema da Figura 45, simplifica o modelo seguido no *Framework*, constando no Apêndice C a sua apresentação detalhada e elaborada com o objetivo de demonstrar, de forma mais clara e estruturada, as soluções propostas para a otimização dos problemas identificados na subseção 4.1.3, correlacionando cada grupo de problemas às respectivas ferramentas LC indicadas.

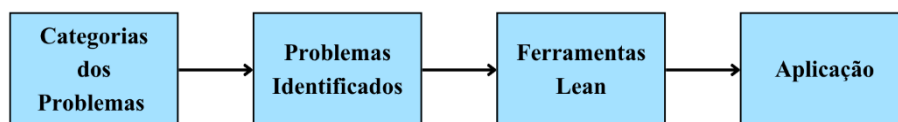


Figura 45 - Esquema simplificado de informações do *Framework*.

Fonte: Autoria própria.

O *Framework* proposto visa facilitar a compreensão integrada das estratégias de melhorias sugeridas, permitindo visualizar de maneira sistemática a relação entre os desafios identificados ao longo do processo construtivo do MLI e as abordagens LC recomendadas para sua mitigação.

No contexto da fase de pré-execução, ou seja, nos preparativos para o início das obras, a utilização do *Framework* como instrumento de apoio à tomada de decisão contribui para a identificação prévia de possíveis problemas, como os identificados ao longo desta pesquisa, que possam surgir durante o processo construtivo, permitindo a antecipação de estratégias voltadas à mitigação de falhas, assim como servirá de apoio as demais fases caso haja necessidade.

Dessa forma, o *Framework* constitui um instrumento de apoio à análise, validação e aplicação prática das soluções desenvolvidas, reforçando a proposta de otimização sob uma perspectiva técnica, organizacional e operacional.

4.3 VALIDAÇÃO DO FRAMEWORK

A etapa de validação foi proposta com o objetivo de aferir, junto a profissionais com experiência na área o potencial de aplicabilidade das soluções fundamentadas nas ferramentas LC apresentadas nesta dissertação.

4.3.1 QUESTIONÁRIO DE VALIDAÇÃO

Para esse fim, foi desenvolvido um questionário contendo questões alternativas, direcionadas à avaliação das propostas de otimização elaboradas para os problemas previamente sintetizados ao longo da pesquisa. O questionário de validação buscou manter a mesma estrutura metodológica utilizada ao longo desta investigação, assim, ao observar o Apêndice D, nota-se uma estruturação da qual o questionário foi idealizado em blocos, como, Gestão, Fluxo de Trabalho, Material, Equipamentos, Fatores Externos, Framework, além de duas questões complementares.

A formulação das questões buscou traduzir, de maneira assertiva, a relação entre os problemas identificados e as soluções sugeridas, permitindo aos respondentes avaliar sua

pertinência no contexto real de obra. Adicionalmente, cada questão foi complementada com um campo destinado à manifestação de opiniões dos respondentes, possibilitando não apenas a validação quantitativa das propostas, mas também a obtenção de contribuições qualitativas.

Com o intuito de validar de forma abrangente os principais diagramas, estratégias e soluções estruturadas no âmbito da investigação, os elementos centrais do *Framework* foram incorporados ao questionário de validação. Dessa forma, buscou-se verificar se as soluções propostas apresentam aderência prática, clareza metodológica e utilidade operacional sob a ótica de profissionais.

A seguir, no Quadro 6, é apresentada uma síntese correlacionando cada problema previamente sistematizado às respectivas questões formuladas no processo de validação, permitindo uma visão estruturada da abrangência e direcionamento da análise realizada.

Quadro 6 - Correlacionamento de Problemas e Questões

Índice	Problemas Identificados	Soluções	Questões
A	A1	Executar faseamento das etapas construtivas por meio do LPS (planeamento de longo prazo), aliado à VM com diagramas, painéis e indicadores, além da ES para compatibilização técnica antecipada entre projetistas e executores.	Q1 - Q2
	A2	Formalização das boas práticas por meio de manual de obras, padronização de processos, capacitação contínua, indicadores de desempenho (PPC) e VM.	Q4 - Q11
	A3	Integração entre LPS, PPC e VM, com acompanhamento sistemático do cronograma, indicadores de desempenho, checklists e padronização das inspeções para aumentar confiabilidade, rastreabilidade e controle executivo.	Q3
	A4	Aplicação de Kaizen, com capacitação contínua, treinamentos específicos, contratação de profissionais familiarizados com o método e incentivo à melhoria contínua.	Q4
	A5	Padronização de procedimentos, elaboração de manuais de instrução, Gestão Visual com ferramentas ilustrativas, capacitação contínua e aplicação de TPM para verificação sistemática e controle técnico das atividades críticas.	Q4
	A6	Fiscalização técnica reforçada por PPC + LPS + controle geométrico contínuo, sensores, laser, checklists e verificação sistemática das tolerâncias geométricas a cada ciclo.	Q5
B	B1	Aplicação integrada de <i>Takt-Time</i> + WWP + <i>Kaizen</i> + VM, planeamento semanal detalhado, capacitação contínua, empresas especializadas e prototipagem pré-executiva para estabilizar ciclos e reduzir variabilidades.	Q6 - Q7
	B2	Melhoria ergonômica, reorganização espacial, otimização de acessos, redução de movimentações desnecessárias e adaptação contínua dos métodos executivos (<i>Kaizen</i>).	Q8
C	C1	Aplicação de VSM + JIT + WWP + FVS, rastreamento completo do fluxo produtivo, sincronização entre etapas, ensaios técnicos e controle rigoroso da produção, transporte, lançamento e cura.	Q9
	C2	Planeamento semanal (WWP), antecipação climática, ajuste de períodos de betonagem, estratégias de cura controlada e controle contínuo das condições ambientais.	Q9
	C3	Aplicação de FVS, inspeções técnicas padronizadas, controle pós-betonagem e verificação executiva sistemática para identificação precoce de falhas.	Q9 - Q10

Índice	Problemas Identificados	Soluções	Questões
D	D1	Consideração integral na fase de projeto, planejamento estratégico, prototipagem, manual de obra, sequência executiva padronizada, posicionamento exato e monitorização contínua.	Q11
	D2	Seleção prévia adequada, calibração, testes, manutenção preventiva, capacitação dos operários e aplicação de TPM com inspeções sistemáticas e padronização operacional.	Q12
E	E1	Antecipação e adaptação por meio do WWP, ajustando cronogramas e operações conforme fatores climáticos.	Q9
	E2	Estudos de layout, DE, controlo logístico, reorganização do estaleiro e otimização de fluxos operacionais.	Q13
	E3	Integração entre controlo de materiais, WWP, layout otimizado, monitorização preventiva do solo, sensores, laser e estratégias logísticas para mitigação global dos impactos externos.	Q6 - Q9 - Q10 - Q13

Fonte: Autoria própria.

O questionário completo aplicado para validação se encontra no Apêndice D. Buscou-se a cada questão descrever de forma pormenorizada os problemas identificados, as soluções com base nas ferramentas LC e os resultados esperados.

Para facilitar a avaliação das questões de múltipla escolha presentes no questionário, foi utilizada uma escala do tipo Likert adaptada, de acordo com as 14 questões alternativas estruturadas, algumas podendo ter 4 alternativas e outras 5 alternativas de modo a permanecerem alinhadas em uma única direção da escala Likert, ou seja, as variações do menor ao maior valor devem representar um contínuo crescente (Da Costa Júnior et al., 2024), onde foram atribuídos três níveis de pontuação de 1 a 3, de acordo com o grau de concordância, adequação ou representatividade apresentado por cada opção, conforme demonstrado no Quadro 7.

Quadro 7 - Sistema de pontuação das questões alternativas.

Score	Alternativas			
3	Muito adequado. Adequado.	Concordo totalmente.	Representa plenamente.	Muito elevada. Elevada.
2	Parcialmente. Pouco adequado.	Concordo parcialmente. Discordo parcialmente.	Representa bem com pequenos ajustes. Representa parcialmente.	Moderada.
1	Inadequado.	Discordo totalmente.	Não representa adequadamente.	Muito reduzida. Reduzida.

Fonte: Autoria própria.

O Quadro 7 apresenta os modelos das alternativas utilizados nas questões de validação, bem como os seus respectivos valores numéricos atribuídos para realizar o cálculo da Média Score, correspondentes ao grau de aceitação das soluções propostas.

As alternativas classificadas com nota 3, são aquelas com características positivas e que apresenta boa aceitação, adequação ou forte concordância da proposta. As alternativas de nota 2 correspondem a respostas de aceitação moderada ou parcial, podendo ser necessário fazer

algum reajuste para maior eficácia ou adoção da prática. Por fim, as de nota 1 são aquelas que não foram aceitas ou consideraram inadequadas ao âmbito de aplicação.

Após atribuição das notas às alternativas de resposta, o questionário de validação foi distribuído para profissionais familiarizados com o método com o objetivo de validar as propostas de otimizações, através da possível aderência à prática profissional e da aplicabilidade das soluções propostas.

4.3.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.2.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA E DISCUSSÃO

Tal como ocorreu no envio da pesquisa exploratória, o envio do questionário de validação também apresentou limitações, como o contato direto com profissionais disponíveis, número reduzido de especialistas, a dispersão geográfica, escassez de tempo e baixa taxa de retorno. Ainda assim, foram recolhidas, ao todo, três respostas aos questionários de validação.

Através dos formulários validados e a conferência das notas atribuídas a cada alternativa de resposta, realizou-se o cálculo da média aritmética com base na quantidade de respostas assinaladas em cada opção do questionário de validação, permitindo determinar o nível médio de aceitação das soluções propostas para cada questão analisada, detalhado na Tabela 2 a seguir.

Apesar de as escalas Likert serem formalmente classificadas como ordinais, estudos demonstra que a utilização de médias e outras estatísticas paramétricas é adequada devido à robustez desses métodos (Norman, 2010).

A média foi utilizada apenas como indicador de tendência central para apoiar a interpretação do grau de aceitação das propostas.

Tabela 2 - Média das pontuações atribuídas às questões de validação

Índice	Questões	Respondente 1	Respondente 2	Respondente 3	Média Score	Desvio Padrão
A1	Q1	3	3	3	3,00	0,00
A1	Q2	3	3	3	3,00	0,00
A3	Q3	3	3	3	3,00	0,00
A2 - A4 - A5	Q4	3	3	3	3,00	0,00
A6	Q5	3	3	3	3,00	0,00
B1 - E3	Q6	2	3	3	2,67	0,58
B1	Q7	2	2	3	2,33	0,58
B2	Q8	2	3	3	2,67	0,58
C1 - C2 - C3 - E1 - E3	Q9	3	3	3	3,00	0,00
C3 - E3	Q10	3	3	3	3,00	0,00
A2 - D1	Q11	3	3	3	3,00	0,00
D2	Q12	2	3	3	2,67	0,58
E2 - E3	Q13	3	3	3	3,00	0,00
FRAMEWORK	Q14	2	2	3	2,33	0,58

Fonte: Autoria própria.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 2, observa-se uma elevada concordância entre os profissionais quanto à aplicabilidade das propostas desenvolvidas nesta investigação. Das 14 questões avaliadas, 12 apresentaram médias iguais ou superiores a 2,67, enquanto apenas 2 questões obtiveram média de 2,33. Nenhuma questão apresentou média inferior a 2,0, indicando que todas as propostas foram consideradas, no mínimo, adequadas pelos respondentes.

De forma mais específica, 9 questões obtiveram média 3, evidenciando concordância total entre os participantes. As restantes apresentaram média de 2,67 ou 2,33, demonstrando que, embora existam oportunidades de aperfeiçoamento em algumas propostas, a percepção geral dos profissionais permanece positiva quanto à sua aplicabilidade. A Figura 46 apresenta de forma gráfica, a distribuição das médias obtidas nas questões de validação.

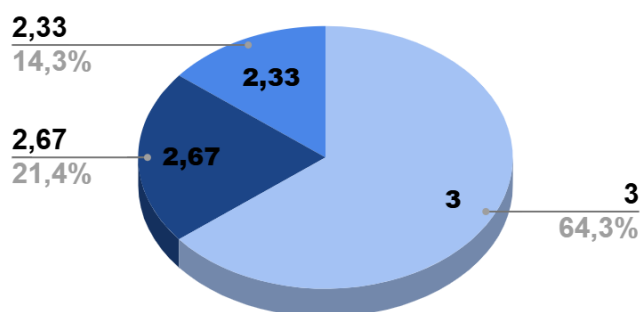


Figura 46 - Distribuição percentual das médias obtidas na validação de propostas
Fonte: Autoria própria.

Conforme ilustrado na Figura 46, verifica-se o predomínio de questões com média 3,00, correspondendo a 64,3% do total analisado, o que demonstra concordância unânime entre os respondentes quanto à relevância e aplicabilidade das propostas apresentadas. As médias de 2,67 representam 21,4% das questões e as médias de 2,33 correspondem aos restantes 14,3%, reforçando, ainda assim, a tendência geral de elevada aceitação. Embora estas últimas indiquem ainda uma concordância sobre a adoção na prática, também indicam a existência de oportunidades para melhorias, o que pode ser identificadas através dos comentários.

Nesse contexto, as questões 7 e 14 foram as únicas que apresentaram as menores médias obtidas de 2,33.

A Questão 7, refere-se à introdução do diagrama representativo do ciclo semanal para a construção do tabuleiro, baseado no WWP combinado com *Takt-Time*, com o objetivo de facilitar a compreensão do funcionamento do processo por meio da assimilação das atividades e do fluxo produtivo por parte dos colaboradores. O diagrama do ciclo construtivo do tabuleiro foi bem aceito e, conforme justificado pelos profissionais, representa adequadamente o ciclo produtivo, apresentando uma base teórica consistente sobre às práticas recomendadas. No entanto, os comentários indicam a possibilidade do aprimoramento por meio de um melhor refinamento operacional, como o reforço visual dos marcos de controlo, das restrições predecessoras, dos pontos de inspeção e das interfaces críticas entre equipas, equipamentos e

controlo geométrico. Além disso, é sugerido o acréscimo de maiores intervalos de segurança no planeamento de curto prazo, considerando fatores externos e imprevisibilidades operacionais, bem como a utilização complementar de quadros de restrições associadas ao WWP.

A Questão 14, corresponde à avaliação global do *Framework* proposto. O *Framework* é colocado como uma ótima ferramenta para organização do raciocínio técnico e apoiar a tomada de decisão por parte de engenheiros e gestores seniores. Contudo, os comentários indicam que sua eficácia pode ser ampliada com pequenos ajustes como reforçar a conexão entre cada problema, a ferramenta LC proposta, os indicadores de desempenho esperados e o responsável direto pela implementação. Observou-se ainda que, em sua forma atual, pode apresentar maior complexidade de compreensão para funcionários operacionais ou colaboradores com menor formação técnica.

Esses resultados sugerem que, embora ambas as propostas tenham sido consideradas relevantes e aplicáveis pelos profissionais, ajustes pontuais podem contribuir para aumentar sua aderência.

Ademais as respostas às questões alternativas de carácter obrigatório, observou-se também uma participação relevante por parte dos profissionais no preenchimento dos campos destinados a comentários e opiniões complementares, como visto nas Questões 7 e 14 abordadas. Embora tais campos possuíssem carácter opcional, verificou-se grande participação no preenchimento destes campos pelos profissionais, demonstrando elevado nível de envolvimento técnico, interesse prático e contribuição crítica. Esse comportamento reforça não apenas a relevância do tema abordado, mas também a disposição dos profissionais em contribuir ativamente para o aprimoramento das soluções propostas, destacando-se especialmente a importância da qualificação técnica das equipas, da experiência prévia dos profissionais envolvidos, do rigoroso controlo executivo e do detalhamento minucioso, tanto dos projetos quanto das estruturas temporárias.

Os comentários complementaram as respostas objetivas e forneceram percepções práticas adicionais, permitindo uma análise qualitativa mais aprofundada acerca da aplicabilidade das soluções propostas em cada bloco temático estruturado no questionário. Destacou-se a importância de comunicação eficiente entre escritório e obra, seja por meio de boa conexão de internet por fibra óptica ou satélite, facilitando reuniões frequentes, suporte visual e técnico.

Com relação a melhoria das condições operacionais, ergonômicas e de acessos nas zonas críticas que contribuem diretamente para a segurança, produtividade e qualidade de execução na prática do MLI, destaca-se que haverá situações que andam longe da perfeição, como limitações climáticas, variações de equipa e imprevistos operacionais. Portanto, tende-se reconhecer os limites e que a consciência de segurança em todas as condições deve ser o foco principal.

Um dos profissionais destaca que na construção de elementos estruturais, frequentemente há controlo de qualidade insuficiente quanto ao uso dos materiais, especialmente no que se refere às variações de *slump*, ganho de resistência, controlo térmico e compreensão técnica das propriedades do betão por parte das equipas envolvidas. O comentário

evidencia ainda falhas na disseminação do conhecimento técnico entre gestão e mão de obra, bem como limitações na interpretação de parâmetros fundamentais de controlo tecnológico. Dessa forma, o comentário evidencia que a adopção dos princípios da melhoria contínua se torna imprescindível no âmbito de fortalecer o profissional menos capacitado tecnicamente transformando-o mais adeptos a frente de trabalho.

Tal observação reforça que a aplicação integrada de VSM, o controlo de qualidade rigoroso e planeamento antecipado para garantir a qualidade do betão, reduzir desperdícios e mitigar falhas no processo são fatores essenciais para maior maximizar a eficiência do processo e minimizar os desperdícios. Paralelamente, a associação dessas estratégias com princípios de *Kaizen* evidencia a necessidade de capacitação contínua das equipas, por meio de treinamentos e cursos específicos.

Por fim, ambos destacam a importância que se deve ter com os equipamentos a serem utilizados durante o processo, no que se refere às estruturas temporárias e aos sistemas de lançamento. Os apoios temporários são de extrema importância e, por sua vez, tem de se dedicar muita atenção à forma como a equipa removerá os apoios temporários e instalará os apoios permanentes devido aos pesos dos elementos. Os macacos hidráulicos ao serem adotados todas as estratégias como critério rigoroso de seleção, calibração, manutenção preventiva e capacitação operacional reduz significativamente a probabilidade de falhas, desalinhamentos, sobrecargas e interrupções operacionais.

Com base nas análises realizadas, as propostas de otimização realizadas no âmbito desta investigação para o processo construtivo de pontes executadas pelo MLI, fundamentas nos princípios LC, evidenciaram, por parte das validações realizadas pelos profissionais, elevada aceitação em um retrospecto geral quanto à sua aplicabilidade, adopção e relevância prática. Mesmo as respostas enquadradas com uma menor média, ainda assim mantiveram caráter predominantemente positivo, sendo acompanhadas apenas de sugestões pontuais de aprimoramento voltadas ao refinamento e à maior eficiência da aplicação prática das propostas.

4.3.2.2 CONTRIBUTOS COM O ESTUDO E PRINCIPAIS IDEIAS

A análise dos resultados obtidos no processo de validação permite concluir que a presente investigação oferece contribuições relevantes para a compreensão e melhoria do processo construtivo de pontes executadas pelo MLI. Verificou-se uma elevada aceitação global das propostas apresentadas por parte dos especialistas consultados, o que demonstra que as soluções desenvolvidas possuem aplicabilidade prática e pertinência no contexto real de obra.

As principais contribuições e ideias decorrentes deste estudo podem ser estruturadas em três vertentes:

- O estudo realizou um diagnóstico robusto ao consolidar os problemas mais frequentes associados à execução de pontes por MLI. Esta análise abrangeu falhas críticas ao nível do planeamento integrado, da coordenação entre projeto e obra, do controlo geométrico rigoroso, da gestão logística de materiais, do controlo tecnológico do betão e das condições operacionais e de segurança no estaleiro.

- A investigação preenche uma lacuna na literatura ao integrar de forma explícita e estruturada as ferramentas da filosofia *Lean* ao MLI. Demonstrando como problemas concretos de obra encontram respostas diretas em ferramentas como o LPS, VSM, VM, TPM e *Kaizen*.
- Do ponto de vista prático, o *Framework* desenvolvido funciona como uma base metodológica e de gestão para engenheiros, diretores de obra e equipas de produção. Ao traduzir as dificuldades do contexto real de obra em oportunidades de otimização e diretrizes clara.

Em síntese, as principais ideias desta investigação apontam que o sucesso do lançamento incremental não depende exclusivamente do rigor do cálculo estrutural e dos equipamentos auxiliares, mas sim do planeamento integrado, da padronização de processos, da gestão visual e do foco na melhoria contínua. A validação empírica realizada confirma a utilidade prática do modelo e reforça a relevância do estudo no panorama da construção industrializada de pontes.

4.4 VALIDAÇÃO DOS OBJETIVOS

De modo a demonstrar o cumprimento dos objetivos desta investigação, o Quadro 8 sistematiza a correspondência entre cada objetivo específico e os respetivos contributos práticos e teóricos resultantes da dissertação.

Quadro 8 - Validação dos objetivos específicos da investigação.

Objetivos Específicos	Contributo das respostas para a validação
OE1: Detalhar as várias fases e conteúdo do processo construtivo de pontes pelo MLI.	Ao longo da investigação, foi possível detalhar muitas das fases e conteúdo do processo construtivo de pontes pelo MLI. Adicionalmente, com base na revisão bibliográfica e na pesquisa exploratória, utilizou-se o <i>Last Planner System</i> (LPS) para estruturar um diagrama de faseamento que ilustra as etapas de pré-execução, execução e pós-execução do MLI, sintetizando-as.
OE2: Desenvolver abordagem descritiva sobre vantagens, desvantagens e problemas nas diversas fases do processo construtivo de pontes realizadas pelo MLI.	Durante o referencial teórico foram abordadas vantagens e desvantagens do MLI, complementarmente, através da pesquisa exploratória, foi possível identificar problemas que acontecem em campo. Esses problemas foram sintetizados, analisados e solucionados ao longo da investigação.
OE3: Implementar soluções <i>LEAN</i> que visem mitigar os problemas encontrados nas diversas fases do processo construtivo, no sentido de otimizar as soluções levando a maior rentabilidade.	Com o intuito de otimizar as soluções verificadas no Quadro 6, foi construído o <i>Framework</i> que facilita a compreensão das soluções propostas e identificação de qual ferramenta <i>Lean Construction</i> (LC) utilizar para cada grupo de problemas. No decorrer do Capítulo 4, muitos das soluções <i>Lean</i> implementadas são contextualizadas em maior nível de detalhe.

Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÃO

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo apresentar soluções fundamentadas nos princípios *Lean Construction* (LC) para a otimização do processo construtivo de pontes executadas pelo Método de Lançamento Incremental (MLI), buscando ampliar e preencher a lacuna literária acerca desse tipo de construção no âmbito teórico e da sua prática em contexto real de obra, incentivando ainda mais a sua adoção por profissionais da área. Como objetivo específico, buscou-se detalhar as várias fases e conteúdo do processo construtivo de pontes pelo MLI, desenvolver abordagem descritiva sobre vantagens, desvantagens e problemas nas diversas fases do processo construtivo de pontes realizadas pelo MLI e, por fim, implementar soluções *Lean* que visem mitigar os problemas encontrados nas diversas fases do processo construtivo, no sentido de otimizar as soluções levando a maior rentabilidade.

Para alcançar os objetivos propostos, a investigação foi estruturada em fases sequenciais, contemplando revisão bibliográfica, pesquisa exploratória com profissionais familiarizados com o método, a identificação e síntese dos principais problemas associados ao MLI, tanto com base na revisão bibliográfica quanto na pesquisa exploratória. Posteriormente, realizou-se a seleção de ferramentas LC para desenvolver as propostas de otimização com base nos problemas identificado, seguida pelas propostas de soluções para otimização e desenvolvimento de *Framework*, e por fim, validação das propostas juntos a profissionais familiarizados com o método.

A sintetização dos problemas identificados, que serviu de alicerce para a elaboração e construção das propostas de otimização do processo construtivo fundamentadas na LC, foram organizados em Gestão, Fluxo de Trabalho, Material, Equipamentos e Fatores Externos. Sendo que para cada grupo de problemas que detém variados problemas, foram abordadas diferentes propostas de otimização com as ferramentas LC selecionadas. Para ressaltar esta abordagem, na seção 4.2.1.1.1, foi estruturado a partir da ferramenta *Last Planner System* (LPS) associada a *Visual Management* (VM), o diagrama de faseamento do MLI, visto na Figura 38, que mapeia a sequência de atividades e suas inter-dependências, de modo geral, considerando todas as etapas estabelecidas: Pré-execução; Execução; e Pós-Execução. Essa abordagem alinha-se com um dos objetivos específicos proposto.

É importante ressaltar que ao longo de toda a investigação foram abordadas descrições sobre as vantagens e desvantagens do MLI em conexão direta com um dos objetivos específicos.

A etapa de validação demonstrou uma elevada aceitação das propostas de otimização por parte dos profissionais participantes da pesquisa. Os resultados quantitativos indicaram avaliações predominantemente positivas quanto à aplicabilidade, relevância e potencial de adoção prática das soluções desenvolvidas. Paralelamente, a análise qualitativa das respostas permitiu complementar os dados objetivos, destacando a importância da qualificação técnica das equipas, da experiência prática, da comunicação eficiente, do controlo executivo e do planeamento detalhado ao longo das diferentes fases construtivas do método. Nota-se que

mesmo as respostas classificadas com menor nível de aceitação mantiveram um caráter essencialmente positivo, sendo acompanhadas apenas de sugestões pontuais de aprimoramento para garantir maior eficiência na aplicação prática das propostas no estaleiro.

Diante disso, considera-se que os objetivos estabelecidos para esta investigação foram plenamente atingidos, tanto no que se refere à compreensão detalhada do processo construtivo do MLI quanto na proposição de soluções *Lean* voltadas à sua otimização e maior rentabilidade. Como principal contribuição deste estudo, destaca-se a integração estruturada entre o MLI e os princípios da LC, permitindo não apenas a sistematização e o mapeamento dos problemas associados ao método, mas também a proposição de soluções direcionadas e fundamentadas para a melhoria contínua do processo construtivo em contexto real de obra. Adicionalmente, o estudo também está encaminhado a preencher a lacuna de conhecimento no âmbito do MLI, servindo como base para futuras investigações e para profissionais que pretendem ampliar o conhecimento a respeito do método construtivo e da filosofia *Lean*.

5.2 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Como limitações para realizar a investigação, destacam-se a escassez de referencial teórico a respeito do funcionamento do MLI na prática, assim como, a falta de estudos que implementam os fundamentos LC com relação ao método, de maneira geral a respeito das obras de arte especial como um todo. Além disso, durante a aplicação da pesquisa exploratória e do questionário de validação em que houve a procura por profissionais externos ao meio acadêmico, notou-se dificuldade de encontrar e contactar especialistas deste ramo de construção que pudessem colaborar com a identificação de desafios no contexto global real de obra. Somado a este contexto, quando encontrados e contatados os profissionais, na grande maioria dos casos não se obteve retorno de resposta.

Adicionalmente, o método ao apresentar profissionais experientes bastantes restritos e de quantia limitada, foi necessário ampliar ainda mais a procura para o contexto internacional, uma vez que, em âmbito nacional, a disponibilidade de respondentes revelou-se bastante limitada. A procura de profissionais estrangeiros gera entraves linguísticos, uma vez que exige a utilização de língua não materna e a adaptação de termos técnicos tanto na comunicação por e-mail quanto nos questionários de pesquisa exploratória e de validação. Dessa forma, a possível distinção entre terminologias técnicas utilizadas em diferentes países, aliada à limitação de fluência em outra língua, constitui uma dificuldade adicional no processo de contacto, interpretação e recolha de dados junto dos profissionais estrangeiros, que devem ser analisadas de forma minuciosa.

Devido ao número limitado de amostragem, acaba por dificultando uma análise efetiva.

5.3 RECOMENDAÇÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O MLI, ao longo da investigação, demonstrou ser um universo amplamente rico para estudos e aplicações práticas na construção de pontes. O método caracteriza-se por exigir elevado rigor técnico e detalhamento em todas as fases do processo, desde o “berço” até as boas práticas de execução em obra, requerendo profissionais de altíssimo nível em todas as etapas

do processo. Contudo, apesar da sua relevância e complexidade, ainda se faz necessário preencher uma lacuna literária significativa relacionada ao método.

Como recomendação para trabalhos futuros, visando contribuir para o preenchimento da lacuna existente na literatura, sugere-se os seguintes temas de investigação:

- Aplicação das propostas de otimização em obras reais executadas pelo MLI, com objetivo de avaliar na prática os impactos das ferramentas propostas nesta investigação;
- Expansão da aplicação das soluções de otimização propostas nesta investigação, ou de princípios semelhantes, para outros métodos construtivos de pontes, como os Avanços Sucessivos, Cimbra Autolanzável e Cimbramento tradicional;
- Ampliação do estudo para outras ferramentas LC, explorando diferentes abordagens de otimização;
- Desenvolvimento de investigações focadas em ferramentas específicas da LC, permitindo análises mais aprofundadas sobre a sua implementação e desempenho;
- Integração das ferramentas LC com tecnologias digitais, como BIM e BrIM;
- Desenvolvimento de estudos relacionados com o uso de prototipagem e ensaios aplicados a pontes executadas pelo MLI, especialmente no que se refere ao comportamento estrutural e aos apoios provisórios durante o lançamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ades, A. Z. (2015). *A importância do controle tecnológico na fase estrutural em obras de edificações* [Projeto de Graduação]. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Afonso, B. C. D. M. (2007). *Equipamentos Móveis para Execução de Pontes* [Dissertação de Mestrado]. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Almeida, I. dos A. (2016). *Segurança de Pontes na Fase Construtiva* [Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa]. <http://hdl.handle.net/10400.21/7121>
- Alvarez, R. dos R., & Antunes Jr., J. A. V. (2001). Takt-Time: Conceitos e Contextualização dentro do Sistema Toyota de Produção. *Gestão & Produção*, 8(1), 1–18.
- Arantes, P. C. F. G. (2008). *Lean Construction : filosofia e metodologias* [Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto]. <https://doi.org/10.34626/p51q-mr05>
- Araújo, P. J. M. de. (2015). *Lean Management - aplicação a uma pequena empresa de construção civil* [Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia Civil]. <http://hdl.handle.net/10400.21/6062>
- Armando Rito Engenharia. ([s.d.]-a). *Pontes sobre o Rio Kwanza na Cabala*. ARMANDO RITO ENGENHARIA. Recuperado 9 de março de 2026, de <https://www.arito.com.pt/projectos/ponte-sobre-o-rio-kwanza-na-cabala/>
- Armando Rito Engenharia. ([s.d.]-b). *Viaduto IX*. Recuperado <https://www.arito.com.pt/projectos/viaduto-ix/>
- Armando Rito Engenharia. (2009). *Ponte sobre o Rio Cubal da Hanhã*. ARMANDO RITO ENGENHARIA. <https://arito.com.pt/projectos/ponte-sobre-o-rio-cubal-da-hanha/>
- Ballard, H. G. (2000). *The Last Planner System of Production Control* [Doctorates, The University of Birmingham]. <http://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/4789>
- Baptista, M. A. da C. L. (1995). *Análise diferida de pontes construídas tramo a tramo com cimbres autoportantes e autolançáveis* [Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto]. <https://doi.org/10.34626/0rre-y664>
- Barbedo, N. M. B. M. (2013). *Processos de construção e dimensionamento de pontes atirantadas* [Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico do Porto]. <http://hdl.handle.net/10400.22/6226>
- Bastos, P. S. (2023). *Fundamentos do concreto armado*. Universidade Estadual Paulista.

- Bastos, P. S. (2025). *Fundamentos do concreto protendido*. Universidade Estadual Paulista.
- Bernardo, F. J. P. M. (1999). *Processo construtivo e análise diferida de pontes construídas por deslocamentos sucessivos* [Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto]. <https://doi.org/10.34626/mt6n-5r97>
- Briales, J. A., & Ferraz, F. T. ([s.d.]). *Melhoria contínua através do Kaizen*. Recuperado https://www.mccpconsultoria.com.br/wp-content/uploads/arquivos/downloads/01-artigo_melhoria_continua_kaizen.pdf
- Buckley, J. (2024, setembro 22). *Como a maior ponte do mundo mudou o mapa da Europa*. CNN Portugal. <https://cnnportugal.iol.pt/maior-ponte-do-mundo/viaduto-de-millau/como-a-maior-ponte-do-mundo-mudou-o-mapa-da-europa/20240922/66ec9b2bd34ea1acf26e8c44>
- Calvão, D. da C. L. (2019). *Aplicação de Metodologias Kaizen & TPM na Indústria de Transformação de Metal* [Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto]. <https://doi.org/10.34626/w90v-tq52>
- Campos, E. F. da S. (2017). *Construção Lean - Desenvolvimento de um Guia de Diagnóstico para Empresas Construtoras* [Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto]. <https://doi.org/10.34626/g3s7-ga51>
- CIMPOR. (2020). *Betão em tempo quente* (Vol. 22). https://www.cimpor.com/documents/20124/162648/2020_Conhecimento_Bet%C3%A3o+em+Tempo+Quente_TRIPTICO.pdf/46594c5e-afac-3a2b-fc16-df6f86bb71c1?t=1602587736131
- ConstruGomes. ([s.d.]-a). *Cimbres ao solo e porticado*. Recuperado 9 de março de 2026, de <https://construgomes.com/pt/solucoes-tecnologicas/cimbres-ao-solo-e-porticado>
- ConstruGomes. ([s.d.]-b). *Viaduto do Corgo*. Recuperado <https://www.construgomes.com/pt/projetos/viaduto-do-corgo>
- ConstruGomes. (2013). *Viaduto Rodoanel*. CONSTRUGOMES. <https://construgomes.com/pt/projetos/viaduto-rodoanel>
- Da Costa Júnior, J. F., Cabral, E. L. dos S., De Souza, R. C., Bezerra, D. de M. C., & E Silva, P. T. de F. (2024). Um estudo sobre o uso da escala de Likert na coleta de dados qualitativos e sua correlação com as ferramentas estatísticas. *CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES*, 17(1), 360–376. <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.1-021>
- Deguirmandjian, S. C. (2016). *Lean Healthcare: Aplicação do Diagrama de Espaguete em uma Unidade de Emergência* [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos]. <https://repositorio.ufscar.br/items/77d40f18-818a-4dd1-9fae-70ccbc21646a/full>

- Duarte, S. I. H. (2011). *Estudo do Lançamento Incremental de Tabuleiros de Pontes. Aplicação do método à construção do tabuleiro da nova ponte ferroviária sobre o Rio Sado, em Alcácer do Sal* [Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico]. <https://scholar.tecnico.ulisboa.pt/records/0eddJjKVSD-MnguogmSsMH8UEdC69exQL6gj>
- El Debs, M. K. (2021). *Pontes de concreto com ênfase na aplicação de elementos pré-moldados* (1ª). Oficina de Textos.
- El Debs, M. K., & Takeya, T. (2007). *Introdução às pontes de concreto: Texto provisório de apoio à disciplina SET-412*.
- Esteves, R. R., Fontana, B. R. B., Oliveira, P. T., & da Silva, G. M. (2015). Aplicação da Gestão Visual como Ferramenta de Auxílio para o Gerenciamento de Projetos de Arquitetura e Engenharia em uma Universidade Pública. *Revista de Gestão e Projetos*, 06(03), 71–83. <https://doi.org/10.5585/gep.v6i3.367>
- Faveri, F. de. (2013). *Identificação dos desperdícios de um serviço de emergência com a utilização da metodologia Lean Thinking* [Dissertação de Mestrado, Universidade do Vale do Rio dos Sinos]. <http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/4053>;
- Fellows, R., & Liu, A. (2015). *Research Methods for Construction* (4º ed). Wiley Blackwell.
- Ferraz, M. Â. C. (2001). *Um Modelo de análise para o estudo de pontes como estruturas evolutivas* [Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto]. <https://doi.org/10.34626/q4m7-1k54>
- Genestretti, B. (2018). *Lean Construction em Estaleiros* [Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto]. <http://hdl.handle.net/10400.22/14293>
- Grenho, L. F. S. (2009). *Last planner system e just-in-time na construção* [Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto]. <https://doi.org/10.34626/2bwj-wt10>
- Helene, P. R. L. (1981). *Controle de qualidade do concreto*. [Dissertação, Universidade de São Paulo]. <https://doi.org/10.11606/D.3.1981.tde-25072025-133805>
- Infraestruturas de Portugal. ([s.d.]). *Ponte Luiz I*. Recuperado 14 de agosto de 2025, de <https://servicos.infraestruturasdeportugal.pt/pt-pt/a-descobrir/obras-de-arte/ponte-luiz-i>
- Isatto, E. L., Formoso, C. T., Cesare, C. M. de, Hirota, E. H., & Alves, T. da C. L. (2000). *Lean construction: Diretrizes e ferramentas para o controle de perdas na construção civil* (1º ed). SEBRAE/RS.

- Jesus, J. J. C. de. (2013). *Caraterização geométrico-estrutural de pontes em arco de alvenaria na região de Bragança* [Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Bragança]. <http://hdl.handle.net/10198/9791>
- Kaizen Institute. ([s.d.]). *O que é KAIZEN™*. Kaizen Institute Portugal. Recuperado 2 de março de 2026, de <https://kaizen.com/pt/o-que-e-kaizen/>
- Koskela, L. (1992). *Application of the new production philosophy to construction*. Stanford University.
- LaViolette, M., Wipf, T., Lee, Y.-S., Bigelow, J., & Phares, B. (2007). *Bridge construction practices using incremental launching*.
- LCW Consult. ([s.d.]). *Ponte sobre o rio Águeda*. Recuperado <https://www.lcwconsult.com/portfolio/ponte-sobre-o-rio-agueda/>
- Lean Production. ([s.d.]). *TPM (Total Productive Maintenance)*. Lean Production. Recuperado <https://www.leanproduction.com/tpm/>
- Leite, D. N. M. de S. (2015). *Eficiência no processo construtivo - avaliação das perspectivas dos intervenientes na obra no âmbito dos conceitos da Lean Construction* [Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto]. <https://doi.org/10.34626/2xth-2c47>
- Lin, X. (2022). Construction processes and strategies of Millau Viaduct. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 2022, 86–92.
- Marinho, D. de V. (2012). *Métodos Construtivos de Pontes* [Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico do Porto]. <http://hdl.handle.net/10400.22/3254>
- Mariquito, J. V. M., Silva, L. de A. G., Proença, M. M., Porfírio, V. H. M., & Oliveira, P. W. S. de. (2016, setembro). Engenharia simultânea: Estudo de referencial teórico. *VIII Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe*. www.simprod.ufs.br
- Martin, J.-P., Servant, C., Cremer, J.-M., & Virlogeux, M. (2004). The design of the Millau Viaduct. *Concrete Structures: the Challenge of Creativity*, 1–23.
- Martins, O. M. L. P. (2009). *Modelo virtual de simulação visual da construção de pontes executadas por lançamento incremental* [Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico]. <https://scholar.tecnico.ulisboa.pt/records/2yuMYuXnHstxwD6sROgEFB35gIOjMiDFjNHk>
- Maubertec. (1979). *Passarela para pedestres sobre Ferrovia da FEPASA - Estação Presidente Altino*. <https://www.maubertec.com.br/portfolio/passarela-sobre-ferrovia-da-fepasa-estacao-presidente-altino-azevedo-travassos/>

- Moás, L. P. de G. L. (1994). *Análise do tabuleiro de pontes construídas pelo método dos avanços sucessivos* [Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto]. <https://doi.org/10.34626/4x2a-0707>
- Moniz, C. V. C. (2018). *Determinação de Armaduras Transversais em Almas de Vigas-caixão* [Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa]. <http://hdl.handle.net/10400.21/16918>
- Morais, E. P. (2024). *Aplicação de ferramentas da Lean Construction na gestão da qualidade* [Trabalho de Conclusão de Curso, Pontifícia Universidade Católica de Goiás]. <https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/handle/123456789/7866>
- Motavallian, S. M., & Settyvari, H. (2013). *Application of value stream mapping in product development* [Master Thesis, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY]. <http://hdl.handle.net/20.500.12380/177505>
- Mourão, C. A. M. do A. (2023). *O desafio Lean nas empresas de construção – Como atingir a excelência na maturidade e na implementação* [Dissertação de Doutorado, Universidade do Porto]. <https://doi.org/10.34626/azvp-t624>
- Norman, G. (2010). Likert scales, levels of measurement and the “laws” of statistics. *Advances in Health Sciences Education*, 15(5), 625–632. <https://doi.org/10.1007/s10459-010-9222-y>
- Nunes, D. de S. (2017). *Avaliação dos esforços de montagem dos cabos das pontes estaiadas*. [Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo]. <https://doi.org/10.11606/D.3.2017.tde-28032017-084527>
- Ohno, T. (1997). *O sistema Toyota de produção: Além da produção em larga escala*. Bookman.
- Oyamada, R. N. (2004). *Controle de flecha e adaptação por fluência em pontes construídas pelo método dos balanços sucessivos*. [Doutorado, Universidade de São Paulo]. <https://doi.org/10.11606/T.3.2004.tde-16102024-144419>
- Peres, A. C. R. e G. L. (2016). *O Método dos Avanços Sucessivos, desde a Fase de Projeto à Construção da Ponte* [Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia]. <http://hdl.handle.net/10362/34369>
- Pfeil, W. (1979). *Pontes em concreto armado*. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.
- Pinto, J. M. F. (2012). *Lean Construction : proposta de metodologia de avaliação de projetos de construção* [Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto]. <https://doi.org/10.34626/ncfs-ft03>

- Piqueras, V. Y. (2015, julho 23). *Puente sobre el río Caroní (Venezuela)*. El blog de Víctor Yepes. <https://victoryepes.blogs.upv.es/2015/07/23/puente-sobre-el-rio-caroni-venezuela/>
- Ribeiro, L. F. V. (2007). *Análise de custos ao longo do ciclo de vida de pontes ferroviárias* [Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho]. <https://hdl.handle.net/1822/7969>
- Rosignoli, M. (2014). *The Charming History of the Incremental Launching Method*. Rosignoli & Associates. <https://www.marcorosignoli.com/blogs/publications/the-charming-history-of-the-incremental-launching-method>
- RUFUS46. (2025). *Wildbichler Brücke von Norden, Kufstein*. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wildbichler_Bruecke_von_N_Kufstein-5.jpg
- Saffaro, F. A. (2007). *Uso da prototipagem para gestão do processo de produção da construção civil* [Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina]. <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/90049>
- Sánchez-Rivera, O. G., Galvis-Guerra, J. A., Porras-Díaz, H., Ardila-Chacón, Y. D., & Martínez-Martínez, C. A. (2017). BrIM 5D models and Lean Construction for planning work activities in reinforced concrete bridges. *Revista Facultad de Ingeniería*, 26(46), 39–50. <https://doi.org/10.19053/01211129.v26.n46.2017.7314>
- Santos, M. B. (2015). *Utilização de concreto protendido em pavimentos portuários* [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande (FURG)]. <https://repositorio.furg.br/handle/123456789/12565>
- Saramago, R. de C. P. (2011). *Ensino de estruturas nas escolas de arquitetura do Brasil* [Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo]. <https://doi.org/10.11606/D.18.2011.tde-31052011-101630>
- Schmid, M. T. (2005). *A construção e o lançamento de pontes pelo processo dos segmentos empurrados* (3º ed). Rudloff Industrial.
- Seabra, R. T. P. dos S. B. de. (2014). *O Método de Lançamento Incremental. Conceitos Base e uma Aplicação Prática* [Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Politécnico do Porto]. <http://hdl.handle.net/10400.22/6528>
- Silva, A. M. da. (2015). *Metodologia da Pesquisa* (2º ed). EDUECE (Editora da Universidade Estadual do Ceará). www.uece.br
- Silva, P. J. L. e. (2005). *As ferramentas de E-learning no ensino de pontes* [Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho]. <https://hdl.handle.net/1822/7137>

- Spínola, I. K. V. (2020). *Dimensionamento de uma Ponte Pedonal na Avenida Sá Carneiro para acesso ao Campus do IPB* [Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Bragança]. <http://hdl.handle.net/10198/23203>
- Steinman, D. B., & Watson, S. R. (1941). *Bridges and Their Builders*. G. P. Putnam's Sons. https://archive.org/details/bwb_T3-BAA-575/page/n15/mode/2up
- Tavares, P. R. F. (2020). *Ferramentas de apoio à implementação Lean Construction em projetos* [Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Bragança]. <http://hdl.handle.net/10198/22991>
- Teixeira Duarte Construção. ([s.d.]-a). *Montagem dos Viadutos de S. Sebastião na Rodovia A10 com Lançamento por Avanço Incremental*. Recuperado <https://teixeiraduarteconstrucao.com/projetos/montagem-dos-viadutos-de-s-sebastiao-na-rodovia-a10-com-lancamento-por-avanco-incremental/>
- Teixeira Duarte Construção. ([s.d.]-b). *Montagem dos Viadutos sobre o Rio Sousa II – Lançamento por Avanço Incremental*. Recuperado <https://teixeiraduarteconstrucao.com/projetos/montagem-dos-viadutos-sobre-o-rio-sousa-ii-lancamento-por-avanco-incremental-2/>
- Teixeira, G. R. W., Ibrahim, L. B., Balestra, C. E. T., & Savaris, G. (2020). RESISTÊNCIA DO CONCRETO CURADO EM BAIXA TEMPERATURA. *REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, 16(1), 36–45. <https://doi.org/10.5216/reec.v16i1.49877>
- Teixeira, M. A. da S. (2015). *Desenvolvimento e exploração de aplicação para dimensionamento expedito de tabuleiros de viadutos* [Dissertação de Mestrado]. <http://www.fe.up.pt>
- TEKHTON ENGENHARIA. ([s.d.]). *Viaduto Millau: a ponte mais alta do mundo*. TEKHTON ENGENHARIA. Recuperado 12 de março de 2026, de <https://tekhton.com.br/viaduto-millau/>
- Turismo Roma. ([s.d.]). *Ponte Sublicio*. Turismo Roma. Recuperado 17 de março de 2026, de <https://turismoroma.it/en/places/ponte-sublicio>
- Veletzos, M. J. (2007). *The Seismic Response of Precast Segmental Bridge Superstructures with Bonded Tendons* [PhD Thesis]. University of California, San Diego.
- VSL International Ltd. (1977). *The Incremental Launching Method in Prestressed Concrete Bridge Construction*.
- Waimberg, M. (2002). *O método de lançamentos progressivos para a execução de pontes em concreto protendido*. [Mestrado, Universidade de São Paulo]. <https://doi.org/10.11606/D.3.2002.tde-03042025-080725>

Whitney, C. S. (1929). *Bridges: A study in their art, science and evolution* (C. S. Whitney, Org.). William Edwin Rudge.

Womack, J. P., & Jones, D. T. (1997). Lean Thinking—Banish Waste and Create Wealth in your Corporation. *Journal of the Operational Research Society*, 48(11), 1148–1148. <https://doi.org/10.1038/sj.jors.2600967>

APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO DA PESQUISA EXPLORATÓRIA

O Método de Lançamento Incremental de Pontes: Abordagem com soluções *Lean* na Otimização do Processo Construtivo

João Paulo Viana Duarte

Mestrando de Engenharia Civil – IPB/UTFPR

Email: jpx.anaiv@gmail.com

Número: +351 920 778 757 / **WhatsApp:** +55 (11) 9 5319 6711

LinkedIn: www.linkedin.com/in/joão-viana-463aa51a7

O **Método do Lançamento Incremental** (em inglês: *Incremental Launching Method*), também conhecido como Empurramento Sucessivo ou Deslocamento Sucessivo, é uma técnica construtiva utilizada em pontes e viadutos na qual a superestrutura é executada em segmentos sucessivos em um dos encontros do vale, geralmente a partir do estaleiro (em PT – BR: canteiro) de lançamento. Após a execução de cada segmento, o tabuleiro é deslocado longitudinalmente (empurrado) de forma progressiva até atingir a sua posição final, através da ação cíclica de macacos hidráulicos.

A *Lean Construction* é uma abordagem de gestão da produção aplicada à construção civil que tem como objetivo a redução de desperdícios, a melhoria do fluxo de trabalho e o aumento da produtividade nos processos construtivos. A sua aplicação procura otimizar o planeamento (em PT – BR: planejamento), a logística e a execução das obras, contribuindo para um melhor desempenho global do processo.

Perguntas:

Obs.: Caso o profissional tenha trabalhado ou investigado mais de uma obra, considerar aquela de maior relevância para o conhecimento.

Função principal (ex: Projetista / Executor / Docente (Investigador) / Outro):

Experiência prévia com o método do lançamento incremental (ex: número de obras, função exercida, tempo de experiência, tipo de participação no processo ou apenas acompanhamento da obra):

Local da obra (Cidade / País):

Tipo de estrutura (Ponte, Viaduto, Ferrovia etc.):

Material estrutural predominante:

Ano de execução da obra:

Função exercida pelo respondente na obra:

Planeamento e gestão

1. Como foi estruturado o planeamento do lançamento incremental ao longo da obra? (ex: ciclo bem definidos, ajustes ao longo da execução, planeamento inicial pouco detalhado)
2. Como as informações de progresso da obra chegam aos gestores? (Reuniões diárias, quadros de aviso, softwares)?
3. Quais ferramentas de gestão e controle foram utilizadas no estaleiro ou na obra (ex: cronogramas, reuniões diárias, indicadores, Microsoft Project, diagrama de Gantt, entre outros)?
4. Como eram indicados os atrasos na obra, e quais medidas eram normalmente adotadas para recuperar o tempo perdido?

Execução do ciclo

5. No ciclo de Lançamento (Execução do segmento > Cura > Protensão > Deslocamento), qual etapa costuma ser a etapa crítica, gerando tempo de espera para a mão de obra? (Gestão de Fluxo e Esperas)
6. Como o Layout do estaleiro impacta a produtividade? Houve necessidade de movimentações excessivas de materiais que poderiam ter sido evitadas? (Logística e Movimentações)
7. Ocorrem paragens frequentes por falhas nos macacos hidráulicos ou sistemas de lançamento? Como é feita a manutenção preventiva para evitar a interrupção do ciclo? (Equipamentos)
8. Como é feita a revisão técnica e/ou fiscalização antes de cada deslocamento do tabuleiro?
9. É comum haver excesso de trabalhadores em uma etapa (ex: armação) enquanto outros aguardam a cura do betão (em PT – BR: concreto)?
10. Que tipo de falhas são mais relevantes na etapa de deslocamento e que ações preventivas/corretivas são adotadas para as mitigar?

Problemas, atrasos, condicionantes e desperdícios

11. Quais foram os principais desafios técnicos ou operacionais enfrentados durante o lançamento incremental?
12. Durante o processo de lançamento, quais condicionantes e desperdícios foram observados e contribuíram para atrasos ou ineficiências no processo?
 - ☐ Falta de materiais
 - ☐ Planeamento inadequado
 - ☐ Ensaios necessários / tempo de espera por resultados
 - ☐ Avarias ou falhas nos macacos hidráulicos / sistema de lançamento
 - ☐ Inexperiência da equipa
 - ☐ Restrições externas ao processo (Acessos, logísticas, interferências, frentes não liberadas)
 - ☐ Condições climatéricas adversas
 - ☐ Controlo pela fiscalização (inspeção, verificação e liberações)
 - ☐ Validação/aprovação do projetista
 - ☐ Equipamentos parados
 - ☐ Mão de obra parada
 - ☐ Retrabalhos
 - ☐ Excesso de movimentações / transportes
 - ☐ Superprodução (Execução antes do momento necessário)
 - ☐ Sobreprocessamento (Fazer mais do que o necessário)
 - ☐ Outras:
13. Durante o ciclo de execução de um segmento, quais as 3 principais causas que impedem o lançamento de ocorrer na data prevista?
14. Os esforços dos macacos hidráulicos foram monitorizados durante o lançamento? Que impactos foram observados na estrutura e/ou no terreno e como foram mitigados?

Materiais

15. Quais são as principais fontes de perda de materiais (ex: sobras de cabos de protensão, betão excedente, desgaste prematuro de aparelhos de apoio deslizante)? (Desperdícios de material)
16. Que tipos de ensaios e verificações de controlo de qualidade são realizados para garantir a conformidade dos materiais e a segurança do lançamento ao longo do ciclo de execução/lançamento (ex: betão, protensão, dispositivos de deslizamento e guiamento)?

Lean

17. Houve aplicação de conceitos ou práticas relacionadas ao Lean Construction ou produção enxuta nesta obra? Se sim, quais as práticas interligadas?
18. Na sua percepção, a aplicação dessas práticas contribui de alguma forma para o desempenho e melhoria do lançamento incremental? Como?

Encerramento

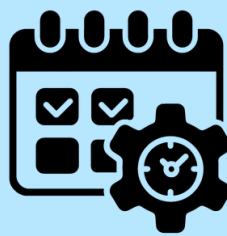
19. O que você faria de diferente se tivessem que iniciar esse processo hoje? Existe alguma aprendizagem que poderia ser transformada em um modelo padrão para futuras obras com o lançamento incremental?
20. Seria possível compartilhar, ainda que de forma resumida, as atividades sequenciais realizadas na construção pelo lançamento incremental de pontes? (exemplos: implantação do estaleiro – execução da infraestrutura e fundações – montagem do parque de lançamento – execução do tabuleiro – protensão – avanço do tabuleiro)
21. Seria possível indicar, ainda que de forma aproximada, o tempo médio de duração de cada etapa do processo de lançamento incremental, assim como suas características (ex: material, comprimento e peso)?

APÊNDICE B – FICHA DE VERIFICAÇÃO DE SERVIÇO (FVS)

	Ficha de Verificação de Serviço - (FVS)			Obra:					
Identificação do Tabuleiro:				Controlo de qualidade pré-lançamento de betão					
				Segunda-Feira	Terça-Feira	Quarta-Feira	Quinta-Feira	Sexta-Feira	Fim de Semana
Atividades de inspeção		Método de verificação	Observações						
Etapa	Condições necessárias para o início dos serviços	Visual. As fôrmas devem estar executadas, limpas e conferidas.							
	Verificação das guias de referência	Verificar o nível de acordo com o plano de betonagem							
	Lançamento, vibração, sarrafeamento e acabamento do betão	Visual. Acompanhar para que não forme grande acúmulo de betão em pontos isolados, para que não ocorra segregação e deslocamento da ferragem e outros elementos. Verificar o acabamento.							
	Acompanhamento da laje e das almas	Visual. Verificar se há pelo menos um profissional junto ao tabuleiro, para verificação de qualquer deformação nas cofragens e escoramentos.							
	Controlo de betão	Mapeamento da betonagem. Identificar as áreas betonadas por cada camião em planta reduzida							
	Conferência do nível do tabuleiro	Mapeamento através de nível a laser. No primeiro dia após a betonagem, antes da execução de protensão e deslocamentos.							
	Verificação da amarração e do recobrimento das armaduras	Verificar se a amarração está firme e se as peças não estão em contacto com as formas.							
	Posicionamento	Conferir todas as armaduras de todas as peças estruturais com base no projeto							
	Checagem da armadura negativa	Visual. Após a montagem da armadura, verificar se os negativos estão posicionadas e fixados na altura e nos locais corretos, com base no projeto							
	Cura do betão	Visual. Verificar se a mesma está sendo realizada por um período pré estabelecido ou conforme a orientação do fabricante.							
	Aspeto após descofragem	Visual. Verificar se há presença de patologias e erros nas peças estruturais, tais como deformações, armadura aparente, entre outros.							
	Controlo de Fck	Checagem averiguada no laboratório de controlo.							
Legenda:		AINDA NÃO INSPECIONADO	APROVADO	REPROVADO		APROVADO APÓS INSPEÇÃO			
		DEIXAR EM BRANCO	O	X		-			
OCORRÊNCIA DE NÃO CONFORMIDADE E TRATAMENTO									
Nº	Descrição do problema		Data do problema	Responsável	Solução proposta		Data de Reinspeção	Responsável	
Local da inspeção:		Inspeccionado por:	Data de abertura da FVS:			Data do fechamento da FVS:			
			____ / ____ / ____			____ / ____ / ____			

APÊNDICE C – FRAMEWORK

GESTÃO



A

PROBLEMAS

- A1 Dificuldade na comunicação entre equipe de execução e projetista
- A2 Aplicação informal ou desconhecimento das ferramentas *Lean*
- A3 Fiscalização técnica realizada apenas por inspeção visual
- A4 Escassez de mão de obra especializada
- A5 Necessidade de aprimoramento de técnicas
- A6 Erro acumulado de detalhamento ou imprecisão executiva

FERRAMENTAS *LEAN*

KAIZEN

LPS

VM

VSM

JIT

TPM

DE

APLICAÇÃO

Executar faseamento das etapas construtivas e criar diagrama visual

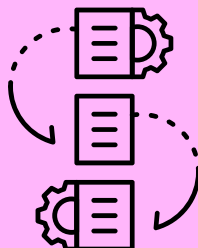
Planejar desde a elaboração do cronograma até a estruturação das atividades de forma rigorosa, escolher ferramentas *Lean* e recursos que serão aplicadas durante o fluxo produtivo

Detalhamento minucioso e compatibilização de projetos

Capacitar equipes para cada função a desempenhar e instruções visuais no local de execução

Utilização de checklists, indicadores de desempenho e acompanhamentos semanais padronizados e criação de manual de práticas construtivas

FLUXO DE TRABALHO



B

PROBLEMAS

- B1 Ciclos de 1 a 2 semanas, sendo o 1º ciclo de maior duração
- B2 Condições desfavoráveis dos trabalhadores

FERRAMENTAS *LEAN*

KAIZEN

LPS

ES

TAKT-TIME

JIT

APLICAÇÃO

Sequenciar as atividades no curto prazo semanalmente (WWP) considerando execução de nariz metálico no 1º ciclo do fluxo produtivo contínuo

Adotar materiais e estratégias que contribuam para a aceleração do método. Adotar o uso de prototipagem ainda na fase pré- executiva para validar e otimizar previamente os procedimentos

Otimizar condições ergonômicas, reduzir movimentações desnecessários, posicionar acessos provisórios adequados e revisar procedimentos construtivos dos operários

MATERIAL



C

PROBLEMAS

- C1 Controlo de qualidade do betão
- C2 Tempo de cura do betão
- C3 Bicheira

FERRAMENTAS *LEAN*

KAIZEN

JIT

VM

TAKT-TIME

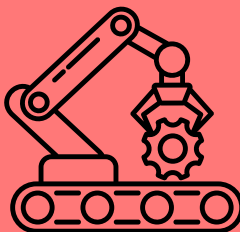
TPM

APLICAÇÃO

Rastrear as atividades com sincronização rigorosa e durações bem definidas

Padronizar conferências de conformidade técnica das atividades com FVS durante todo o fluxo de controlo

EQUIPAMENTO



D

PROBLEMAS

- D1 Falta de detalhamento dos aparelhos de apoio provisório
- D2 Necessidade de constante monitoramento do macaco hidráulico

FERRAMENTAS *LEAN*

ES

VSM

TPM

APLICAÇÃO

Considerar os aparelhos de apoio provisório em todas as etapas pré-executivas (projetos; planeamento estratégico e prototipagem)

Implementar capacitações dos operários e instruções executivas a partir do manual de práticas construtivas da empresa

Padronizar manutenção programada regularmente dos equipamentos (calibração, inspeção e manutenção)

FATORES EXTERNOS



E

PROBLEMAS

- E1 Influência da temperatura e clima
- E2 Desnivelamento entre apoios causados por recalque
- E3 Problemas logísticos e/ou operacionais externos

FERRAMENTAS *LEAN*

DE

LPS

VM

TAKT-TIME

TPM

APLICAÇÃO

Monitorar e planear ações para condições adversas de clima e tempo

Adaptar *layout* do estaleiro para eliminar desperdícios de movimentações de pessoas, equipamentos e materiais

Considerar deformações de solo do estaleiro ainda na fase de projeto com sensores e equipamentos a laser

APÊNDICE D – QUESTIONÁRIO DE VALIDAÇÃO

Validação de Soluções no Método de Lançamento Incremental (MLI) com base na *Lean Construction* (LC)

Este questionário tem como objetivo validar os resultados obtidos na presente investigação, no âmbito do estudo sobre o MLI aplicado à construção de pontes.

Os problemas analisados foram identificados por meio de revisão bibliográfica e de pesquisa exploratória com profissionais da área, sendo posteriormente organizados em diferentes categorias (gestão, fluxo de trabalho, materiais, equipamentos e fatores externos).

Com base nessa sistematização, foram propostas soluções fundamentadas nos princípios da LC, visando a otimização do processo construtivo.

Neste contexto, solicita-se a sua colaboração na avaliação:

- da relevância dos problemas identificados;
- da aderência destes à prática profissional;
- e da aplicabilidade das soluções propostas.

O questionário é de resposta rápida, composto maioritariamente por questões de múltipla escolha, podendo incluir campos opcionais para comentários adicionais.

As respostas serão tratadas de forma confidencial e utilizadas exclusivamente para fins académicos.

A sua contribuição é fundamental para a validação técnica do estudo.

*** Indica uma pergunta obrigatória**

1. E-mail *

2. Função principal *

Marque todas que se aplicam.

- ☐ Projetista.
- ☐ Executor/Gerente de obra.
- ☐ Docente (Investigador).
- ☐ Dono de obra.
- ☐ Fiscal.
- ☐ Outro: _____

3. País ou região de atuação profissional: *

4. Tempo de experiência profissional: *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Menos de 5 anos.
- ☐ 5-10 anos.
- ☐ 10-20 anos.
- ☐ Mais de 20 anos.

5. Quantidade aproximada de obras com o MLI: *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ 1-2.
- ☐ 3-5.
- ☐ 6-10.
- ☐ Mais de 10.

6. **Antes deste questionário, qual era o seu nível de familiaridade com práticas *Lean Construction*?** *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Nenhum.
- ☐ Básico.
- ☐ Intermediário.
- ☐ Avançado.

7. **Você gostaria de receber uma cópia da dissertação final ou um resumo dos principais resultados após a conclusão desta pesquisa?** *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Sim, dissertação completa.
- ☐ Sim, apenas resumo dos resultados.
- ☐ Não

Validação

Essa seção tem como propósito apresentar soluções para os problemas identificados e sintetizados, tanto na revisão bibliográfica quanto na pesquisa exploratória, através da aplicação de ferramentas que integram a LC.

Como já apresentado, tais problemas foram organizados em cinco categorias: Gestão, Fluxo de trabalho, Materiais, Equipamentos e Fatores externos, descritos a seguir.

A. Gestão:

- A1 - Dificuldade na comunicação à distância entre equipe de execução e projetista durante o processo construtivo;
- A2 - Aplicação informal de preceitos *Lean*, devido à falta de conhecimento na aplicação de indicadores e ferramentas;
- A3 - Fiscalização técnica realizada apenas por inspeção visual;
- A4 - Escassez de mão de obra especializada;
- A5 - Necessidade de aprimoramento de técnicas, como erro de introdução do aparelho de apoio de neoflon no apoio deslizante;
- A6 - Erro acumulado de detalhamento ou imprecisão executiva.

B. Fluxo de trabalho:

- B1 - Execução do processo em ciclos sucessivos de aproximadamente 1 a 2 semanas, porém o primeiro segmento possui ciclo maior;
- B2 - Condições desfavoráveis dos trabalhadores que estão juntos aos apoios nos pilares.

C. Material:

- C1 - Controle de qualidade do betão;
- C2 - Tempo de cura do betão;
- C3 - Bicheira.

D. Equipamentos:

- D1 - Falta de detalhamento dos aparelhos de apoio provisório;
- D2 - Necessidade de constante monitoramento do macaco hidráulico durante o lançamento.

E. Fatores externos:

- E1 - Influência da temperatura e condições climáticas durante todo o processo do MLI;
- E2 - Desnívelamento entre apoios causados por recalque;
- E3 - Problemas logísticos ou operacionais externos.

Dessa forma, são propostas soluções fundamentadas nas ferramentas LC, considerando a análise integrada dos problemas identificados.

GESTÃO

A Gestão está presente em todas as fases da construção, como na pré-execução, execução e pós-execução. O detalhamento minucioso de projeto e planeamento, o gerenciamento em campo organizado e estruturado, assim como a busca por profissionais familiarizados com o método e sua capacitação contínua evita os impactos relacionados a A1, A2, A3, A4, A5 e A6, assim como suas vertentes situadas mais a dentro do processo construtivo.

8. 1. A aplicação do *Last Planner System* (LPS), aliado à Gestão Visual e à Engenharia Simultânea, permite maior detalhamento, clareza e organização do processo construtivo, reduzindo a dependência de interações constantes entre obra e escritório. Dessa forma, a equipa de campo pode executar as atividades com maior autonomia, sem comprometer o alinhamento técnico necessário. *

O LPS, enquanto uma das principais ferramentas da LC, estrutura o fluxo de trabalho por meio de planeamentos de longo, médio e curto prazo. Neste caso, o planeamento de longo prazo permite organizar globalmente as etapas construtivas, evidenciando a sequência das atividades, suas interrelações e os principais pontos de controlo ao longo do ciclo. Associada a essa estrutura, a Gestão Visual facilita a compreensão das informações por todos os colaboradores através de painéis visuais no estaleiro, contendo planeamento, restrições e indicadores de desempenho, como o *Percent Plan Complete* (PPC).

Complementarmente, a Engenharia Simultânea promove a integração entre projetistas, executores, fornecedores e fiscalização no desenvolvimento colaborativo do projeto e do planeamento, garantindo maior compatibilização técnica e antecipação de restrições, contribuindo para um processo mais eficiente, previsível e tecnicamente alinhado.

Na sua experiência, considera esta abordagem adequada para mitigar problemas de comunicação e compatibilização técnica no processo construtivo?

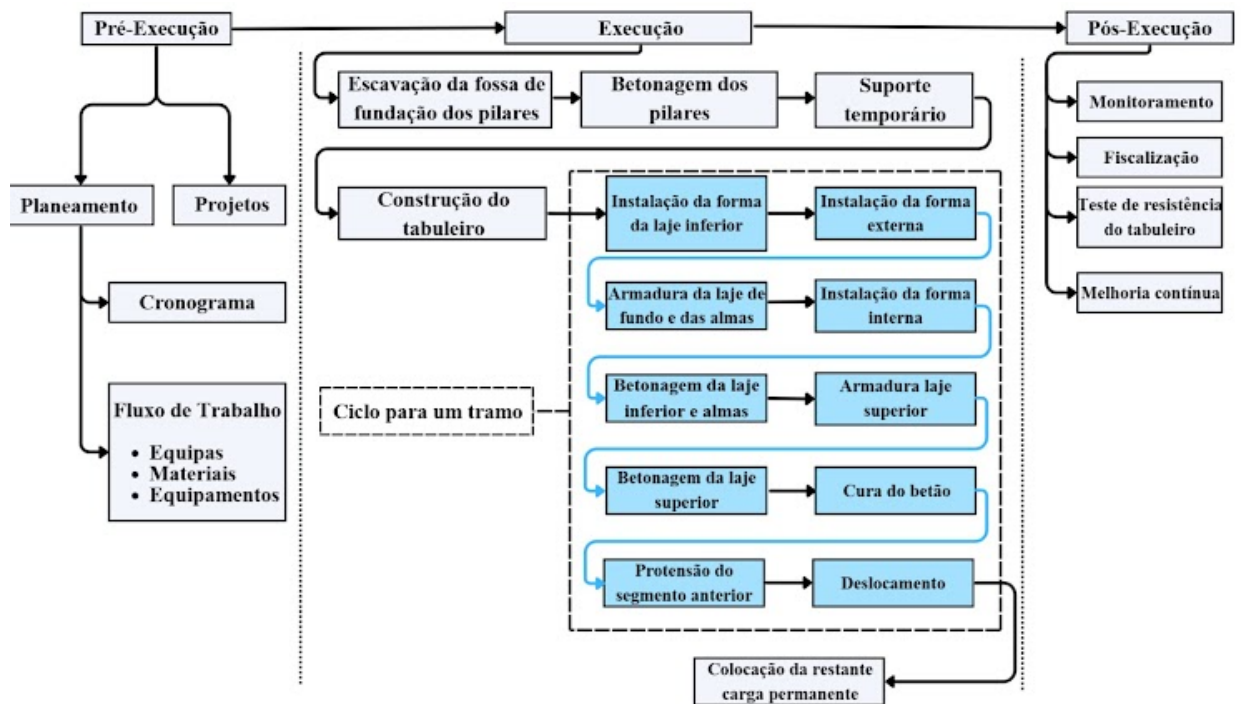
Marcar apenas uma oval.

- ☐ Muito adequada.
- ☐ Adequada.
- ☐ Parcialmente adequada.
- ☐ Pouco adequada.
- ☐ Inadequada

9. Comentário opcional:

10. 2. Com o objetivo de detalhar as diferentes fases do processo construtivo e a fim de enxergar melhor a operação em um contexto global do MLI, com base no LPS da LC ligado a uma Gestão Visual foi estruturado o seguinte diagrama, permitindo uma melhor compreensão do processo global, evidenciando a sequência das atividades, suas interrelações e os principais pontos de controlo ao longo do ciclo. *

Com base na sua experiência prática, como você avalia o diagrama apresentado?



Marcar apenas uma oval.

- ☐ Muito adequado.
- ☐ Adequado.
- ☐ Parcialmente adequado.
- ☐ Pouco adequado.
- ☐ Inadequado.

11. Comentário opcional:

12. 3. A fiscalização técnica ao longo da obra é fundamental para garantir que o processo construtivo seja executado conforme estabelecido em projeto, tanto para mitigar erros de produção em campo quanto para assegurar o acompanhamento rigoroso do cronograma definido pelo LPS. Quando essa fiscalização ocorre exclusivamente por meio de inspeções visuais, aumenta-se o risco de falhas passarem despercebidas, comprometendo a qualidade, a precisão executiva e a continuidade eficiente do processo. *
- Nesse contexto, a utilização de indicadores de desempenho, como o PPC, permite formalizar o controle sistemático das atividades, avaliando o grau de cumprimento do planejamento e identificando desvios de forma objetiva. Integrado ao LPS, o PPC fortalece o acompanhamento da produção, promovendo maior previsibilidade e maior capacidade de resposta frente a restrições ou falhas operacionais.

Complementarmente, a Gestão Visual, através da aplicação de Checklists previamente elaborados para cada etapa construtiva, contribui para a padronização das inspeções, reduzindo a dependência exclusiva de avaliações subjetivas e aumentando a confiabilidade técnica do controle de qualidade. Dessa forma, a integração entre LPS, PPC e Gestão Visual reforça a fiscalização técnica, melhora a rastreabilidade das atividades e promove maior estabilidade operacional ao longo da execução.

Com base na sua experiência prática, considera que a integração entre fiscalização técnica padronizada, indicadores de desempenho e Gestão Visual pode aumentar significativamente a confiabilidade do controle executivo e reduzir falhas no processo construtivo do MLI?

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Concordo totalmente.
- ☐ Concordo parcialmente.
- ☐ Discordo parcialmente.
- ☐ Discordo totalmente.

13. Comentário opcional:

14. 4. Visto que o MLI é um processo construtivo de elevada complexidade operacional e que exige elevado nível de precisão ao longo de toda a execução, torna-se fundamental que as equipas envolvidas possuam qualificação técnica adequada, de forma a reduzir falhas operacionais, retrabalhos e custos adicionais. Diante da escassez de mão de obra especializada, a aplicação dos princípios do Kaizen, com foco na capacitação contínua, treinamentos específicos por função, a constante busca por contratação de profissionais familiarizados com o método e incentivo à proatividade, contribui diretamente para maior eficiência e redução de falhas ao longo do processo. Complementarmente, a capacitação contínua aliada ao controlo técnico rigoroso, à definição de procedimentos operacionais padronizados, à elaboração de manuais de instrução e à Gestão Visual, por meio de ferramentas ilustrativas no local de trabalho, fortalece a padronização das atividades e reduz a probabilidade de erros técnicos, como falhas na instalação de dispositivos específicos, a exemplo do aparelho de apoio de neoflon no apoio deslizante. *

Adicionalmente, a ferramenta *Total Productive Maintenance* (TPM) contribui para a implementação de rotinas sistemáticas de verificação, controlo das condições de execução, manutenção preventiva e monitorização operacional por parte dos trabalhadores, permitindo a identificação precoce de falhas e aumentando a confiabilidade técnica durante a instalação dos dispositivos de apoio e demais operações críticas do processo construtivo.

Com base na sua experiência, considera que a capacitação contínua das equipas, aliada à padronização de procedimentos, Gestão Visual e práticas de TPM, pode reduzir significativamente falhas operacionais, retrabalhos e erros técnicos no processo construtivo do MLI?

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Concordo totalmente.
- ☐ Concordo parcialmente.
- ☐ Discordo parcialmente.
- ☐ Discordo totalmente.

15. Comentário opcional:

16. 5. O MLI tratando-se de um método caracterizado como cíclico, um erro gerado *
tanto por acúmulo de detalhamento quanto imprecisão executiva, pode se
manifestar com maior intensidade e progredir progressivamente a cada novo
lançamento e tornar sua correção cada vez mais complexa, evidenciando que
pequenos erros hoje podem transformar-se em grandes problemas nas etapas
seguintes.

Dessa forma, torna-se essencial a adoção de um controle rigoroso e contínuo
em todas as atividades envolvidas, de modo a garantir a precisão do processo e
evitar a ampliação de desvios ao longo da execução. Para isso, a verificação
sistemática das tolerâncias geométricas a cada ciclo de lançamento, com o
auxílio de instrumentos de medição como sensores, equipamentos a laser e
inspeção por Checklist, permite a identificação precoce de inconsistência,
contribuindo para mitigação do acúmulo de detalhamento e imprecisão
executiva.

**Com base na sua experiência profissional, considera que a aplicação de
controle geométrico contínuo, monitorização técnica sistemática e
inspeções padronizadas por ciclo de lançamento pode reduzir
significativamente erros acumulativos de detalhamento e imprecisão
executiva?**

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Concordo totalmente.
- ☐ Concordo parcialmente.
- ☐ Discordo parcialmente.
- ☐ Discordo totalmente.

17. Comentário opcional:

FLUXO DE TRABALHO

Elaborado com base na sequência construtiva dos tramos e no ritmo produtivo inerente a cada atividade do MLI, o fluxo de trabalho está diretamente inserido na fase de execução do método. Nesse contexto, sua análise concentra-se no estudo das sequências de atividades introduzidas ao método, nos tempos necessários para cada ciclo de produção, bem como nas condições operacionais e de serviço em campo, permitindo avaliar fatores que influenciam a eficiência, continuidade e estabilidade do processo construtivo, particularmente no que se refere aos problemas identificados nos índices B1 e B2.

18. 6. Neste contexto, a ferramenta *Takt-Time* organiza o ritmo de execução das atividades em ciclos semanais, promovendo maior estabilidade produtiva e previsibilidade ao processo construtivo. Complementarmente, o *Weekly Work Plan* (WWP), correspondente ao planejamento de curto prazo do LPS, desempenha papel fundamental na organização detalhada das atividades semanais, contemplando sequenciamento operacional, restrições produtivas, condições climáticas, disponibilidade de recursos e demais fatores que possam impactar a continuidade do fluxo de trabalho. *

Considerando que os primeiros ciclos apresentam maior duração, esse comportamento pode estar associado a fatores como a execução paralela do nariz metálico, adaptação inicial das equipas, necessidade de ajustes operacionais, calibração dos equipamentos e consolidação progressiva das rotinas de trabalho. Nesse sentido, a aplicação do *Kaizen*, por meio da capacitação contínua e específica das equipas envolvidas, contribui para a padronização das atividades, redução de variabilidades operacionais e melhoria contínua do desempenho ao longo dos ciclos.

Aliada a essas práticas, a utilização estruturada do WWP e sua apresentação clara através da Gestão Visual fortalecem o alinhamento entre as equipas de execução, aumentam a confiabilidade do planejamento de curto prazo e reduzem desvios operacionais, contribuindo diretamente para a otimização dos ciclos construtivos no processo do MLI.

Com base na sua experiência, considera que a aplicação integrada de *Takt-Time*, WWP, *Kaizen*, Gestão Visual e estratégias pré-executivas pode aumentar significativamente a estabilidade produtiva, reduzir variabilidades operacionais e otimizar os ciclos construtivos no processo do MLI?

Marcar apenas uma oval.

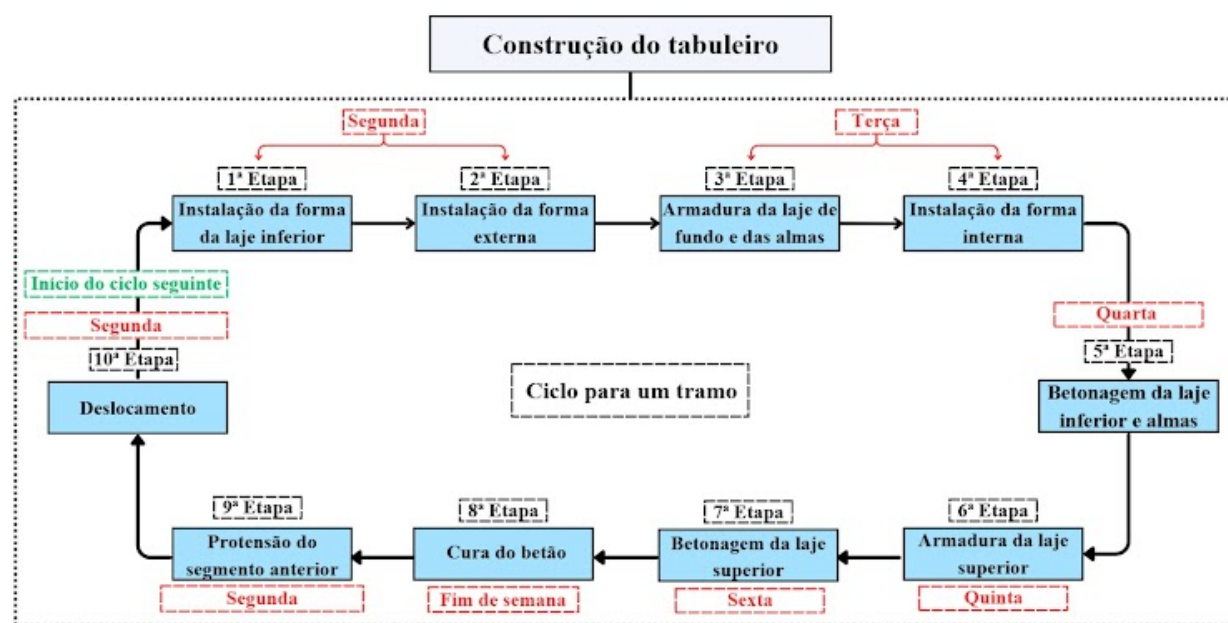
- ☐ Concordo totalmente.
- ☐ Concordo parcialmente.
- ☐ Discordo parcialmente.
- ☐ Discordo totalmente.

19. Comentário opcional:

20. 7. O diagrama a seguir foi estruturado com base no WWP, aliado a um *Takt-Time* semanal. A visualização de informações permite uma melhor compreensão do funcionamento do processo facilitando a assimilação das atividades e do fluxo produtivo por parte dos colaboradores.

*

Estas abordagens representam adequadamente soluções práticas para otimizar o fluxo de trabalho no MLI?



Marcar apenas uma oval.

- ☐ Representa plenamente.
- ☐ Representa bem, com pequenos ajustes.
- ☐ Representa parcialmente.
- ☐ Não representa adequadamente

21. Comentário opcional:

22. 8. Determinadas atividades apresentam condições operacionais desfavoráveis para trabalhadores junto a pilares e zonas críticas, impactando diretamente a produtividade e a segurança das operações durante a execução, tais condições estão frequentemente associadas a restrições de espaço, dificuldade de acesso e exposição a situações operacionais desfavoráveis, comprometendo o desempenho das atividades e aumentando a probabilidade de falhas. Para isso, propõem-se intervenções voltadas à organização do espaço de trabalho, otimizado das condições ergonômicas, redução de movimentação desnecessária, acessos provisórios mais bem posicionados e revisão dos procedimentos construtivos, visando facilitar a execução das atividades e melhor eficiência operacional, assim como garantindo o aumento da segurança dos trabalhadores e maior estabilidade. *

Com base na sua experiência, considera que a otimização das condições operacionais, ergonômicas e de acesso nas zonas críticas de trabalho pode aumentar significativamente a segurança, produtividade e eficiência das atividades no processo construtivo do MLI?

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Concordo totalmente.
- ☐ Concordo parcialmente.
- ☐ Discordo parcialmente.
- ☐ Discordo totalmente.

23. Comentário opcional:

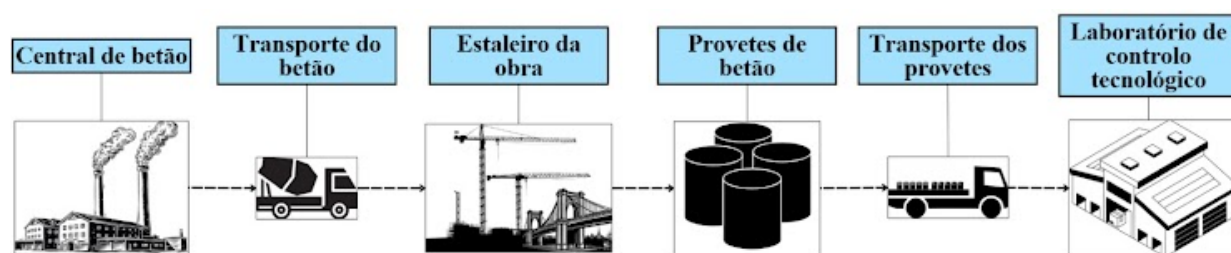
MATERIAL

A definição e boa escolha dos materiais, assim como o seu manuseio e fiscalização correta são fundamentais para assegurar o controlo de qualidade tanto da estrutura quanto do material em fase de execução, evitando diferentes patologias e desperdícios. Sendo os principais objetivos do controlo de qualidade: garantir a integridade estrutural, reduzir variabilidades, otimizar os custos e atender aos padrões da indústria.

24. 9. A cura correta do Betão em obra é um fator imprescindível a ser considerado no controlo geral da obra. A cura incorreta pode levar a problemas no futuro. Portanto, em um modo geral o Betão deve ter um controlo de qualidade correto, desde a saída da central de Betão, do lançamento e da cura do mesmo, visando mitigar todos os problemas. Para isso, é estruturado por meio da ferramenta *Value Stream Mapping* (VSM) todo o fluxo do Betão desde a saída da central até a central de controlo de qualidade em obra, o que garante total qualidade do produto a ser utilizado. *

Este fluxo permite rastrear todas atividades que poderiam gerar desperdícios, dada a necessidade de sincronização rigorosa entre as etapas, em função da natureza perecível do Betão. Aliada a outras ferramentas, como o WWP, o planeamento semanal permite antecipar as condições climáticas, ajustando os períodos de Betonagem e deslocamentos a evitar impactos negativos.

Com base na sua experiência, como avalia a aplicação integrada de VSM, controlo de qualidade rigoroso e planeamento antecipado para garantir a qualidade do Betão, reduzir desperdícios e mitigar falhas no processo construtivo do MLI?



Marcar apenas uma oval.

- ☐ Muito adequada.
- ☐ Adequada.
- ☐ Parcialmente adequada.
- ☐ Pouco adequada.
- ☐ Inadequada.

25. Comentário opcional:

26. 10. De modo a facilitar a conformidade técnica das atividades, as Fichas de Verificação de Serviço (FVS) utilizadas durante todo o fluxo de controlo, visto na questão anterior, garante que cada atividade foi verificada e validada corretamente antes de se iniciar a próxima. O FVS também garante a qualidade do Betão após o seu lançamento, podendo identificar possíveis bicheiras no Betão e outras patologias ainda na fase executiva, mitigando falhas recorrentes e retrabalhos.

*

Com base na sua experiência, como avalia a utilização de FVS como ferramenta para garantir a conformidade técnica, melhorar o controlo de qualidade do Betão e reduzir falhas e retrabalhos no processo construtivo do MLI?

	Atividades de inspeção	Método de verificação
Etapa	Condições necessárias para o início dos serviços	Visual. As fôrmas devem estar executadas, limpas e conferidas.
	Verificação das guias de referência	Verificar o nível de acordo com o plano de betonagem
	Lançamento, vibração, sarrafeamento e acabamento do betão	Visual. Acompanhar para que não forme grande acúmulo de betão em pontos isolados, para que não ocorra segregação e deslocamento da ferragem e outros elementos. Verificar o acabamento.
	Acompanhamento da laje e das almas	Visual. Verificar se há pelo menos um profissional junto ao tabuleiro, para verificação de qualquer deformação nas cofragens e escoramentos.
	Controlo de betão	Mapeamento da betonagem. Identificar as áreas betonadas por cada camião em planta reduzida
	Conferência do nível do tabuleiro	Mapeamento através de nível a laser. No primeiro dia após a betonagem, antes da execução de protensão e deslocamentos.
	Verificação da amarração e do recobrimento das armaduras	Verificar se a amarração está firme e se as peças não estão em contacto com as formas.
	Posicionamento	Conferir todas as armaduras de todas as peças estruturais com base no projeto
	Cheragem da armadura negativa	Visual. Após a montagem da armadura, verificar se os negativos estão posicionadas e fixados na altura e nos locais corretos, com base no projeto
	Cura do betão	Visual. Verificar se a mesma está sendo realizada por um período pré estabelecido ou conforme a orientação do fabricante.
	Aspeto após descofragem	Visual. Verificar se há presença de patologias e erros nas peças estruturais, tais como deformações, armadura aparente, entre outros.
	Controlo de Fck	Cheragem averiguada no laboratório de controlo.

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Muito adequada.
- ☐ Adequada.
- ☐ Parcialmente adequada.
- ☐ Pouco adequada.
- ☐ Inadequada.

EQUIPAMENTOS

São diversos os equipamentos a serem utilizados no MLI, sendo os principais a serem considerados o nariz metálico, os macacos hidráulicos e os aparelhos de apoio. Ambos devem ser zelados e utilizados da melhor maneira para evitar falhas e reduzir desperdícios.

27. 11. Para reduzir as falhas geradas devido às faltas de detalhamento dos aparelhos provisórios, é fundamental que sejam considerados na fase de detalhamento de projetos, na elaboração do planeamento estratégico e na realização de prototipagem, orientando a sequência de montagem dos apoios, o posicionamento exato, a zona efetiva de contato e as instruções executivas em conformidade com o manual de obra mencionado. *

Na etapa de planeamento estratégico, os desperdícios são drasticamente eliminados em relação a manutenção dos apoios provisórios e de outros aparelhos por conta do monitoramento constante e dos preparativos prévios dos operários.

A prototipagem simula as reações entre apoio e tabuleiro, avalia o comportamento da estrutura previamente e as atividades a serem executadas no estaleiro.

Com base na sua experiência, como avalia a integração entre detalhamento de projeto, planeamento estratégico, prototipagem e monitoramento contínuo para reduzir falhas associadas aos aparelhos de apoio provisório?

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Muito adequada.
- ☐ Adequada.
- ☐ Parcialmente adequada.
- ☐ Pouco adequada.
- ☐ Inadequada.

28. Comentário opcional:

29. 12. Os macacos hidráulicos devem ser previamente selecionados com base na obra em que eles atuarão, frente às cargas e ações que enfrentará. Antes do início das atividades em obra, esses equipamentos devem ser calibrados, testados e inspecionados, de forma a reduzir a probabilidade de falhas durante o processo de lançamento. Aliado a essas instruções, visando a eficiência máxima dos equipamentos, a TPM, mostra-se pertinente, ao reforçar inspeções sistemáticas, controlo preventivo, verificação de desempenho, padronização dos procedimentos de operação e manutenção programada dos macacos hidráulicos, aliada a capacitação contínua dos operários que serão instruídos ao desempenho à frente de serviço. *

Com base na sua experiência prática, em que medida considera que a adoção de critérios rigorosos de seleção, calibração, manutenção preventiva e capacitação operacional dos macacos hidráulicos contribui para aumentar a confiabilidade, segurança e desempenho?

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Muito elevada.
- ☐ Elevada.
- ☐ Moderada.
- ☐ Reduzida.
- ☐ Muito reduzida.

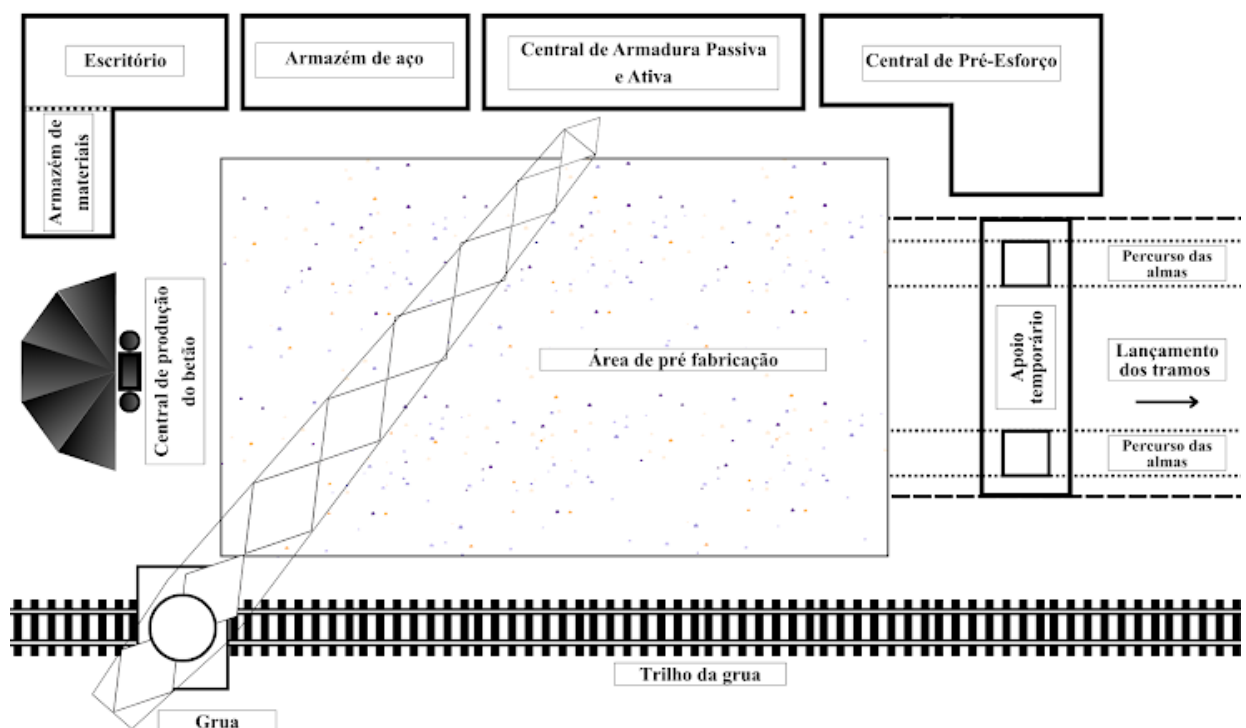
30. Comentário opcional:

31. 13. O tempo ocioso entre atividades, características das movimentações desnecessárias ou prolongadas que os operários realizam são características de problemas logísticos e podem ser combatidos com o estudo de diferentes adaptações de *Layout* do estaleiro, assim como o estudo geral do fluxo de trabalho, promovendo maior eficiência dos operários e reduzindo desperdícios de tempo. A partir do Diagrama de Espaguete, este estudo permite identificar os melhores traçados para agilizar a interação entre frentes de trabalho. *

A proposta a seguir, tem como objetivo a maior eficiência e otimização do *Layout*, servindo como base para a implementação da obra. Lembrando que cada obra tem suas características singulares e que deve ser realizado um estudo para cada.

Ainda no estaleiro, o auxílio de instrumentos de medição como sensores e equipamentos a laser, assim como a avaliação do solo preventiva para instalação do estaleiro, permite a identificação precoce de inconsistência e contribui para a mitigação dos efeitos de recalque, evitando que ocorram rotações na estrutura e o acréscimo de tensões sobre a estrutura durante o lançamento.

Com base na sua experiência prática, como avalia a utilização de estudos de *Layout*, Diagrama de Espaguete, controlo logístico e monitoramento preventivo do estaleiro para reduzir desperdícios operacionais, otimizar fluxos de trabalho e mitigar riscos estruturais?



Marcar apenas uma oval.

- ☐ Muito adequada.
- ☐ Adequada.

☐ Parcialmente adequada.

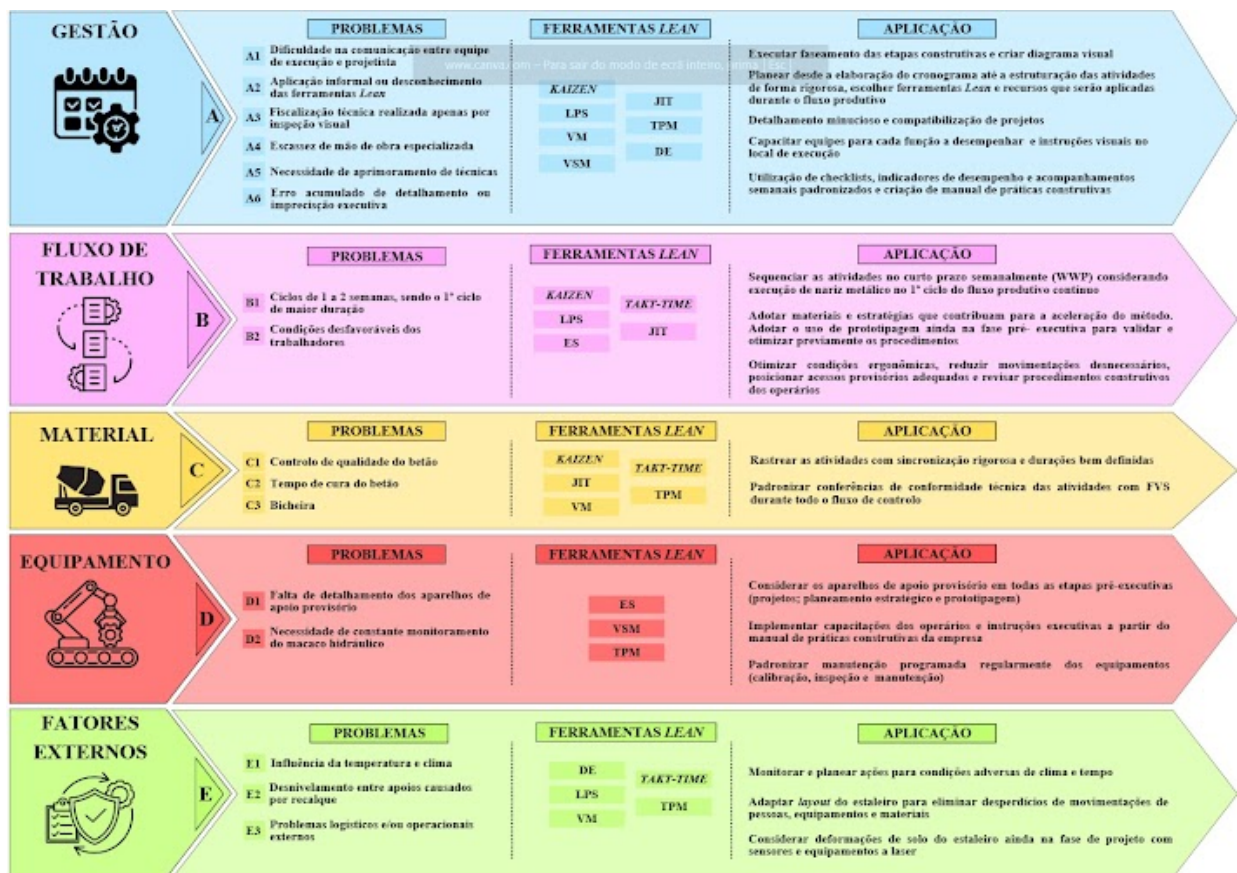
☐ Pouco adequada.

☐ Inadequada.

32. Comentário opcional:

33. 14. Considerando as soluções de otimização do processo do MLI propostas neste trabalho, foi estruturado o Framework a seguir. *

Com base na sua experiência prática, como avalia a representatividade e aplicabilidade deste Framework para o processo real do MLI?



Marcar apenas uma oval.

- ☐ Representa de forma clara e fiel o processo real.
- ☐ Representa bem o processo, com pequenos ajustes recomendáveis.
- ☐ Representa parcialmente, necessitando revisões relevantes.
- ☐ Não representa adequadamente o processo real.

34. Comentário opcional

35. 15. **Você consideraria a utilização das soluções propostas em futuros projetos ou obras?** *

36. 16. **Com base na sua experiência, existem melhorias adicionais ou ajustes relevantes que considera importantes para a otimização proposta do MLI com base em práticas Lean Construction?** *

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pelo Google.

Google Formulários

