



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA
PARAÍBA**

DIRETORIA GERAL DO CAMPUS JOÃO PESSOA

DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR

CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

JOSÉ VIANA DA CUNHA NETO

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SISTEMA EM ALVENARIA ESTRUTURAL E
O SISTEMA DE CONCRETO PROTENDIDO SOB A ÓTICA DOS PRINCÍPIOS DO
LEAN CONSTRUCTION**

JOÃO PESSOA

2026

JOSÉ VIANA DA CUNHA NETO

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SISTEMA EM ALVENARIA ESTRUTURAL E
O SISTEMA DE CONCRETO PROTENDIDO SOB A ÓTICA DOS PRINCÍPIOS DO
LEAN CONSTRUCTION**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito curricular obrigatório para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Breno José Santos da Silva.

JOÃO PESSOA

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Nilo Peçanha do IFPB, *Campus* João Pessoa

C972a Cunha Neto, José Viana da.

Análise comparativa entre sistema em alvenaria estrutural e o sistema de concreto protendido sob a ótica dos princípios do *Lean Construction*. / José Viana da Cunha Neto. – 2026.

103 f. : il.

TCC (Graduação – Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação da Paraíba / Departamento de Ensino Superior / Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Civil, 2026.

Orientação: Prof^o Me. Breno José Santos da Silva.

1. *Lean Construction*. 2. Alvenaria estrutural. 3. Concreto protendido. 4. Fluxo produtivo. 5. Produtividade na construção.
I. Título.

CDU 69:624.12(043)



INSTITUTO FEDERAL
Paraíba

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
CAMPUS JOÃO PESSOA

DECISÃO 30/2026 - CBEC/UA1/UA/DDE/DG/JP/REITORIA/IFPB, de 17 de março de 2026.

JOSÉ VIANA DA CUNHA NETO

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SISTEMA EM ALVENARIA ESTRUTURAL E O SISTEMA DE CONCRETO PROTENDIDO SOB A ÓTICA DOS PRINCÍPIOS DO LEAN CONSTRUCTION

	Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba como requisito curricular para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil
--	--

Aprovado em 13 de março de 2026

Banca Examinadora

Me. Breno José Santos da Silva (Orientador - IFPB)

Dr. Cícero de Souza Nogueira Neto (Examinador Interno - IFPB)

Dra. Ana Cláudia Leão Borges (Examinadora Interna - IFPB)

JOÃO PESSOA

2026

Documento assinado eletronicamente por:

- **Breno Jose Santos da Silva** PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 17/03/2026 06:48:10.
- **Ana Claudia Leao Borges**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 17/03/2026 07:17:10.
- **Cicero de Souza Nogueira Neto**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 17/03/2026 17:15:03.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 16/03/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código: 851122
Verificador: f329888aba
Código de Autenticação:



NOSSA MISSÃO: Ofertar a educação profissional, tecnológica e humanística em todos os seus níveis e modalidades por meio do Ensino, da Pesquisa e da Extensão, na perspectiva de contribuir na formação de cidadãos para atuarem no mundo do trabalho e na construção de uma sociedade inclusiva, justa, sustentável e democrática.

VALORES E PRINCÍPIOS: Ética, Desenvolvimento Humano, Inovação, Qualidade e Excelência, Transparência, Respeito, Compromisso Social e Ambiental.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela força e perseverança concedidas ao longo destes anos de formação.

Aos meus pais e familiares, pelo apoio na trajetória de minha formação.

Ao meu orientador, Professor Breno José Santos da Silva, pelas críticas construtivas e pelo compartilhamento de seu vasto conhecimento, que foram fundamentais para a realização deste trabalho.

A todos os professores presentes em minha jornada acadêmica, em especial a Cícero Marciano da Silva Santos, Walter Ladislau de Barros Ribeiro, Ana Cláudia Leão Borges e Cícero de Souza Nogueira Neto.

Aos colegas de curso, pelas trocas de experiências e pela amizade construída na jornada acadêmica, em especial ao grupo delta Thalita Lauana Barreto e Vítor Soares de Pontes, por toda ajuda concedida durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Grupo Delta, registro meu sincero agradecimento por todo o apoio, união e parceria construídos durante a vida acadêmica no IFPB, tornando essa caminhada mais leve, significativa e memorável.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a conclusão desta etapa.

“A liberdade não consiste na ausência de regras, mas na ausência de dependências, ideia inspirada na concepção de liberdade como autonomia desenvolvida por (Kant,2009) ”

RESUMO

A construção civil brasileira ainda apresenta desafios relacionados à baixa produtividade, elevada variabilidade dos processos e desperdícios de recursos. Nesse contexto, os princípios do Lean Construction surgem como abordagem voltada à melhoria do desempenho produtivo por meio da estabilização do fluxo de trabalho, redução de desperdícios e maximização da geração de valor ao cliente. O presente estudo tem como objetivo realizar uma análise comparativa, a partir de projetos, da viabilidade técnico-produtiva entre o sistema construtivo em alvenaria estrutural com laje treliçada e o sistema estrutural em concreto protendido com vedação convencional, sob a ótica dos princípios do Lean Construction. A pesquisa caracteriza-se como aplicada, de natureza técnico-comparativa, com abordagem qualitativa e suporte analítico quantitativo. A análise foi desenvolvida a partir da interpretação técnica de projetos arquitetônicos e estruturais de dois empreendimentos residenciais multifamiliares reais, projetados para implantação no município de Cabedelo–PB. Como unidade de análise adotou-se o ciclo construtivo correspondente à execução da superestrutura e vedação de um pavimento tipo. Foram avaliados indicadores relacionados às dimensões de transformação, fluxo e geração de valor, incluindo consumo de insumos, número de atividades, interfaces entre equipes, repetitividade dos processos, complexidade executiva, tempo de ciclo e aproveitamento espacial. Os resultados indicam que o sistema em alvenaria estrutural apresenta maior repetitividade e menor variabilidade operacional, favorecendo a estabilidade do fluxo produtivo. Por outro lado, o sistema em concreto protendido demonstrou maior potencial de geração de valor em função da redução de pilares e do melhor aproveitamento espacial em determinadas áreas da edificação. Conclui-se que ambos os sistemas podem atender aos princípios do Lean Construction, apresentando vantagens distintas dependendo das prioridades de projeto, planejamento e desempenho produtivo.

Palavras-chave: Lean Construction; Alvenaria estrutural; Concreto protendido; Fluxo produtivo; Produtividade na construção.

ABSTRACT

The Brazilian construction industry still faces challenges related to low productivity, high process variability, and resource waste. In this context, Lean Construction principles emerge as an approach aimed at improving production performance through workflow stabilization, waste reduction, and value maximization for the client. This study aims to perform a comparative analysis of the technical-productive feasibility between structural masonry with trussed slab and prestressed concrete slab systems with conventional masonry infill, under the perspective of Lean Construction principles. The research is classified as applied with a technical-comparative approach, combining qualitative analysis with quantitative analytical support. The study was developed based on the technical interpretation of architectural and structural designs of two real multifamily residential buildings planned for construction in the municipality of Cabedelo–PB, Brazil. The unit of analysis adopted was the construction cycle corresponding to the execution of the superstructure and enclosure of a typical floor. Indicators related to the dimensions of transformation, flow, and value generation were evaluated, including material consumption, number of activities, team interfaces, process repetitiveness, execution complexity, cycle time, and spatial efficiency. The results indicate that structural masonry presents greater process repetitiveness and lower operational variability, contributing to a more stable production flow. On the other hand, the prestressed concrete system demonstrated greater potential for value generation due to the reduction in the number of columns and improved spatial utilization in certain building areas. It is concluded that both systems can comply with Lean Construction principles, presenting different advantages depending on project priorities, planning strategies, and desired production performance.

Keywords: Lean Construction; Structural masonry; Prestressed concrete; Production flow; Construction productivity.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Análise entre alvenaria estrutural e concreto protendido	89
Gráfico 2 - Análise do consumo de aço	90
Gráfico 3 - Parâmetros das atividades	91
Gráfico 4 - Parâmetro de fluxo e variabilidade do material	92
Gráfico 5 - Parâmetros de complexidade	93
Gráfico 6 - Análises de índice	94
Gráfico 7 - Análise do tempo de ciclo do 1º pavimento tipo	95
Gráfico 8 - Análise entre tempo de duração do ciclo completo e médio	96

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Planta baixa do pavimento tipo do projeto arquitetônico	34
Figura 2 - Cortes do projeto arquitetônico	36
Figura 3 - Sistema híbrido de mesa em concreto + alvenaria estrutural	37
Figura 4 - Cortes da estrutura base para alvenaria estrutural (mesa)	38
Figura 5 - Laje de transição laje nervurada	39
Figura 6 - Planta de fôrma do pavimento	40
Figura 7 - Primeira fiada e representação da compatibilização com arquitetônico	41
Figura 8 - Planta baixa pavimento tipo do projeto estrutural	43
Figura 9 - Corte AA do projeto arquitetônico	45
Figura 10 - Corte BB do projeto arquitetônico	46
Figura 11 - Planta de fôrma do pavimento tipo	47
Figura 12 - Planta de forma com detalhes da protensão	48
Figura 13 - Corte da estrutura	49
Figura 14 - Representação da edificação	52
Figura 15 - Cronograma das equipes do empreendimento A	87
Figura 16 - Cronograma das equipes do empreendimento B	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantitativos arquitetônicos com índices de diferenças e similaridade	50
Tabela 2 - Quantitativos	53
Tabela 3 - Consumo de aço do empreendimento A	57
Tabela 4 - Consumo de aço do empreendimento B	58
Tabela 5 - Relação entre profissional e atividade no sistema de alvenaria estrutural do empreendimento A	64
Tabela 6 - Relação entre profissional e atividade no sistema de alvenaria estrutural do empreendimento B	66
Tabela 7 - Atividades e relação dos profissionais do empreendimento A	68
Tabela 8 - Atividades e relação dos profissionais do empreendimento B	72
Tabela 9 - Análise de atividade repetitiva do empreendimento A	77
Tabela 10 - Análise de atividade repetitiva do empreendimento B	78
Tabela 11 - Concepção do aspecto de valor gerado pela estrutura	86
Tabela 12 - Entrega de valor	87
Tabela 13 - Índices de consumo	88
Tabela 14 - Índices do consumo de aço	89
Tabela 15 - Parâmetros de fluxo de variabilidade	91
Tabela 16 - Parâmetros de complexidade	93
Tabela 17 - Tempo de ciclo do 1º pavimento tipo	95

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Problema de pesquisa.....	15
1.2 Proposições de análise comparativa.....	16
1.3 Justificativa.....	17
2 OBJETIVOS.....	18
2.1 Objetivo Geral.....	18
2.2 Objetivos Específicos.....	18
3 A INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL E OS DESAFIOS PRODUTIVOS.....	19
3.1 Lean construction: Fundamentos, evolução e aplicações.....	19
3.2 Sistema em alvenaria estrutural.....	20
3.3 Laje treliçada.....	22
3.4 Sistema em concreto protendido.....	24
3.5 Classificação R5 e condicionantes urbanísticas.....	27
3.6 Integração entre sistemas estruturais e os princípios do Lean Construction.....	28
4 METODOLOGIA.....	30
4.1 Unidade de análise.....	31
4.2 Caracterização do objeto de estudo.....	32
4.2.1 Descrevendo empreendimento A.....	33
4.2.2 Descrevendo empreendimento B.....	42
4.3 Comprovação de similaridade entre os empreendimentos.....	48
4.4 Estrutura Analítica da Comparação.....	52
5 INDICADORES DA EFETIVIDADE NA TRANSFORMAÇÃO.....	54
5.1 Quantitativos levantados.....	54
5.2 Levantamento dos índices de consumo a partir dos quantitativos.....	54
5.2.1 Consumo teórico de concreto.....	54
5.2.2 Consumo teórico de fôrmas.....	56
5.2.3 Consumo teórico de AÇO.....	58
6 INDICADORES DA EFICIÊNCIA DO FLUXO PRODUTIVO.....	59
6.1 Levantamento das atividades que descrevem tecnicamente os sistemas construtivos adotados.....	60
6.1.1 Número de atividades.....	66
6.2 Levantamento do número de equipes especializadas necessárias.....	67
6.3 Levantamento do número de interfaces.....	67
6.3.1 Índice de complexidade executiva.....	77
6.4 Levantamento do número de atividades repetitivas e Índice de repetitividade.....	77
6.5 Tempo de Ciclo.....	80
7 INDICADORES E PARÂMETROS DA GERAÇÃO DE VALOR.....	87
7.1 Aproveitamento de área na garagem.....	87
7.2 Flexibilidade arquitetônica.....	87

8 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	89
8.1 Consumo de insumos materiais para transformação do produto.....	89
8.2 Parâmetros do fluxo produtivo.....	91
8.2.1 Parâmetros de variabilidade.....	92
8.2.2 Parâmetros de complexidade.....	94
8.2.3 Tempo de ciclo.....	96
9 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	98
9.1 Conclusão.....	98
10 REFERÊNCIAS.....	100

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil brasileira desempenha papel estratégico no desenvolvimento econômico e social do país, sendo responsável por significativa geração de empregos, formação de capital fixo, produção de infraestrutura e habitação. Segundo a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC, 2023), o setor representa parcela relevante do Produto Interno Bruto (PIB) nacional e possui forte efeito multiplicador sobre a cadeia produtiva. De forma complementar, dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023) indicam que a construção civil mantém participação expressiva na geração de postos de trabalho formais, reforçando sua importância estrutural para a economia brasileira.

Apesar dessa relevância, o setor ainda enfrenta desafios históricos relacionados à baixa produtividade, elevada variabilidade dos processos construtivos, retrabalho e desperdícios significativos de materiais, tempo e mão de obra. Estudos clássicos apontam que as perdas na construção podem alcançar percentuais elevados quando comparadas a setores industriais mais consolidados (KOSKELA, 1992; FORMOSO et al., 2002). A fragmentação da cadeia produtiva, a baixa padronização e a deficiência no planejamento são fatores frequentemente associados a esse cenário (BALLARD; HOWELL, 1998). Assim, a busca por métodos construtivos mais eficientes e por modelos de gestão que promovam racionalização e previsibilidade torna-se cada vez mais necessária.

Nesse contexto, a filosofia Lean Construction surge como uma abordagem gerencial voltada à melhoria do desempenho produtivo das obras por meio da eliminação de atividades que não agregam valor, da criação de fluxo contínuo, da produção puxada e da promoção da melhoria contínua dos processos. Seus fundamentos derivam do Sistema Toyota de Produção, desenvolvido por Taiichi Ohno (OHNO, 1988), cuja consolidação conceitual foi amplamente difundida por James P. Womack e Daniel T. Jones (WOMACK; JONES, 1996). A adaptação desses princípios para a construção civil foi sistematizada por Koskela (1992), ao propor uma nova teoria de produção baseada na transformação, fluxo e geração de valor. Desde então, a (construção enxuta) vem sendo aplicada como estratégia para aumentar a eficiência produtiva, reduzir custos e elevar a qualidade dos empreendimentos (HOWELL, 1999).

Paralelamente, a escolha do sistema estrutural exerce influência significativa sobre a organização do processo construtivo e sobre o desempenho produtivo das edificações. No

contexto brasileiro, o modelo estrutural convencional em concreto armado moldado in loco, caracterizado por lajes maciças apoiadas em vigas e estas em pilares, ainda é amplamente utilizado em edificações residenciais e comerciais. Contudo, a crescente busca por racionalização construtiva, melhoria da produtividade e maior eficiência no uso de recursos tem impulsionado a adoção de sistemas construtivos alternativos, capazes de reduzir etapas executivas e promover maior organização do processo produtivo (SABBATINI, 2003; FORMOSO et al., 2002).

Entre essas tecnologias, destacam-se dois sistemas tecnicamente viáveis para edificações residenciais de médio padrão: a alvenaria estrutural + laje treliçada e o sistema em concreto protendido de pilares + lajes lisas + vedação.

A alvenaria estrutural consolidou-se no Brasil a partir da década de 1980, associada à padronização modular, redução de etapas construtivas e maior racionalização do canteiro (RAMALHO; CORRÊA, 2003). Por eliminar vigas e pilares convencionais, esse sistema tende a reduzir interferências e simplificar o fluxo produtivo, características alinhadas aos princípios Lean.

Por sua vez, o concreto protendido, desenvolvido a partir dos estudos pioneiros de Eugène Freyssinet (FREYSSINET, 1928), possibilita vencer maiores vãos, conseqüentemente reduzir o número de pilares em relação ao convencional, reduzir fissuração e otimizar o consumo de materiais estruturais. No Brasil, sua aplicação tem se ampliado em edifícios residenciais e comerciais que demandam maior redução de seções estruturais (LEONHARDT, 1979). Entretanto, trata-se de um sistema que exige maior rigor de projeto, controle tecnológico e capacitação da mão de obra, fatores que impactam diretamente o planejamento e a gestão da produção e o custo.

No âmbito urbano, a aplicação desses sistemas deve ainda observar as diretrizes legais e urbanísticas locais. Como parâmetro de estudo para empreendimentos no município de Cabedelo–PB, por exemplo, com enquadramento de edificações residenciais do tipo R5 encontra respaldo no Código de Zoneamento instituído pela legislação municipal vigente, que define parâmetros como gabarito, taxa de ocupação e coeficiente de aproveitamento, influenciando diretamente as soluções estruturais adotadas.

Embora ambos os sistemas sejam amplamente utilizados no mercado, ainda há lacunas na literatura quanto à sua comparação sob a ótica dos princípios do Lean Construction,

sobretudo em empreendimentos residenciais de médio porte, como edifícios compostos por térreo, quatro pavimentos tipo e cobertura. A maior parte dos estudos concentra-se em análises estruturais ou econômicas isoladas, havendo menor aprofundamento quanto à relação entre características técnico-produtivas e desempenho sob a perspectiva enxuta.

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise comparativa da viabilidade técnico-produtiva entre o sistema em alvenaria estrutural com laje treliçada e o sistema de laje em concreto protendido + vedação convencional, sob a ótica dos princípios do Lean Construction, considerando sua aplicação em edifícios residenciais de médio padrão classificados como R5 conforme estabelecido pelo Código de Zoneamento do município de Cabedelo–PB. Pretende-se avaliar aspectos como fluxo de produção, variabilidade, desperdícios, consumo e geração de valor, contribuindo para uma tomada de decisão mais fundamentada na fase de concepção e planejamento do empreendimento.

Espera-se que os resultados desta pesquisa ampliem a compreensão acerca do desempenho produtivo desses sistemas construtivos e forneçam subsídios técnicos para profissionais e empresas que buscam soluções mais eficientes, competitivas e alinhadas aos conceitos da construção enxuta.

1.1 Problema de pesquisa

Ao analisar o tema em questão, observa-se que ambos os sistemas construtivos apresentam vantagens relevantes quando comparados ao modelo estrutural tradicional em concreto armado moldado in loco, caracterizado por lajes maciças apoiadas em vigas e pilares. Entretanto, quando aplicados em edificações residenciais multifamiliares, esses sistemas podem apresentar comportamentos produtivos distintos em relação à organização do processo construtivo, ao nível de repetitividade das atividades, à complexidade das interfaces entre equipes e à previsibilidade da execução

Nesse contexto, torna-se pertinente investigar: Considerando o fluxo produtivo, o tempo de ciclo, racionalização da execução e geração de valor, qual sistema construtivo — alvenaria estrutural com laje treliçada ou concreto protendido com vedação convencional — apresenta melhor viabilidade técnico-produtiva sob a ótica dos princípios do Lean Construction em edifícios residenciais de médio padrão classificados no (R5) do município de cabedelo ?

1.2 Proposições de análise comparativa

Considerando que o presente estudo não se fundamenta em testes estatísticos ou modelagens inferenciais, mas sim em uma análise técnico-comparativa baseada em indicadores produtivos extraídos da interpretação de projetos, optou-se por estruturar a investigação a partir de proposições de análise comparativa, em substituição à formulação tradicional de hipóteses estatísticas.

As proposições têm como finalidade orientar a interpretação dos resultados e permitir a análise crítica das implicações produtivas associadas a cada sistema construtivo sob a ótica dos princípios do Lean Construction.

A primeira proposição considera que sistemas construtivos com maior nível de padronização e repetitividade das atividades tendem a apresentar maior estabilidade do fluxo produtivo, favorecendo a redução da variabilidade e a melhoria da previsibilidade do planejamento da obra, conforme discutido por Koskela (1992) e Ballard (2000).

Nesse sentido, espera-se que o sistema em alvenaria estrutural apresente maior regularidade no fluxo de execução das atividades, em função da integração entre estrutura e vedação, da redução de interfaces entre equipes e da maior repetitividade das operações executivas.

A segunda proposição refere-se à geração de valor ao usuário final da edificação. De acordo com os princípios do Lean Thinking, o valor deve ser definido a partir da perspectiva do cliente (WOMACK; JONES, 1996). Nesse contexto, considera-se que sistemas estruturais capazes de proporcionar melhor aproveitamento espacial podem apresentar maior potencial de geração de valor ao longo do ciclo de vida da edificação.

Assim, admite-se que o sistema em concreto protendido possa apresentar vantagens relacionadas a razão da possibilidade de vencer maiores vãos estruturais e reduzir a quantidade de pilares, permitindo maior liberdade na organização dos ambientes internos.

Por fim, considera-se que a comparação entre os dois sistemas construtivos deve levar em conta simultaneamente aspectos de transformação, fluxo e geração de valor, conforme proposto pela teoria Transformação-Fluxo-Valor (TFV) apresentada por Koskela (1992), permitindo uma análise mais abrangente das implicações produtivas associadas a cada solução estrutural.

1.3 Justificativa

A escolha adequada do sistema construtivo tem papel determinante no desempenho produtivo dos empreendimentos de construção civil, influenciando diretamente aspectos como prazo, custo, geração de desperdícios e previsibilidade da execução. Em um cenário de crescente competitividade no setor, torna-se cada vez mais relevante desenvolver estudos que auxiliem na tomada de decisão ainda nas fases iniciais de concepção e planejamento das edificações.

Nesse cenário, os princípios do Lean Construction tem se consolidado como uma importante abordagem para a gestão da produção na construção civil, ao propor a eliminação de atividades que não agregam valor, a estabilização dos fluxos produtivos, a redução da variabilidade e o aumento da confiabilidade do planejamento. Entretanto, a efetiva aplicação dos princípios enxutos depende, entre outros fatores, da adequação dos sistemas construtivos adotados, uma vez que diferentes soluções estruturais impõem distintas demandas operacionais, níveis de padronização e complexidade executiva.

No segmento de edificações residenciais de médio padrão, especialmente aquelas classificadas como R5, destacam-se como alternativas tecnicamente viáveis a alvenaria estrutural associada à laje treliçada e o sistema em concreto protendido com vedação convencional. Embora ambos sejam amplamente utilizados no mercado brasileiro, observa-se que grande parte dos estudos existentes concentra-se em análises estruturais ou econômicas isoladas, havendo relativa carência de investigações que comparem esses sistemas sob a ótica integrada da viabilidade técnico-produtiva e dos princípios do Lean Construction.

Adicionalmente, a crescente demanda por empreendimentos mais competitivos, com prazos reduzidos, maior previsibilidade de custos e melhor atendimento às necessidades do usuário final, torna ainda mais relevante a compreensão do comportamento produtivo desses sistemas. Em particular, aspectos como tempo de ciclo, continuidade do fluxo de produção, geração de desperdícios e flexibilidade de uso ao longo da vida útil da edificação configuram-se como variáveis estratégicas para a tomada de decisão na fase de concepção do empreendimento.

Dessa forma, justifica-se a realização do presente estudo pela necessidade de aprofundar a análise comparativa entre a alvenaria estrutural e o concreto protendido sob a

perspectiva da construção enxuta, contribuindo para o avanço do conhecimento técnico-científico e oferecendo subsídios práticos a projetistas, construtoras e gestores de obras na escolha de soluções estruturais mais eficientes e alinhadas aos princípios do Lean Construction.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Realizar uma análise comparativa da viabilidade técnico-produtiva entre o sistema construtivo em alvenaria estrutural com laje treliçada e o sistema de laje em concreto protendido + alvenaria convencional, sob a ótica dos princípios do Lean Construction, considerando sua aplicação em edificações residenciais de médio padrão classificadas como R5 no município de Cabedelo–PB.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Caracterizar os princípios fundamentais do Lean Construction e sua aplicabilidade na gestão da produção nas etapas de superestrutura e vedações na construção civil;
- Descrever tecnicamente o sistema em alvenaria estrutural com laje treliçada, destacando suas etapas executivas, recursos empregados e características produtivas;
- Descrever tecnicamente o sistema de laje em concreto protendido, enfatizando seus requisitos de projeto, execução e controle tecnológico;
- Comparar os dois sistemas quanto aos aspectos de fluxo de produção, variabilidade, geração de desperdícios, tempo de ciclo e confiabilidade do planejamento;
- Avaliar a compatibilidade de cada sistema com os princípios da construção enxuta, tais como redução de atividades que não agregam valor, melhoria contínua e produção puxada;
- Identificar vantagens e limitações técnico-produtivas de cada método construtivo para edificações residenciais de médio porte;
- Fornecer subsídios técnicos que auxiliem na tomada de decisão quanto à escolha do sistema estrutural mais alinhado aos conceitos do Lean Construction.

3 A INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL E OS DESAFIOS PRODUTIVOS

Os desafios estruturais apresentados na construção civil estão relacionados à sua forma de organização produtiva, marcada por fragmentação, elevada variabilidade e baixa previsibilidade dos processos. Segundo (KOSKELA, 1992), o modelo tradicional do setor, centrado apenas na transformação, desconsidera aspectos fundamentais como o fluxo contínuo e a geração de valor, comprometendo a eficiência global da produção.

Nesse contexto, estudos evidenciam que falhas no planejamento, ausência de padronização e deficiências logísticas contribuem diretamente para a ocorrência de retrabalho e instabilidade no andamento das obras (FORMOSO et al., 2002). Além disso, a variabilidade dos processos construtivos, destacada por (BALLARD; HOWELL, 1998), reduz a confiabilidade dos prazos e dificulta o controle da produção.

Outro fator relevante é a complexidade inerente ao setor, caracterizado pela produção sob encomenda, pela forte dependência de mão de obra e pela influência de condições externas, o que exige maior nível de coordenação e controle das atividades (HOWELL, 1999). Dessa forma, torna-se fundamental a adoção de modelos gerenciais que promovam maior integração entre os agentes envolvidos, bem como a racionalização e a melhoria contínua dos processos produtivos.

3.1 Lean construction: Fundamentos, evolução e aplicações

O Lean Construction tem origem nos princípios do Sistema Toyota de Produção, desenvolvido por Taiichi Ohno (OHNO, 1988), cujo foco central é a eliminação sistemática de desperdícios (muda) e a maximização do valor entregue ao cliente. O pensamento enxuto foi consolidado por James P. Womack e Daniel T. Jones (WOMACK; JONES, 1996), que definiram cinco princípios fundamentais:

- I. Definir valor sob a perspectiva do cliente;
- II. Mapear o fluxo de valor;
- III. Criar fluxo contínuo;
- IV. Estabelecer produção puxada;
- V. Buscar a perfeição por meio da melhoria contínua.

A adaptação desses conceitos para a construção foi sistematizada por Koskela (1992), ao propor a teoria TFV (Transformação-Fluxo-Valor). Diversos estudos apontam benefícios

da aplicação do Lean na construção, tais como a implementação de práticas como planejamento de médio prazo e análise de restrições têm demonstrado impactos positivos na estabilidade do fluxo produtivo. Assim, a filosofia Lean apresenta-se como referencial consistente para avaliação de sistemas construtivos sob a ótica da eficiência produtiva.

3.2 Sistema em alvenaria estrutural

A alvenaria estrutural constitui um sistema construtivo no qual as paredes desempenham simultaneamente as funções de vedação e de elemento resistente da estrutura, sendo responsáveis pela absorção e transmissão das cargas verticais e horizontais até as fundações. Diferentemente do sistema convencional em concreto armado, que separa as funções estruturais (pilares e vigas) das funções de vedação, a alvenaria estrutural integra essas funções em um único elemento, promovendo significativa racionalização construtiva. Segundo (RAMALHO; CORRÊA, 2003), essa integração reduz o número de etapas executivas, simplifica o processo produtivo e favorece maior previsibilidade da execução, sobretudo em empreendimentos com certa repetitividade de pavimentos tipo, como é o caso de edificações residenciais multifamiliares de médio porte.

A racionalização construtiva constitui um dos principais fatores associados ao aumento da produtividade na construção civil. De acordo com (SABBATINI, 2003), sistemas construtivos racionalizados são caracterizados pela padronização de componentes, repetitividade das atividades, simplificação das etapas executivas e melhor organização do canteiro de obras. Essas características contribuem para a redução da variabilidade do processo produtivo, diminuição de desperdícios e maior previsibilidade do planejamento da obra. Nesse contexto, sistemas como a alvenaria estrutural e as lajes pré-fabricadas apresentam potencial significativo de ganho de produtividade quando comparados a métodos tradicionais de construção, sobretudo em empreendimentos com elevado grau de repetitividade de pavimentos.

Do ponto de vista técnico, a eficiência do sistema depende diretamente da modulação dimensional e da compatibilização prévia dos projetos arquitetônico, estrutural e de instalações. A ausência dessa compatibilização pode gerar retrabalhos significativos, uma vez que intervenções posteriores em paredes estruturais comprometem o comportamento global da edificação. Ademais, em obras em alvenaria estrutural, a interferência entre projetos tende a ser elevada, visto que a manutenção do módulo influencia diretamente o projeto

arquitetônico, enquanto a limitação para a execução de rasgos ou aberturas destinados à passagem de instalações nas paredes condiciona de forma marcante os projetos elétricos e hidrossanitários, exigindo rigoroso controle e planejamento prévio. (RAMALHO; CORRÊA, 2003) destacam que o planejamento antecipado é condição indispensável para o bom desempenho do sistema, pois a alvenaria estrutural apresenta menor liberdade para alterações durante a fase de execução quando comparada a sistemas convencionais. Essa característica, embora imponha maior rigor na fase de projeto, contribui para maior controle do processo construtivo.

A regulamentação técnica do sistema é estabelecida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas por meio da NBR 15961 (2011), que define critérios para projeto, execução e controle da alvenaria estrutural. A normatização estabelece parâmetros para dimensionamento, resistência dos blocos, grauteamento, detalhamento de armaduras e controle tecnológico, contribuindo para padronização e redução de variabilidade na execução. Essa padronização técnica está alinhada com os princípios do Lean Construction, especialmente no que se refere à estabilização do fluxo produtivo e à redução de incertezas no canteiro de obras.

Sob a perspectiva produtiva, a alvenaria estrutural apresenta vantagens relevantes, como a redução do uso de formas de madeira, diminuição da quantidade de armaduras convencionais e menor geração de resíduos quando corretamente modulada (RAMALHO; CORRÊA, 2003). (SABBATINI, 2003) ressalta que sistemas racionalizados tendem a apresentar ganhos significativos de produtividade, uma vez que promovem repetitividade, organização do canteiro e melhor controle de materiais. Em empreendimentos residenciais padronizados, a execução sequencial das fiadas de blocos e o uso de lajes treliçadas pré-moldadas contribuem para a manutenção de ritmo constante de produção, favorecendo a continuidade do fluxo de trabalho.

Sob a ótica da filosofia proposta por (KOSKELA, 1992), que introduz a teoria Transformação-Fluxo-Valor, a alvenaria estrutural pode ser considerada um sistema que favorece a dimensão “fluxo” da produção, pois reduz interferências entre equipes, minimiza dependências complexas e promove maior estabilidade operacional. Entretanto, como limitação, o sistema apresenta menor flexibilidade arquitetônica, sobretudo em relação à abertura de grandes vãos ou alterações de layout, o que pode restringir o potencial de personalização do produto final. Assim, sua aplicação mostra-se particularmente eficiente em

empreendimentos com elevado grau de repetição e padronização, nos quais a estabilidade produtiva constitui fator estratégico.

Sob a abordagem do Lean Construction, a associação entre alvenaria estrutural e laje treliçada tende a proporcionar maior eficiência produtiva em empreendimentos habitacionais repetitivos.

3.3 Laje treliçada

As lajes nervuradas constituem solução estrutural eficiente para redução do peso próprio e otimização do consumo de concreto, mantendo adequado desempenho resistente quando corretamente dimensionadas e detalhadas conforme os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 6118. O comportamento estrutural dessas lajes depende da adequada solidarização entre nervuras e capa de compressão, bem como do correto posicionamento das armaduras, aspectos fundamentais para garantir o desempenho em serviço (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2004).

A laje treliçada com enchimento em poliestireno expandido (EPS) constitui um sistema de laje pré-fabricada amplamente empregado em edificações residenciais no Brasil, destacando-se pela leveza e pela racionalização construtiva quando comparada a soluções tradicionais, como lajes treliçadas com lajota cerâmica ou lajes maciças de concreto. Nesse sistema, o EPS atua como elemento inerte de enchimento, substituindo materiais cerâmicos e contribuindo para a redução do peso próprio da estrutura, podendo ser significativamente mais leve que a lajota cerâmica (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2004).

Do ponto de vista produtivo, a laje treliçada com EPS apresenta vantagens relevantes, como a rapidez de montagem, a padronização do processo executivo, a redução do consumo de concreto na capa de compressão e a diminuição do uso de formas de madeira. Essas características favorecem a continuidade do fluxo produtivo e a repetitividade das operações, aspectos alinhados aos princípios do Lean Construction, que preconizam a eliminação de desperdícios e a estabilização dos processos construtivos (KOSKELA, 1992; FORMOSO et al., 2002). Em função dessas propriedades, o sistema mostra-se especialmente indicado para situações envolvendo vãos pequenos e médios, empreendimentos com elevada repetitividade como habitações de múltiplos pavimentos e contextos em que se busca

aumento de produtividade e redução do peso próprio estrutural.

Conforme Carvalho e Figueiredo Filho (2004), para vãos maiores tipicamente superiores a 6 m a altura necessária da vigota treliçada tende a crescer significativamente para garantir a rigidez e o atendimento aos estados limites de serviço, o que pode reduzir a competitividade do sistema. Os autores destacam que, para vãos residenciais correntes, geralmente situados entre 3 m e 5 m (como em dormitórios e salas), a laje treliçada pré-moldada tende a representar uma solução de equilíbrio técnico e econômico particularmente eficiente.

Do ponto de vista normativo, as lajes treliçadas são plenamente admitidas em edificações residenciais, desde que dimensionadas conforme os critérios da ABNT NBR 6118 e produzidas segundo os requisitos da ABNT NBR 14859. Nesse sistema, o elemento de enchimento seja em EPS ou material cerâmico é considerado não estrutural, sendo a capacidade resistente garantida pelo conjunto formado pela vigota treliçada e pelo concreto moldado in loco da capa de compressão.

Entretanto, o sistema também apresenta limitações técnicas. O EPS possui baixa absorção de água, o que exige cuidados específicos na execução de chapisco e revestimentos, normalmente demandando o uso de aditivos colantes para garantir adequada aderência. Além disso, a laje treliçada não é indicada para grandes balanços sem a adoção de reforços estruturais apropriados, devendo seu emprego respeitar rigorosamente as recomendações de projeto e as verificações estabelecidas pela ABNT NBR 6118. Ressalta-se ainda que os limites efetivos de vão devem sempre ser definidos por meio de dimensionamento estrutural específico, considerando as condições de carregamento, a geometria da laje e as especificações do fabricante das vigotas (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2004).

A associação entre lajes treliçadas com enchimento em EPS e o sistema de alvenaria estrutural mostra-se tecnicamente compatível e produtivamente eficiente, uma vez que ambos compartilham a lógica de industrialização e racionalização do canteiro. Sob o aspecto estrutural, a redução do peso próprio proporcionada pelo EPS contribui para o alívio das cargas transmitidas às paredes portantes, podendo resultar em menor exigência de resistência dos blocos e em soluções de fundação mais econômicas (RAMALHO; CORRÊA, 2003).

Sob a ótica do Lean Construction, essa combinação favorece a sincronia do fluxo produtivo, pois tanto a alvenaria estrutural quanto a laje treliçada baseiam-se em processos

predominantemente de montagem, com elevada repetitividade e menor dependência de fôrmas convencionais. Ademais, o EPS permite fácil conformação para passagem de eletrodutos e tubulações antes da concretagem da capa, reduzindo a necessidade de intervenções posteriores e, conseqüentemente, a geração de retrabalhos e resíduos — desperdícios classicamente combatidos pela filosofia enxuta (KOSKELA, 1992; BALLARD; HOWELL, 1998).

Por fim, destaca-se que o EPS apresenta desempenho termoacústico favorável, contribuindo para o atendimento dos requisitos de desempenho estabelecidos pela ABNT NBR 15575, especialmente no que se refere ao conforto térmico das edificações residenciais. Dessa forma, a utilização de lajes treliçadas com EPS, quando corretamente projetada e executada, pode agregar valor técnico e funcional ao empreendimento.

3.4 Sistema em concreto protendido

O concreto protendido é um sistema estrutural que consiste na introdução prévia de tensões de compressão em elementos de concreto por meio do tensionamento de cabos de aço de alta resistência, denominados cordoalhas, com o objetivo de neutralizar ou reduzir as tensões de tração decorrentes das cargas atuantes na estrutura. O desenvolvimento e consolidação dessa tecnologia são atribuídos aos estudos pioneiros de Eugène Freyssinet, na década de 1920, sendo posteriormente aprofundados por (LEONHARDT, 1979), que sistematizou seus fundamentos teóricos e aplicações práticas.

O princípio básico da protensão fundamenta-se na melhoria do comportamento mecânico do concreto, material que apresenta elevada resistência à compressão, porém baixa resistência à tração. Ao aplicar compressão prévia nas regiões tracionadas, o sistema reduz a fissuração, controla deformações excessivas e possibilita maior aproveitamento da capacidade resistente do material. Segundo (LEONHARDT, 1979), a protensão permite a execução de lajes com menores espessuras e maiores vãos livres, sendo particularmente vantajosa em estruturas que demandam maior esbeltez e flexibilidade arquitetônica, favorecendo soluções economicamente competitivas em determinadas situações.

A protensão em estruturas de concreto pode ser classificada, de forma geral, segundo o momento de aplicação da força de protensão e quanto à condição de aderência entre o aço e o concreto. De acordo com (LEONHARDT, 1980) e (PFEIL, 2000), os principais tipos são a

protensão pré-tracionada e a pós-tracionada, podendo esta última ser subdividida em sistemas aderentes e não aderentes.

A protensão pré-tracionada (ou pré-tensionada) caracteriza-se pela aplicação da força de protensão nos cabos antes da concretagem do elemento estrutural. Após o endurecimento do concreto, os cabos são liberados, transferindo a força por aderência ao longo do comprimento da peça. Esse processo é típico de elementos pré-fabricados produzidos em pista de protensão, como vigotas, lajes alveolares e dormentes ferroviários, apresentando elevado controle industrial e boa uniformidade de qualidade (LEONHARDT, 1980; LIN, 1981).

Já a protensão pós-tracionada (ou pós-tensionada) ocorre quando os cabos são tensionados após o endurecimento do concreto. Nesse caso, os cabos são previamente posicionados em bainhas ou revestimentos e, após a cura do concreto, são tracionados por meio de macacos hidráulicos, conforme procedimentos estabelecidos pela (ABNT NBR 7197). Esse método é amplamente utilizado em estruturas moldadas in loco, especialmente em lajes de edifícios.

Quanto à aderência, a pós-tração pode ser classificada em aderente e não aderente. Na protensão aderente, após o tensionamento, realiza-se a injeção de nata de cimento nas bainhas, promovendo aderência entre o aço e o concreto ao longo do comprimento do cabo. Esse sistema proporciona maior redundância estrutural e melhor distribuição de esforços, sendo comum em pontes e vigas protendidas (PFEIL, 2000).

Por sua vez, na protensão não aderente — frequentemente executada com cordoalhas engraxadas e plastificadas — não há injeção posterior, e a transferência de esforços ocorre predominantemente nas ancoragens. Esse sistema apresenta maior rapidez executiva e menor complexidade de obra, sendo amplamente empregado em lajes planas de edifícios residenciais e comerciais (LEONHARDT, 1980; ABNT NBR 7197).

Em síntese, a escolha entre os diferentes tipos de protensão deve considerar aspectos estruturais, construtivos e produtivos, uma vez que cada sistema apresenta implicações distintas quanto ao controle executivo, à velocidade de montagem e à adequação ao processo construtivo.

A regulamentação do sistema no Brasil é estabelecida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas por meio da (ABNT NBR 6118, 2023), que trata do projeto de estruturas de

concreto, incluindo disposições específicas para elementos protendidos. A norma exige controle rigoroso das etapas de tensionamento, verificação das perdas de protensão, inspeção dos equipamentos e atendimento aos critérios de segurança estrutural. (PFEIL, 2000) destaca que a qualidade da execução é fator determinante para o desempenho do sistema e complementa que o emprego da protensão exige maior rigor no controle executivo e no detalhamento, o que pode impactar a organização da produção, uma vez que falhas no processo de protensão podem comprometer a integridade estrutural.

Do ponto de vista construtivo, (FUSCO, 2002) destaca que a eficiência dos sistemas em concreto depende não apenas do dimensionamento estrutural adequado, mas também da correta sequência de montagem, posicionamento das armaduras, qualidade da concretagem e controle tecnológico. Nesse sentido, a análise comparativa entre diferentes soluções estruturais deve considerar não apenas o desempenho resistente, mas também os efeitos sobre a produtividade, a previsibilidade e a racionalização da obra.

Do ponto de vista produtivo, o concreto protendido apresenta características distintas da alvenaria estrutural. Embora possibilite redução da quantidade de pilares e maior liberdade espacial, o sistema exige maior grau de especialização técnica, planejamento detalhado e controle tecnológico mais rigoroso. A execução envolve etapas críticas, como posicionamento das cordoalhas, concretagem, cura, tensionamento e injeção, demandando sincronização precisa entre equipes e equipamentos. Essa complexidade aumenta a sensibilidade do processo a atrasos e falhas operacionais.

Sob a ótica do Lean Construction, conforme discutido por (BALLARD, 2000), sistemas com elevada interdependência técnica tendem a apresentar maior variabilidade caso não haja planejamento colaborativo eficiente e controle sistemático das restrições. O concreto protendido pode contribuir significativamente para a geração de valor ao cliente, conceito central defendido por (WOMACK; JONES, 1996), ao proporcionar plantas mais flexíveis, maior aproveitamento de área útil e melhor desempenho estrutural. Contudo, essa agregação de valor deve ser equilibrada com a necessidade de estabilidade do fluxo produtivo, princípio enfatizado por (KOSKELA, 1992).

Assim, embora o concreto protendido apresente vantagens estruturais e arquitetônicas significativas, sua aderência aos princípios Lean depende fortemente da maturidade gerencial da empresa executora, da integração entre projeto e obra e da capacidade de planejamento

antecipado. Quando adequadamente gerenciado, o sistema pode reduzir consumo de materiais e etapas construtivas; porém, quando mal coordenado, pode introduzir variabilidade e comprometer a confiabilidade do cronograma.

3.5 Classificação R5 e condicionantes urbanísticas

A definição do sistema estrutural de uma edificação não depende exclusivamente de critérios técnicos e econômicos, mas também de condicionantes legais e urbanísticos estabelecidos pela legislação municipal. No caso do município de Cabedelo–PB, o Código de Zoneamento e Uso e Ocupação do Solo estabelece parâmetros que influenciam diretamente a concepção arquitetônica e estrutural das edificações residenciais.

A classificação R5 refere-se, de modo geral, a edificações residenciais multifamiliares de médio porte, caracterizadas por maior densidade construtiva quando comparadas a residências unifamiliares ou edificações de menor gabarito. Esse enquadramento costuma permitir edificações compostas por térreo, múltiplos pavimentos tipo e cobertura, respeitando limites de altura, taxa de ocupação, coeficiente de aproveitamento e recuos obrigatórios.

Esses parâmetros urbanísticos influenciam diretamente:

- A modulação estrutural;
- O dimensionamento de vãos;
- A espessura das lajes;
- A distribuição de cargas;
- A organização do canteiro de obras.

O coeficiente de aproveitamento, por exemplo, impacta a área total edificável no lote, podendo induzir soluções estruturais que maximizem a eficiência espacial. Já o gabarito máximo condiciona o número de pavimentos e, conseqüentemente, as cargas acumuladas na estrutura. Assim, a escolha entre alvenaria estrutural e concreto protendido deve considerar o comportamento estrutural ao longo da altura da edificação e sua compatibilidade com os limites legais.

Além disso, em edificações R5, a repetitividade dos pavimentos tipo é uma característica comum, favorecendo sistemas construtivos que se beneficiem de padronização e modulação. Essa repetitividade pode ser explorada como estratégia de racionalização produtiva, especialmente sob a ótica do Lean Construction, ao permitir maior estabilidade do

fluxo de trabalho e melhor previsibilidade das atividades.

Outro aspecto relevante diz respeito às exigências de desempenho previstas na Associação Brasileira de Normas Técnicas por meio da NBR 15575 (ABNT, 2013), que estabelece critérios de desempenho estrutural, acústico, térmico e de durabilidade para edificações habitacionais. Tais exigências influenciam tanto a concepção da alvenaria estrutural quanto do concreto protendido, impactando decisões relativas a espessuras, detalhamento e controle tecnológico.

Portanto, a análise comparativa entre os sistemas não pode dissociar-se do contexto urbano e normativo no qual o empreendimento está inserido. A compatibilidade entre legislação, desempenho técnico e eficiência produtiva constitui elemento essencial para uma tomada de decisão fundamentada.

3.6 Integração entre sistemas estruturais e os princípios do Lean Construction

A relação entre o sistema estrutural adotado e os princípios do Lean Construction é um dos pontos centrais desta pesquisa. Conforme Koskela (1992), a eficiência produtiva depende da capacidade de reduzir variabilidade, estabilizar fluxos e eliminar atividades que não agregam valor. Nesse sentido, o sistema construtivo exerce influência direta sobre a organização da produção no canteiro.

A alvenaria estrutural, por integrar função estrutural e vedação, reduz etapas construtivas interfaces entre equipes. Essa característica contribui para:

- Redução de retrabalho;
- Menor necessidade de formas e escoramentos;
- Simplificação da logística interna;
- Diminuição da variabilidade operacional.

Segundo Ballard e Howell (1998), a redução de interfaces e dependências complexas favorece o aumento da confiabilidade do planejamento. Em sistemas altamente fragmentados, pequenas falhas podem gerar efeito cascata, comprometendo o fluxo produtivo. Assim, a simplificação proporcionada pela alvenaria estrutural pode favorecer a aplicação do Last Planner System (BALLARD, 2000), aumentando o Percent Plan Complete (PPC) e a previsibilidade das atividades.

Por outro lado, o concreto protendido apresenta características distintas. A possibilidade de vencer grandes vãos e reduzir a quantidade de pilares proporciona maior flexibilidade arquitetônica e melhor aproveitamento dos espaços, agregando valor ao produto final, conceito central do Lean Thinking, conforme James P. Womack e Daniel T. Jones (1996). Entretanto, essa vantagem vem acompanhada de maior complexidade técnica.

A etapa de protensão exige planejamento detalhado, controle rigoroso de prazos e integração entre projeto estrutural e execução. Qualquer atraso ou falha na liberação de frentes de serviço pode interromper o fluxo produtivo, gerando desperdícios por espera — um dos sete desperdícios clássicos definidos por Taiichi Ohno (1988).

Sob a perspectiva Lean, é possível afirmar que em relação ao sistema tradicional:

- A alvenaria estrutural tende a favorecer estabilidade e padronização;
- O concreto protendido tende a agregar valor por desempenho estrutural e flexibilidade espacial.

Entretanto, a aderência aos princípios Lean não depende exclusivamente do sistema estrutural, mas da forma como o processo é gerenciado. Howell (1999) destaca que a construção enxuta é essencialmente uma mudança cultural e gerencial, não apenas tecnológica.

Assim, a comparação entre os sistemas deve considerar critérios como:

- Capacidade de promover fluxo contínuo;
- Nível de variabilidade executiva;
- Exigência de coordenação interdisciplinar;
- Consumo para produção de mesma unidade;
- Contribuição para o valor percebido pelo cliente.

Dessa forma, a análise integrada entre tecnologia construtiva e filosofia Lean permite compreender que a eficiência produtiva não está apenas na escolha do sistema estrutural, mas na compatibilidade entre sistema, planejamento e gestão da produção.

4 METODOLOGIA

A presente pesquisa está inserida no campo da Engenharia Civil, com ênfase em tecnologia das construções e gestão da produção, sendo classificada como pesquisa aplicada de caráter técnico-comparativo. O estudo busca analisar dois sistemas estruturais empregados em edificações residenciais multifamiliares sob a ótica dos princípios do Lean Construction, com o objetivo de subsidiar decisões técnicas relacionadas à escolha de sistemas construtivos mais eficientes do ponto de vista produtivo.

Do ponto de vista da abordagem, trata-se de um estudo qualitativo com suporte analítico quantitativo comparativo, fundamentado na interpretação técnica de projetos arquitetônicos e estruturais. A dimensão qualitativa permite compreender de forma sistêmica a influência dos sistemas estruturais sobre o fluxo produtivo, a variabilidade dos processos e a geração de valor ao cliente, conceitos amplamente discutidos na literatura do Lean Construction (WOMACK; JONES, 1996; KOSKELA, 1992). Já o suporte quantitativo ocorre por meio da análise comparativa de indicadores técnico-produtivos extraídos da interpretação dos projetos.

No contexto da construção civil, a aplicação dos princípios do Lean Construction envolve, de modo geral, o uso de ferramentas associadas ao gerenciamento da produção, planejamento colaborativo, gestão de recursos e controle sistemático das atividades executivas. Entretanto, considerando que o presente estudo se fundamenta na análise de projetos arquitetônicos e estruturais, sem acompanhamento direto da execução em campo, a abordagem metodológica adotada concentra-se predominantemente na análise do planejamento construtivo. Nesse sentido, são avaliados aspectos como o sequenciamento das atividades, o fluxo produtivo, a repetitividade dos processos e as interfaces entre equipes, parâmetros que podem ser inferidos a partir da análise dos projetos e que apresentam relação direta com os princípios do Lean Construction, especialmente aqueles relacionados à estabilidade do fluxo produtivo e à redução da variabilidade dos processos (KOSKELA, 1992; HOWELL, 1999; FORMOSO et al., 2002).

Quanto aos objetivos, a pesquisa apresenta caráter descritivo-analítico e comparativo, uma vez que:

- Descreve tecnicamente os sistemas construtivos adotados;

- Compara os quantitativos levantados;
- Analisa suas implicações produtivas;
- Compara sua aderência aos princípios da construção enxuta.

4.1 Unidade de análise

Com o objetivo de tornar o estudo mais funcional, o foco será direcionado especificamente para a etapa construtiva de superestrutura e vedação do pavimento tipo, adotando-se um único pavimento como unidade de ciclo no contexto do Lean Construction. Tal abordagem justifica-se pelo fato de que, em edificações residenciais de múltiplos pavimentos, o pavimento tipo concentra parcela significativa do esforço produtivo da obra em função de sua elevada repetitividade ao longo da execução, constituindo-se como unidade representativa para análise de desempenho produtivo. Estudos sobre indicadores de produção em edifícios verticais apontam que a avaliação por pavimento permite melhor compreensão do fluxo construtivo e da estabilidade do processo (SFREDDO, 2012).

Dessa forma, o ciclo produtivo considerado neste estudo corresponde à execução completa da **superestrutura e vedação de um pavimento tipo**, permitindo avaliar de forma comparativa os dois sistemas construtivos.

No que se refere aos procedimentos técnicos, o estudo fundamenta-se em:

- Pesquisa bibliográfica especializada;
- Análise documental dos projetos arquitetônicos e estruturais;
- Avaliação normativa conforme diretrizes da Associação Brasileira de Normas Técnicas;
- Aplicação de matriz comparativa baseada nos princípios do Lean Construction.

A fundamentação teórica da pesquisa baseia-se principalmente nos estudos de (KOSKELA, 1992), que introduziu o modelo Transformação-Fluxo-Valor para a compreensão dos processos produtivos na construção; em Womack e Jones (1996), que consolidaram o conceito de geração de valor na filosofia Lean; e em Ballard (2000), que desenvolveu contribuições relevantes relacionadas à confiabilidade do planejamento e ao controle da produção na construção civil.

Os quantitativos utilizados nesta pesquisa foram levantados considerando apenas os pavimentos que apresentam maior grau de similaridade entre os empreendimentos analisados,

especificamente o pavimento de garagem e os pavimentos habitacionais tipo.

Embora existam algumas diferenças construtivas entre esses pavimentos, suas características geométricas e estruturais apresentam maior nível de comparabilidade entre os dois sistemas construtivos avaliados.

A cobertura foi desconsiderada na análise, uma vez que apresenta características arquitetônicas e estruturais específicas em cada empreendimento, o que poderia introduzir distorções na comparação entre os sistemas construtivos estudados. Dessa forma, a exclusão desse pavimento nos quantitativos teve como objetivo garantir maior uniformidade nos parâmetros analisados e maior confiabilidade na comparação dos resultados obtidos.

4.2 Caracterização do objeto de estudo

Os projetos utilizados nesta pesquisa foram obtidos a partir de empreendimentos residenciais reais projetados para implantação no município de Cabedelo–PB. Entretanto, visando preservar informações estratégicas e comerciais das empresas responsáveis pelos projetos, bem como manter a confidencialidade dos dados técnicos utilizados na análise, optou-se pela anonimização dos empreendimentos. Dessa forma, ao longo deste trabalho os projetos são identificados como **Empreendimento A** e **Empreendimento B**, sendo mantidas apenas as informações necessárias para a análise técnico-produtiva dos sistemas construtivos adotados.

O objeto de estudo compreende dois empreendimentos residenciais multifamiliares projetados para implantação em zona classificada como R5 no município de Cabedelo–PB. Ambos possuem equivalência arquitetônica e funcional, permitindo análise comparativa isolando a variável “sistema estrutural”.

As principais características comuns aos dois empreendimentos são:

- Área aproximada de 240 m² de laje por pavimento tipo;
- Quatro apartamentos por pavimento;
- Térreo com pilotis;
- Quatro pavimentos tipo;
- Área de lazer na cobertura;
- piscina na cobertura;

- Reservatório no pavimento superior (caixa d'água);
- Padrão construtivo de médio porte.

A maior distinção entre os empreendimentos está no sistema estrutural adotado:

Empreendimento A:

Sistema em alvenaria estrutural com lajes nervuradas treliçadas.

Empreendimento B:

Sistema com laje maciça em concreto protendido e alvenaria convencional de vedação.

Essa equivalência tipológica garante coerência metodológica, permitindo que a comparação seja centrada nas implicações técnicas e produtivas do sistema estrutural

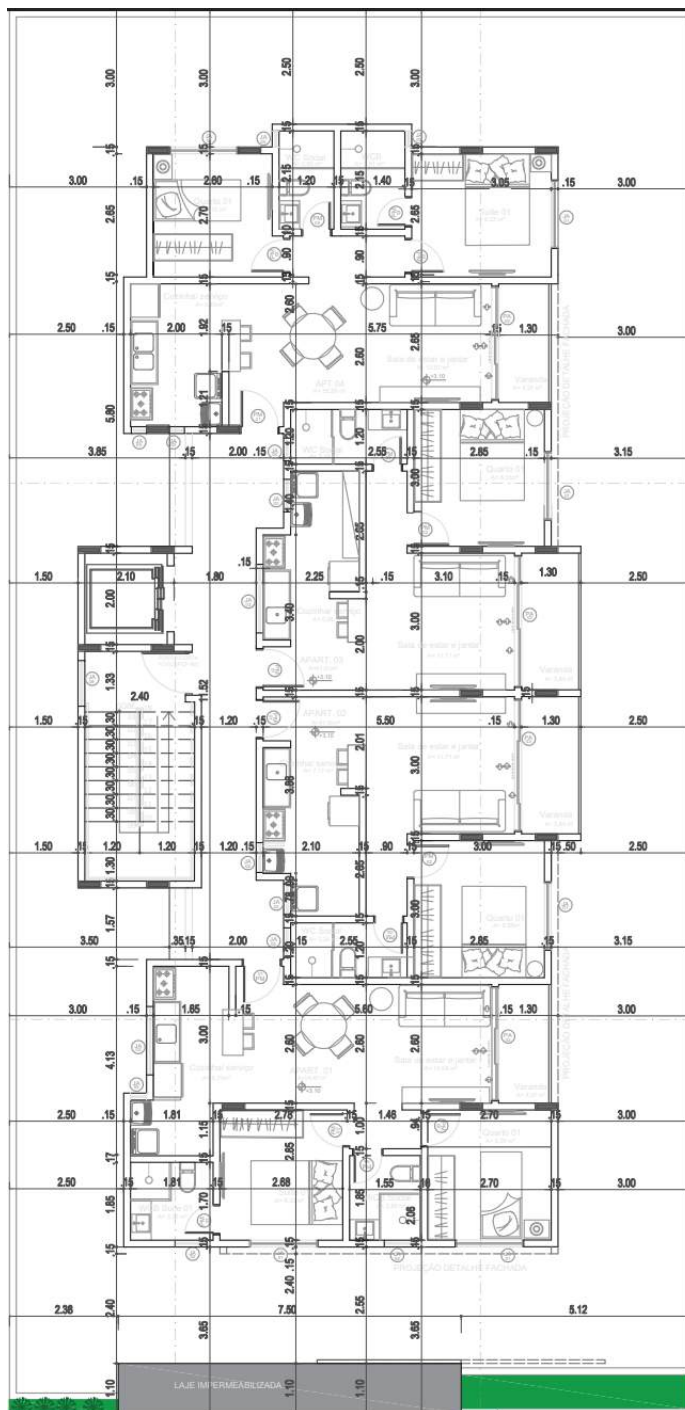
4.2.1 Descrevendo empreendimento A

- Área do terreno: 461,25 m²
- Área construída 1.244,40 m²
- Área de projeção ortogonal: 195,10 m²
- Área permeável: 56,69 m² ou 12,24%
- Área do pavimento tipo: 235,35 m²

O edifício em estudo é classificado como R5 conforme a Lei de Uso e Ocupação do Solo. A edificação é composta por pavimento térreo em pilotis, quatro pavimentos tipo e área de lazer com piscina na cobertura. Enquanto o reservatório elevado está situado no pavimento superior.

O pavimento tipo possui área total de 235,35 m², sendo subdividido em quatro unidades habitacionais por pavimento. Destas, duas apresentam área aproximada de 55 m² e as outras duas possuem cerca de 41 m².

Figura 1 - Planta baixa do pavimento tipo do projeto arquitetônico



Fonte: Projeto arquitetônico do empreendimento A no bairro Bela Vista (Cabedelo-PB)

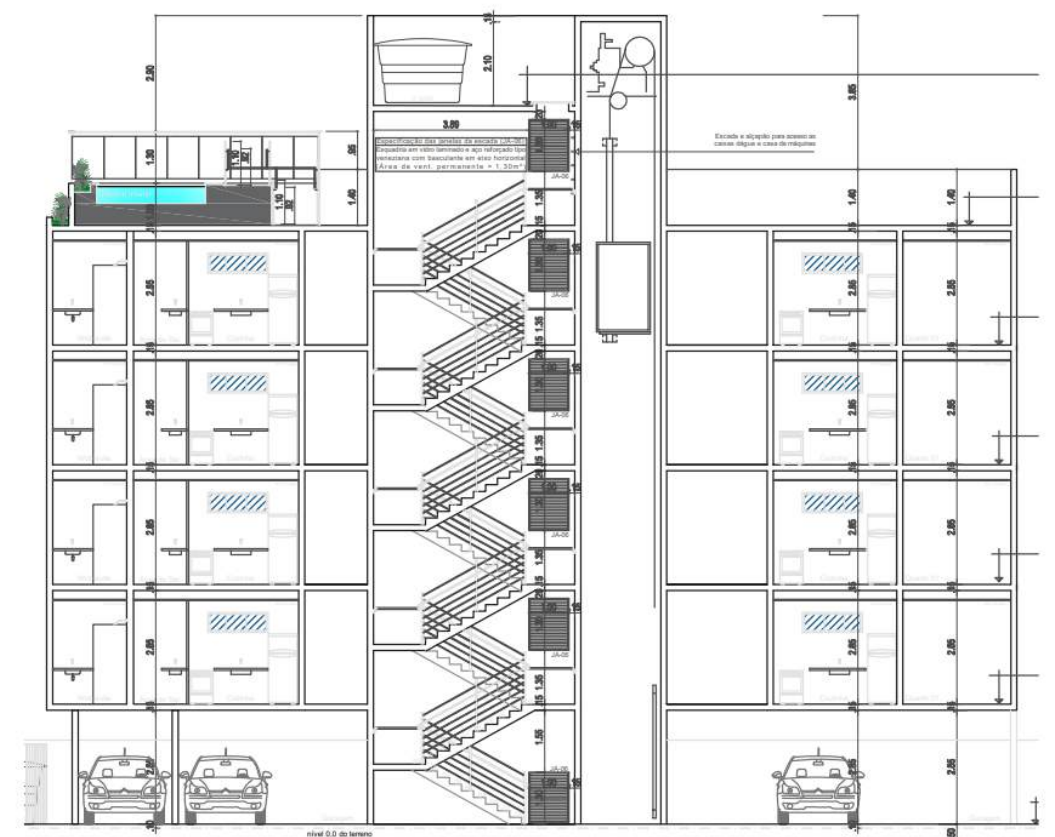
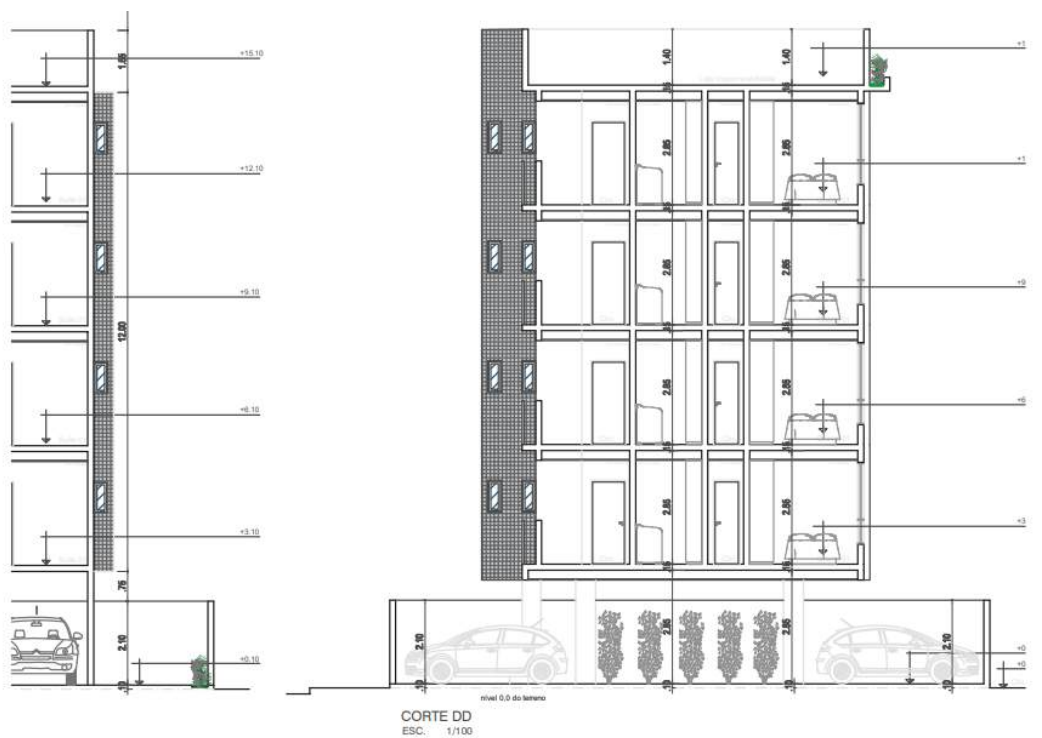
A concepção do empreendimento foi desenvolvida adotando-se majoritariamente o sistema de alvenaria estrutural. Como primeira etapa de análise, verifica-se a densidade de paredes estruturais. Segundo a literatura de Ramalho, valores entre 0,5 e 0,7 m de paredes estruturais por metro quadrado de pavimento são considerados usuais. Dentro desses limites, a densidade de paredes pode ser classificada como adequada, indicando que as condições de dimensionamento tendem a refletir um comportamento estrutural típico para esse sistema construtivo.

O empreendimento possui 184,28 m de parede

$$184,28/235,35 = 0,78 \text{ m/m}^2$$

Densidade que excede levemente a quantidade classificada adequada, o que sugere possível excesso de paredes portantes ou oportunidade de otimização estrutural, logo permite-se tratar algumas paredes como não estrutural.

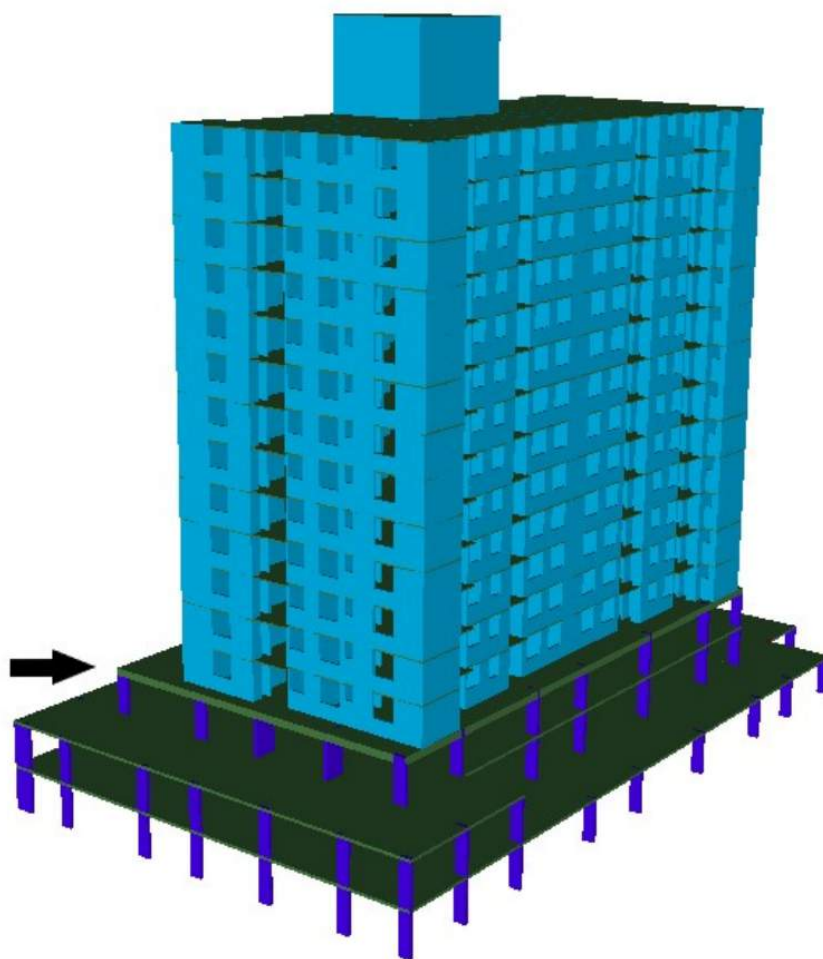
Figura 2 - Cortes do projeto arquitetônico



Fonte: Projeto arquitetônico do empreendimento A no bairro Bela Vista (Cabedelo-PB)

Para projetos arquitetônicos que possuem pavimento térreo em pilotis, é comumente adotado um sistema estrutural híbrido composto por alvenaria estrutural nos pavimentos superiores e concreto armado no pavimento térreo. Essa solução é empregada devido à incompatibilidade geométrica entre as paredes da garagem, no térreo, e as paredes dos pavimentos tipo, onde se localizam as unidades habitacionais. Como as paredes estruturais superiores nem sempre coincidem com os alinhamentos estruturais do pavimento térreo, adota-se uma laje de transição responsável por receber e redistribuir as cargas provenientes da alvenaria estrutural para os elementos estruturais inferiores. Esse sistema é popularmente conhecido como sistema de mesa ou pódio para alvenaria estrutural, no qual a laje de transição desempenha função semelhante à de uma mesa, servindo como base de apoio para as paredes estruturais dos pavimentos superior. Esta solução é mencionada na literatura de (PARSEKIAN, 2012).

Figura 3 - Sistema híbrido de mesa em concreto + alvenaria estrutural

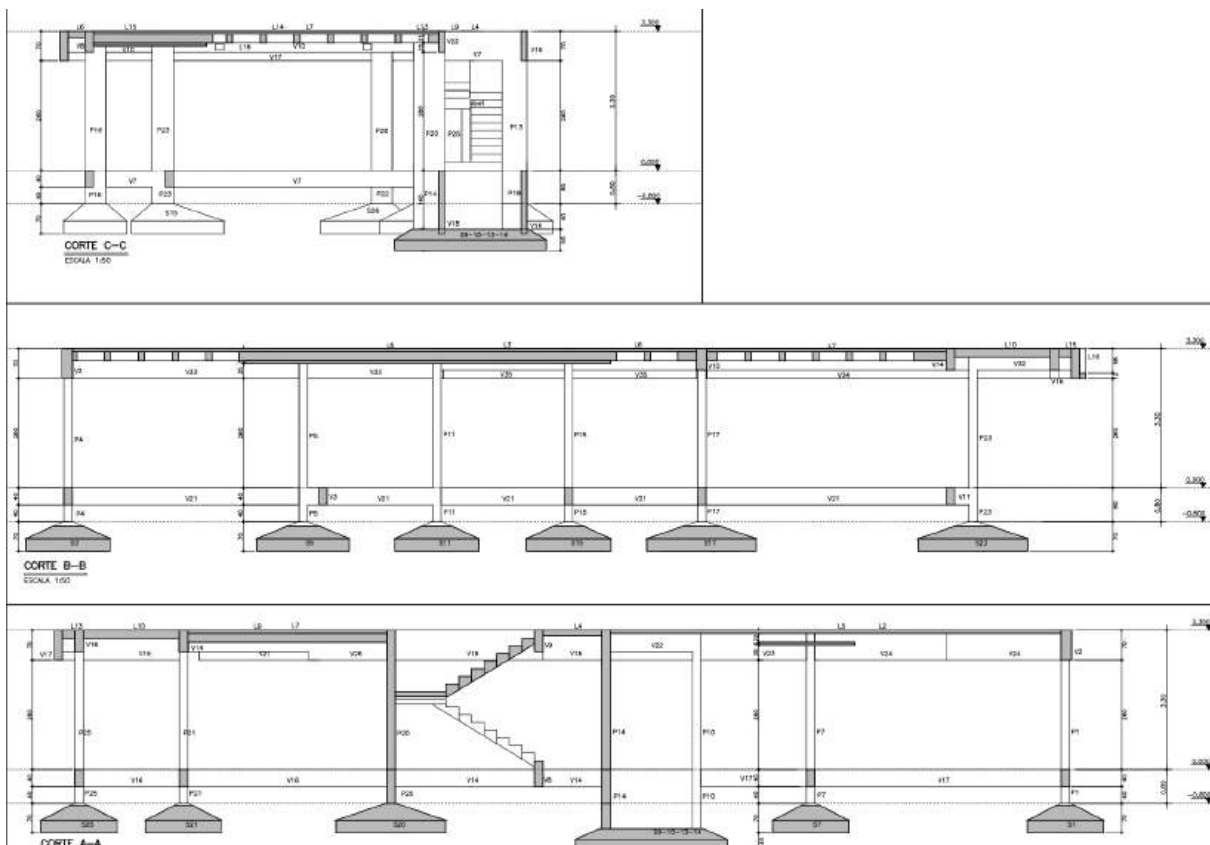


Fonte: Artigo Diego Badzinski Burlamaque (2019)

Segue detalhes e algumas pranchas do projeto estrutural:

- Cortes estruturais da mesa

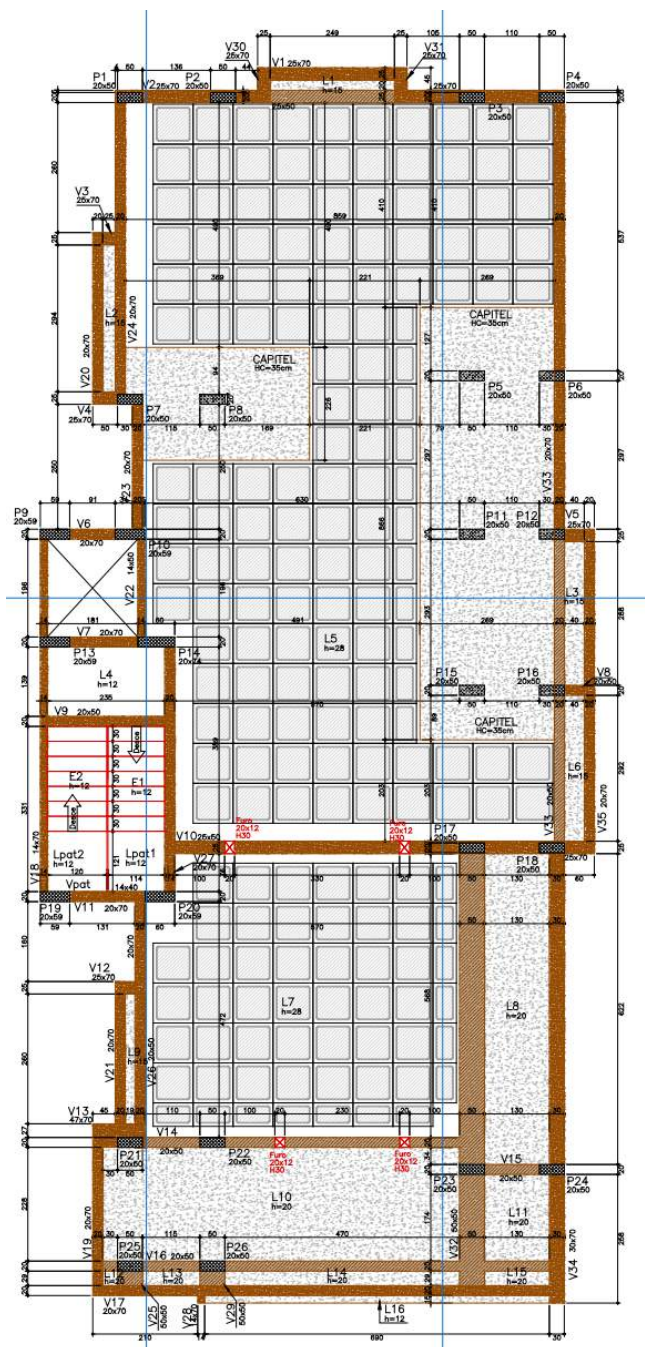
Figura 4 - Corte da estrutura base para alvenaria estrutural (mesa)



Fonte: Projeto estrutural de empreendimento A no bairro Bela Vista (Cabedelo–PB)

A laje de transição se deu estruturada como laje nervurada nas duas direções com capitéis e vigas apoiadas sobre pilares.

Figura 5 - Laje de transição laje nervurada



Fonte: Projeto estrutural do empreendimento A no bairro Bela Vista (Cabedelo-PB)

Figura 7 - Primeira fiada e representação da compatibilização com arquitetônico



Fonte: Projeto estrutural do empreendimento A no bairro Bela Vista (Cabedelo–PB)

Conclui-se que a superestrutura é composta por 26 pilares e 36 vigas, além de laje de transição executada em concreto armado, adotando-se o sistema de laje nervurada com capitéis. Nos pavimentos subsequentes, o pavimento-tipo repete-se por três níveis consecutivos. No quinto pavimento, entretanto, a planta de fôrma da laje de cobertura apresenta configuração distinta, em razão da necessidade de adequações estruturais para

suportar as cargas provenientes da piscina.

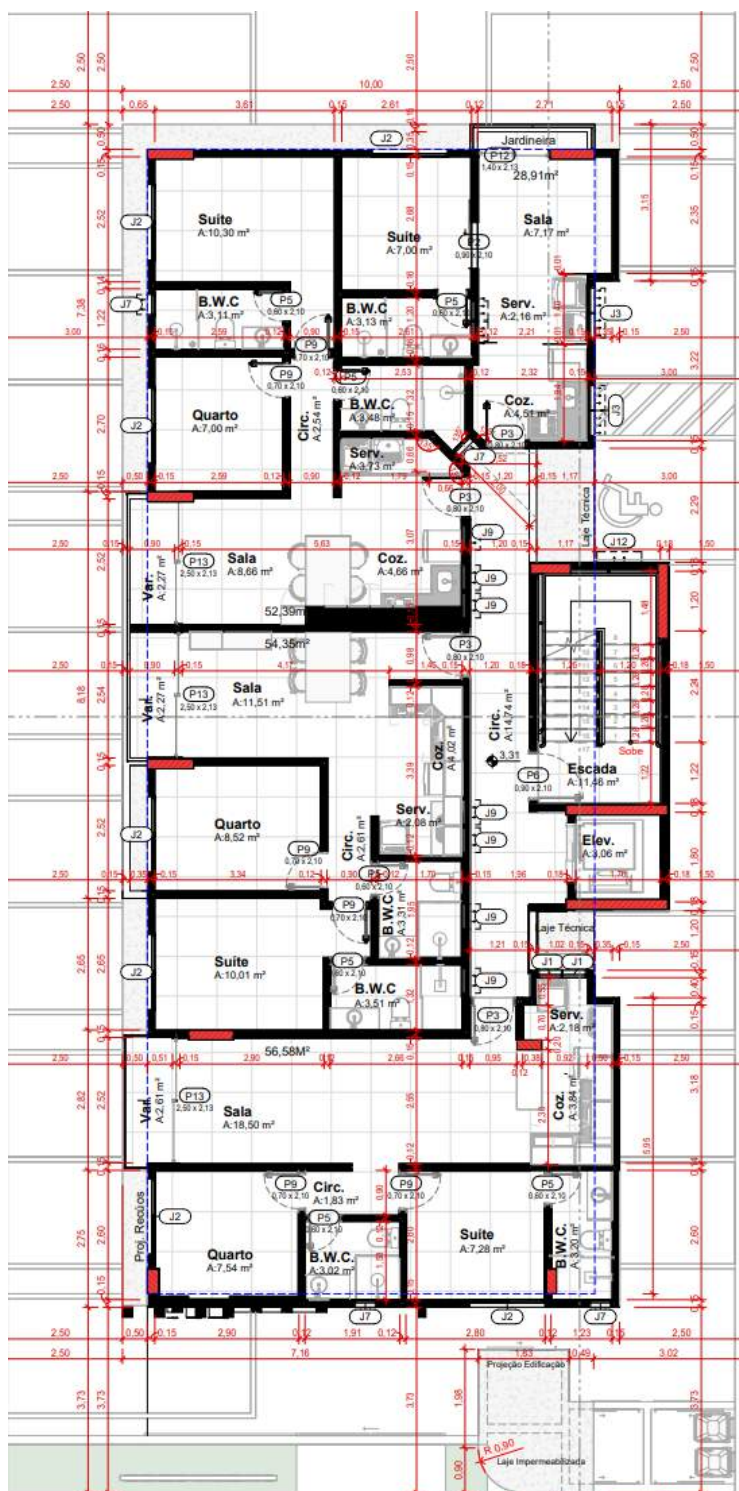
4.2.2 Descrevendo empreendimento B

- Área do terreno: 450,00 m²
- Área construída 1.368,23 m²
- Área de projeção ortogonal: 222,71 m²
- Área permeável: 53,37 m² ou 11,86%
- Área do pavimento tipo: 240,86 m²

O edifício em estudo é classificado como R5 conforme a Lei de Uso e Ocupação do Solo. A edificação é composta por pavimento térreo em pilotis, quatro pavimentos tipo e área de lazer com piscina na cobertura e reservatório está no pavimento superior.

O pavimento tipo possui área total de 240,86 m², sendo subdividido em quatro unidades habitacionais por pavimento. Destas, sendo uma com área aproximada de 50 m², outras duas possuem cerca de 46 m² e mais uma com cerca de 24 m².

Figura 8 - Planta baixa do pavimento tipo



Fonte: Projeto arquitetônico de empreendimento B no bairro Bela Vista (Cabedelo-PB)

A concepção do empreendimento foi desenvolvida adotando-se o sistema de pilares em concreto armado sob laje em concreto protendido e na etapa seguinte a vedação feita por completa na forma tradicional de blocos cerâmicos com 8 furos. A análise preliminar indica

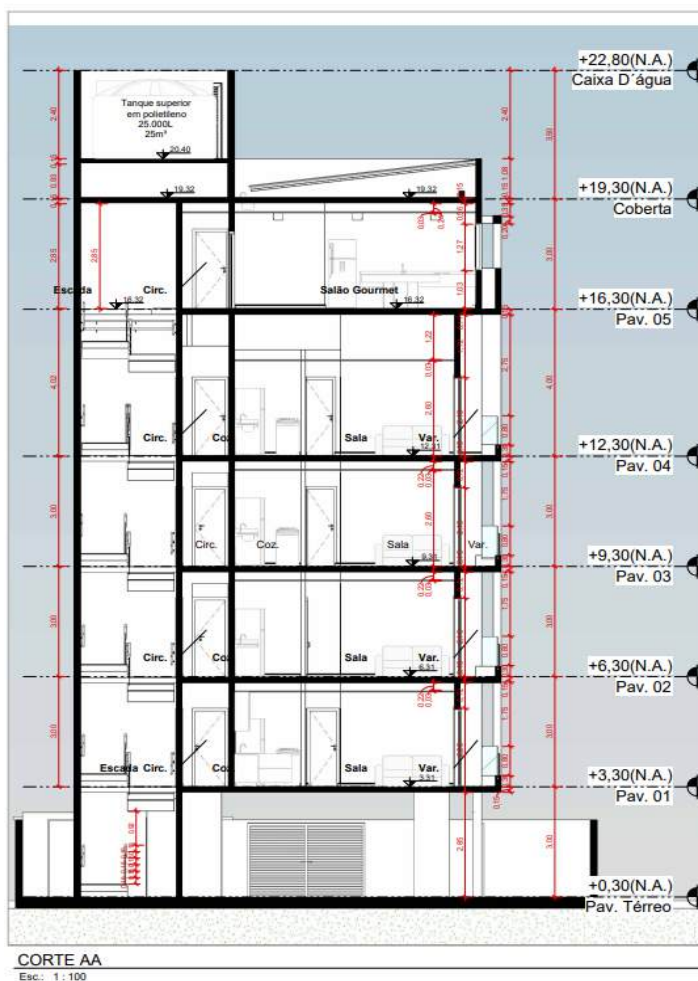
que, na possibilidade de outro sistema, verifica-se a densidade de paredes estruturais. Segundo a literatura de Ramalho, valores entre 0,5 e 0,7 m de paredes estruturais por metro quadrado de pavimento são considerados usuais. Dentro desses limites, a densidade de paredes pode ser classificada como adequada, indicando que as condições de dimensionamento tendem a refletir um comportamento estrutural típico para esse sistema construtivo.

O empreendimento possui 175,16 m de parede

$$175,16/240,86 = 0.73m/m^2$$

Densidade que excede levemente quantidade classificada adequada, logo na primeira análise, permitindo algumas paredes como não portantes, este empreendimento poderia ser concebido em alvenaria estrutural.

Figura 9 - Corte AA do projeto arquitetônico



Fonte: Projeto arquitetônico de empreendimento B no bairro Bela Vista (Cabedelo–PB)

Figura 10 - Corte BB do projeto arquitetônico



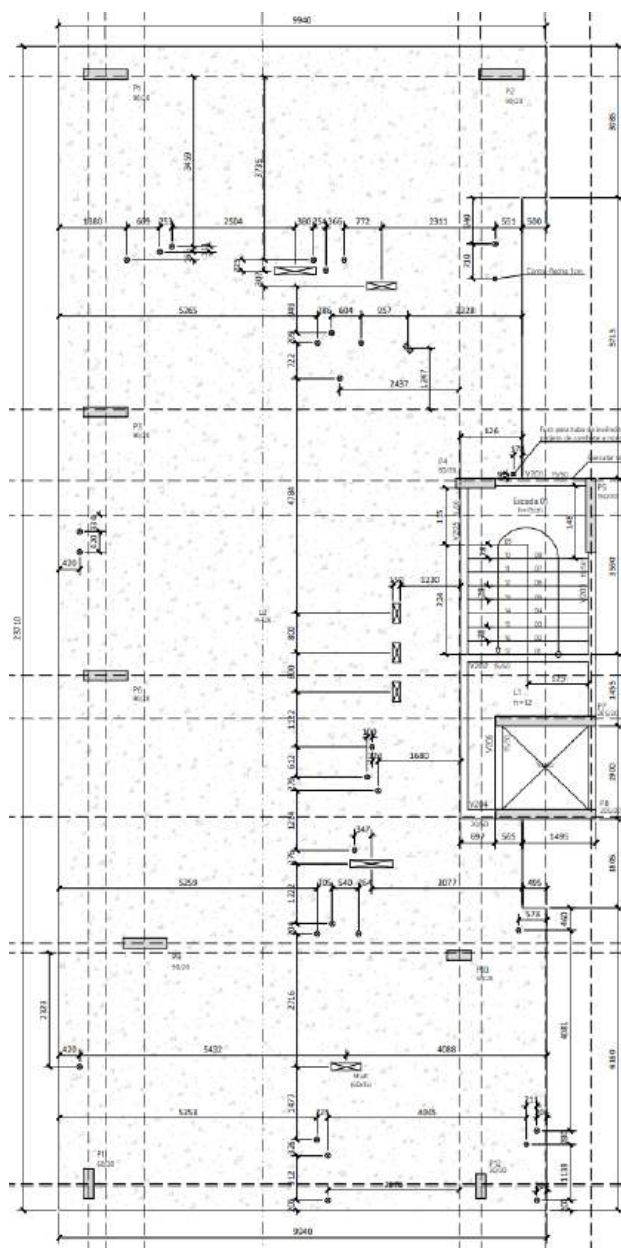
Fonte: Projeto arquitetônico do empreendimento B no bairro Bela Vista (Cabedelo–PB)

Dentre as classificações de concreto protendido apresentadas no referencial teórico, o presente estudo aborda a protensão de lajes com monocordalhas não aderentes. A principal característica desse sistema é o tipo de ancoragem, que o diferencia dos demais métodos de protensão.

Trata-se de um sistema de protensão por pós-tração, no qual as cordalhas de aço são engraxadas e revestidas por bainha plástica de polietileno de alta densidade (PEAD), impedindo a aderência entre o aço e o concreto ao longo do seu comprimento. Nesse sistema, as cordalhas são ancoradas exclusivamente nas extremidades da peça estrutural, sendo a transmissão de esforços realizada por meio dessas ancoragens.

Segue detalhes e algumas pranchas do projeto estrutural:

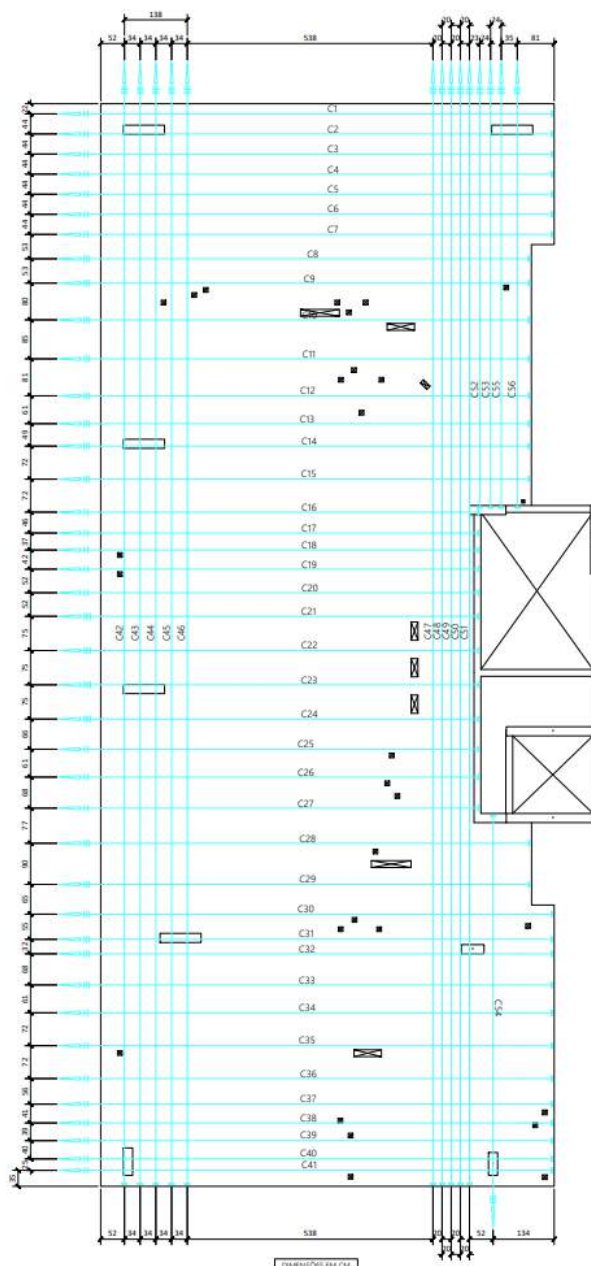
Figura 11 - Planta de fôrma do pavimento tipo



Fonte: Projeto estrutural do empreendimento B no bairro Bela Vista (Cabedelo–PB)

Sistema composto por laje maciça com capitéis embutidos

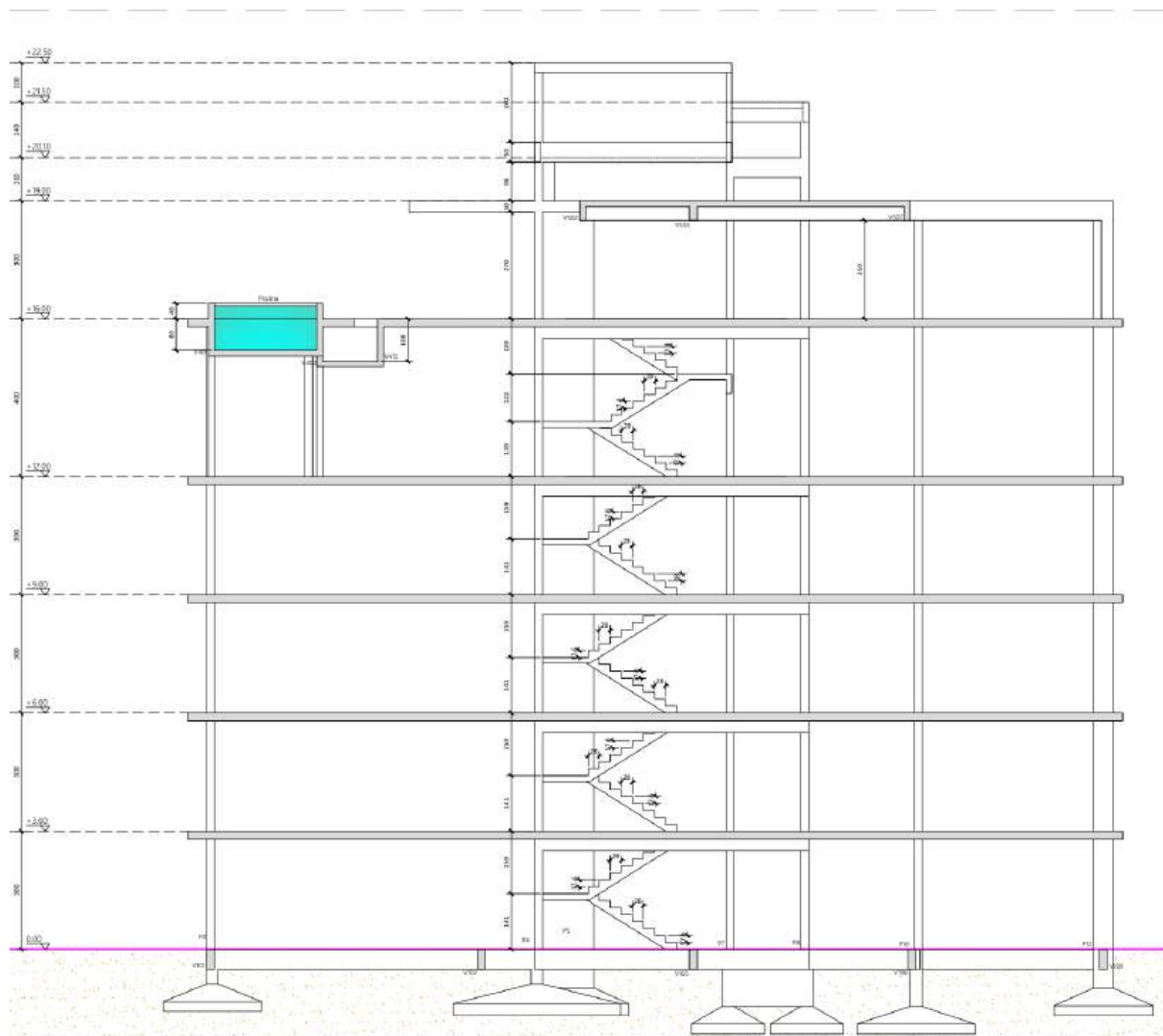
Figura 12 - Planta de forma com detalhes da protensão



Fonte: Projeto estrutural do empreendimento B no bairro Bela Vista (Cabedelo-PB)

Sistema de cordoalhas em duas direções com lado ativo e passivo.

Figura 13 - Corte da estrutura



Fonte: Projeto estrutural do empreendimento B no bairro Bela Vista (Cabedelo–PB)

Em resumo, a superestrutura é composta por 12 pilares e 6 vigas dispostas no entorno da escada em cada pavimento tipo, o qual se repete por três níveis consecutivos. No quarto pavimento, observa-se modificação na configuração estrutural, caracterizada por pé-direito mais elevado e pela introdução de quatro pilares adicionais, em decorrência da necessidade de reforço estrutural para suportar as cargas provenientes da piscina no pavimento subsequente (cobertura).

4.3 Comprovação de similaridade entre os empreendimentos

A equivalência entre os empreendimentos não foi tratada como identidade geométrica absoluta, mas como **comparabilidade arquitetônica e funcional suficiente** para isolar a

variável “sistema estrutural”. Essa comparabilidade foi estabelecida por meio de indicadores padronizados de tipologia, programa, geometria e implantação, analisados por diferenças relativas e índice global de similaridade

Conjunto de variáveis do **pavimento tipo** e da **edificação**:

- área do pavimento tipo
- perímetro do pavimento tipo
- índice de compactação
- razão comprimento/largura
- número de apartamentos por pavimento
- área construída total
- área de projeção
- taxa de permeabilidade
- número de pavimentos tipo

Diferença absoluta

$$| A - B | = \text{Diferença absoluta}$$

$$\text{Exemplo : } |235 - 240| = 5$$

Média

$$(A + B) / 2 = \text{Média}$$

$$\text{Exemplo: } 235 + 240 / 2 = 237,5$$

Diferença relativa

$$\delta = \text{Diferença absoluta/Média} = \text{Diferença relativa}$$

$$\text{Exemplo: } \delta = 5 / 237,5 = 0,021$$

$$IGS = 1 - \frac{1}{k} \sum \delta_i$$

- k = número de variáveis
- IGS próximo de 1 = alta similaridade

Tabela 1 - Quantitativos arquitetônicos com índices de diferenças e similaridade

Empreendimentos	A	B	Diferença absoluta	Média	Diferença relativa	Diferença relativa em %
Sistema	Alvenaria Estrutural	Concreto Protendido				
Área do terreno (m ²)	461,25	450,00	11,25	455,63	0,0247	2,47
Área construída (m ²)	1244,40	1368,23	123,83	1306,32	0,0948	9,48
Área de projeção ortogonal (m ²)	195,10	222,71	27,61	208,91	0,1322	13,22
Área permeável (m ²)	56,69	53,37	3,32	55,03	0,0603	6,03
% de área permeável	12,24	11,86	0,38	12,05	0,0315	3,15
Área pavimento tipo (m ²)	235,35	240,86	5,51	238,11	0,0231	2,31
Área de paredes no pavimento tipo (m ²)	525,20	490,45	34,75	507,83	0,0684	6,84
Perímetro planta baixa do pavimento tipo (m)	75,51	71,43	4,08	73,47	0,0555	5,55
número de pavimentos tipo	4,00	4,00	0,00	4,00	0,0000	0,00
número de apartamentos por pavimento	4,00	4,00	0,00	4,00	0,0000	0,00
índice de compactidade	0,52	0,59	0,07	0,56	0,1340	13,40
Índice global de similaridade	0,9432					

Fonte: Autoria Propria.

δ (diferença) Interpretação das diferenças relativas

$\leq 5\%$ alta similaridade

5% – 10% similaridade aceitável

$> 15\%$ diferença relevante

A similaridade arquitetônica entre os empreendimentos foi avaliada por meio da diferença relativa entre variáveis padronizadas, conforme a expressão:

$$\delta_i = \frac{|x_{Ai} - x_{Bi}|}{\frac{x_{Ai} + x_{Bi}}{2}}$$

Em que x_{Ai} e x_{Bi} representam os valores da variável i para os empreendimentos A e B, respectivamente. Esse procedimento permite quantificar a divergência percentual entre os sistemas de forma simétrica, evitando distorções associadas à escolha de um único referencial.

A partir das diferenças individuais, foi calculado um índice global de similaridade, obtido pela média das diferenças relativas entre as variáveis analisadas, permitindo sintetizar o grau de equivalência arquitetônica entre os empreendimentos em um único parâmetro adimensional.

A construção desse índice segue a lógica de agregação de múltiplos indicadores em uma medida sintética, procedimento amplamente utilizado em métodos estatísticos aplicados à engenharia e à análise multivariada, nos quais diferentes variáveis são combinadas para representar um fenômeno complexo de forma integrada (ANDERSON, 2003; MONTGOMERY; RUNGER, 2014). Dessa forma, a abordagem adotada permite avaliar quantitativamente a comparabilidade entre os empreendimentos, garantindo consistência metodológica para a análise comparativa dos sistemas construtivos.

A partir das diferenças individuais, foi calculado um índice global de similaridade, obtido pela média das diferenças relativas entre as variáveis analisadas, permitindo sintetizar o grau de equivalência arquitetônica entre os empreendimentos em um único parâmetro adimensional.

A construção desse índice segue a lógica de agregação de múltiplos indicadores em uma medida sintética, procedimento amplamente utilizado em métodos estatísticos aplicados à engenharia e à análise multivariada, nos quais diferentes variáveis são combinadas para representar um fenômeno complexo de forma integrada (ANDERSON, 2003; MONTGOMERY; RUNGER, 2014). Dessa forma, a abordagem adotada permite avaliar quantitativamente a comparabilidade entre os empreendimentos, garantindo consistência metodológica para a análise comparativa dos sistemas construtivos.

A equivalência é evidente pela similaridade arquitetônica e funcional dos empreendimentos, principalmente considerando que ambos possuem mesma tipologia, número de pavimentos, número de unidades habitacionais e área aproximada por pavimento. A equivalência também foi garantida pela adoção do pavimento tipo como unidade de análise, uma vez que ele representa um ciclo produtivo repetitivo e comparável entre os dois sistemas, permitindo comparar os sistemas por meio de indicadores normalizados, como consumo por área, número de atividades e tempo de ciclo, assegurando condições equivalentes de análise. Embora não sejam empreendimentos idênticos, a equivalência metodológica foi garantida pela padronização da unidade de análise e dos indicadores, o que permite uma comparação técnica consistente.

4.4 Estrutura Analítica da Comparação

A análise comparativa foi estruturada com base na teoria Transformação-Fluxo-Valor (KOSKELA, 1992), considerando que a eficiência produtiva depende da redução da variabilidade, da estabilidade do fluxo e da maximização do valor entregue ao cliente.

Para comparar quantitativamente sob Lean Construction, faz-se transformações princípios Lean em indicadores mensuráveis.

- consumo
- complexidade
- repetitividade
- potencial produtivo
- racionalização

A literatura de produtividade estabelece que o desempenho produtivo pode ser avaliado por meio da relação entre produto gerado e recursos empregados, sendo comum a utilização de indicadores parciais quando a mensuração da produtividade total dos fatores não é viável (MESSA, 2014). Nesse contexto, a adoção de indicadores técnico-produtivos normalizados por unidade de área construída mostra-se adequada para a comparação entre sistemas construtivos sob a ótica da eficiência produtiva.

A análise técnico-produtiva quantitativa permite avaliar de forma objetiva o potencial de desempenho dos sistemas construtivos sob a ótica do Lean Construction, transformando características de projeto em indicadores mensuráveis de racionalização, consumo de recursos e complexidade executiva.

5 INDICADORES DA EFETIVIDADE NA TRANSFORMAÇÃO

5.1 Quantitativos levantados

Tabela 2 - Quantitativos

Empreendimentos	A	B
Sistema	Alvenaria Estrutural	Concreto Protendido
Área construída (m ²)	1244,4	1368,23
Área pavimento tipo (m ²)	235,35	240,86
Volume de concreto (m ³)	123,1	229,12
Peso de aço (kg)	13059	13000,758
Área de formas (m ²)	299,59	1459,4
Area de paredes no pavimento tipo (m ²)	525,20	490,45
Nº de pilares no térreo	26	12

Fonte: Autoria própria

5.2 Levantamento dos índices de consumo a partir dos quantitativos

CONSUMO (INDICADORES DE CONSUMO)

$$\text{FÓRMULA} \rightarrow \frac{\text{CONSUMO TOTAL DO MATERIAL}}{\text{ÁREA TOTAL DOS PAVIMENTOS HABITACIONAIS}} = \text{ÍNDICE}$$

5.2.1 Consumo teórico de concreto

Considerou-se o consumo de concreto na superestrutura do térreo até a laje do quarto andar.

Figura 14 - Representação da edificação



Fonte: Projeto arquitetônico de empreendimento no bairro Bela Vista (Cabedelo–PB)

Considerou-se região delimitada pela linha azul claro

- **Empreendimento A**

Área de 235,35m² por pavimento pavimento tipo

$$235,35 * 4 = 941,4$$

Pilares 9,00m³

Vigas 17,90m³

Laje 38,9m³

Lajes treliçadas 19,1M³ X3

Cálculo

$$9,0 + 17,90 + 38,9 + (19,1 * 3) = 123,1$$

$$\text{Total} = 123,1\text{m}^3$$

Índice de forma = area total de forma / por área total de pavimento habitacional

$$\text{IC} = 123,1 / 941,4 = 0,131\text{m}^3/\text{m}^2$$

$$IC = 0,131\text{m}^3/\text{m}^2$$

- **Empreendimento B**

Área de 240,86m²

$$240,86 * 4 = 963,44$$

Pilares 7,5M³X4

Vigas 1,61M³X4

Lajes 48,172M³X4

cálculo

$$7,5 + 1,61 + 48,172 = 57,28$$

$$57,28 * 4 = 229,12$$

$$\text{Total} = 229,12\text{m}^3$$

Índice volume por área de pavimento habitacional

$$IC = 229,12 / 963,44 = 0,238\text{m}^3/\text{m}^2$$

$$IC = 0,238\text{m}^3/\text{m}^2$$

Empreendimento B demonstra um consumo maior de concreto.

5.2.2 Consumo teórico de fôrmas

Formas de madeira

- **Empreendimento A**

Área de 235,35m² por pavimento TIPO

Área de formas

Pilares 124,7m²

Vigas 128,89m²

Lajes 46m²

cálculo

$$124,7 + 128,89 + 46 = 299,59$$

$$\text{Total} = 299,59\text{m}^2$$

Índice de form

$$a = \text{Área total de forma} / \text{por área total de pavimento habitacional}$$

$$\text{IF} = 299,59 / 941,4 = 0,318$$

$$\text{IF} = 0,318$$

- **Empreendimento B**

Área de 240,86m² por pavimento TIPO

ÁREA DE FORMAS

$$\text{Pilares } 106,64\text{m}^2 \times 4 = 426,56\text{m}^2$$

$$\text{Vigas } 26,99\text{m}^2 \times 4 = 107,97\text{m}^2$$

$$\text{Lajes } 231,22\text{m}^2 \times 4 = 924,87\text{m}^2$$

cálculo

$$426,56 + 107,97 + 924,87 = 1459,4\text{m}^2$$

$$\text{Total} = 1459,4\text{m}^2$$

Índice de forma = área total de forma / por área total de pavimento habitacional

$$\text{IF} = 1459,4 / 941,4 = 1,55$$

As chapas de madeira utilizadas em sistemas de formas para concreto armado possuem vida útil limitada, sendo possível sua reutilização em diversos ciclos de concretagem. O número de reutilizações depende do tipo de compensado, da qualidade do material e das condições de uso e manutenção. Em geral, chapas de compensado comum apresentam reutilização entre três e cinco vezes, enquanto chapas plastificadas podem alcançar de dez a vinte reutilizações ou mais quando utilizadas adequadamente (SOUZA, 2006; PINI, 2012).

Considerando a análise do processo construtivo sob a perspectiva do Lean Construction, que busca a redução de desperdícios e o aumento da eficiência na produção, adotou-se neste estudo um critério de reaproveitamento das formas a partir do primeiro pavimento tipo. Dessa forma, para fins de quantificação e análise das atividades, considerou-se a área de formas de pilares e lajes apenas uma vez, assumindo-se sua reutilização nos pavimentos subsequentes que apresentam repetição geométrica.

OBS: Este índice envolve variáveis como a forma de execução adotada, caso as formas sejam aproveitadas a cada pavimento esse índice reduzirá para 0,39

$$106,64 + 26,99 + 231,22 = 364,85\text{m}^2$$

$$\text{IF} = 364,85 / 941,4 = 0,388$$

$$\text{IF} = 0,388$$

5.2.3 Consumo teórico de AÇO

ICA = Índice de consumo de aço

- **Empreendimento A**

área de 235,35m² por pavimento TIPO

Tabela 3 - Consumo de aço do empreendimento A

	AÇO TOTAL CA50	AÇO TOTAL CA60
vigas	2394	28
punção	238	
armaduras positiva e negativa da laje base	3465	
elevações das paredes	1596	12
treliças	1382	
pilares	2840	15
escada	324	
telas		765
TOTAL (kg)	12239	820

Fonte: Autoria própria

Consumo de aço

$$\text{ICA50} = 12239 \div 235,35 = 52$$

$$\text{ICA50} = 52 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{ICA60} = 820 \div 235,35 = 3,48$$

$$\text{ICA60} = 3,48 \text{ kg/m}^2$$

- **Empreendimento B**

área de 240,86m² por pavimento TIPO

Tabela 4 - Consumo de aço do empreendimento B

	AÇO TOTAL CA50	AÇO TOTAL CA60	SISTEMA DE PROTENSÃO
vigas	475		405
punção	308		426
laje	1838		1299
reforços da laje	101		
fretagem	1338		
pilares	3427	322	
escada	433		
tela		3104	
TOTAL (kg)	7445	3425,758	2130

Fonte: Autoria própria

$$ICA50 = 7445 \div 240,86 = 30,91$$

$$ICA50 = 30,91 \text{ kg/m}^2$$

$$ICA60 = 3425,76 \div 240,86 = 14,22$$

$$ICA60 = 14,22 \text{ kg/m}^2$$

Índice de aço das cordoalhas

$$IAC = 2130 \div 240,86 = 8,84$$

$$IAC = 8,84 \text{ kg/m}^2$$

6 INDICADORES DA EFICIÊNCIA DO FLUXO PRODUTIVO

No contexto do Lean Construction, o fluxo produtivo refere-se à sequência contínua e organizada das atividades necessárias para a execução da obra, buscando minimizar interrupções, esperas e retrabalhos ao longo do processo construtivo. De acordo com (KOSKELA, 1992), a produção na construção civil deve ser analisada não apenas como transformação de insumos em produtos, mas também como fluxo de atividades interdependentes. A estabilização desse fluxo constitui um dos principais objetivos da filosofia enxuta, pois permite reduzir variabilidade, melhorar a previsibilidade do planejamento e aumentar a eficiência produtiva no canteiro de obras.

6.1 Levantamento das atividades que descrevem tecnicamente os sistemas construtivos adotados

A fim de estabelecer um parâmetro comparativo consistente entre os sistemas construtivos analisados, a pesquisa foi estruturada a partir da análise de uma etapa construtiva repetitiva, considerada como um ciclo produtivo. O pavimento tipo se demonstra eficiente como unidade de análise, uma vez que, no sistema em alvenaria estrutural, ocorrem de forma integrada as etapas de estrutura, vedação e infraestrutura das instalações. A partir dessa lógica de execução, foram identificadas as atividades equivalentes no sistema em concreto estrutural pretendido, permitindo compreender e comparar o comportamento produtivo dos dois sistemas dentro de um mesmo ciclo construtivo repetitivo, possibilitando a análise do fluxo produtivo e da organização das atividades executivas segundo os princípios do Lean Construction.

Essa abordagem permite analisar o fluxo produtivo e a repetitividade das atividades construtivas, aspectos fundamentais para a avaliação dos sistemas sob a ótica dos princípios do Lean Construction.

O levantamento das atividades produtivas foi realizado a partir da análise dos projetos executivos estruturais e arquitetônicos da edificação, incluindo:

- Projetos estruturais
- Projetos arquitetônicos

A partir da interpretação desses projetos foram identificadas as **seqüências executivas necessárias para a execução das etapas estruturais e de vedação**.

As atividades identificadas foram organizadas em uma planilha contendo:

- Descrição da atividade;
- Equipe responsável pela execução;

Esse procedimento permitiu estabelecer uma estrutura sistemática de análise do processo construtivo, possibilitando a comparação entre os dois sistemas construtivos analisados.

A Lista de atividades executivas foi desenvolvida a partir de uma série de literaturas

Empreendimento A

ATIVIDADES NO SISTEMA DE ALVENARIA ESTRUTURAL

A sequência executiva das atividades apresentada neste estudo foi elaborada com base em normas técnicas brasileiras e literatura especializada sobre alvenaria estrutural e sistemas de lajes pré-fabricadas. As diretrizes relacionadas à modulação da alvenaria, execução da primeira fiada, posicionamento de armaduras, grauteamento, execução de vergas e cintas de amarração foram fundamentadas nas recomendações das normas ABNT NBR 15961 e ABNT NBR 16868, bem como em manuais técnicos e materiais didáticos sobre alvenaria estrutural, como a disciplina 121088 – Alvenaria Estrutural ministrada por Guilherme Aris Parsekian e o livro Manual de Alvenaria Estrutural com Blocos Cerâmicos, de Humberto Roman e Sérgio Parizotto Filho. Já as atividades relacionadas à execução da laje de vigotas treliçadas pré-fabricadas, incluindo montagem do escoramento, posicionamento das vigotas, colocação dos elementos de enchimento, execução das armaduras complementares e concretagem da capa estrutural, foram baseadas nas recomendações da norma ABNT NBR 14931 e na literatura técnica apresentada em Projeto e Execução de Lajes Treliçadas, de Leandro Dias Küster, Artur Lenz Sartorti e Itamar Vizotto, que descrevem os procedimentos executivos e os cuidados técnicos necessários para a correta execução desse sistema construtivo.

A etapa inicial para a aplicação do sistema em alvenaria estrutural ocorre ainda na fase de concepção do projeto arquitetônico e estrutural, quando é realizada a modulação da edificação e compatibilização dos projetos são atividades que precedem a execução mas são necessárias em maior vigor nesse sistema .

- A modulação consiste na compatibilização das dimensões do projeto com os módulos dos blocos estruturais, de forma a garantir a padronização das unidades construtivas e evitar cortes desnecessários de blocos durante a execução. Segundo Ramalho e Corrêa (2003), a modulação adequada é um dos principais fatores para a racionalização do sistema de alvenaria estrutural, pois contribui para a redução de desperdícios do sistema construtivo./ (equipe de engenheiros e arquitetos)
- Maior complexidade na compatibilização com projeto hidrossanitário. / (equipe de engenheiros)
- Maior complexidade na compatibilização com projeto elétrico. / (equipe de

engenheiros)

Atividades executivas:

Tabela 4 - Número de atividades e relação entre profissional e atividade no sistema de alvenaria estrutural do empreendimento A

Nº	Atividades	Equipe ou profissional habilitado
1	Limpeza e preparação da laje	Equipe de apoio geral
2	Marcação da alvenaria -primeira fiada	Pedreiro + encarregado habilitado
3	Grauteamento e nivelamento da primeira fiada	Pedreiro
4	Verificação da marcação (conferência da modulação, esquadro, prumo, nivelamento e alinhamento)	Engenheiro ou encarregado habilitado
5	Perfuração e Ancoragem de Armaduras verticais na laje inferior	Pedreiro + encarregado habilitado
6	Início da elevação das paredes Até uma fiada abaixo da altura dos vãos	Pedreiro
7	Controle tecnológico da argamassa	Equipe de técnica de laboratório de controle
8	Passagem dos eletrodutos a partir da segunda fiada	Eletricista
9	Verificação do prumo a cada 3 fiadas	Pedreiro + encarregado habilitado
10	Execução de vergas e contravergas com assentamento de canaletas	Pedreiro habilitado
11	Armação de pontos de reforço	Pedreiro habilitado
12	Grauteamento dos elementos estruturais das paredes a cada sete fiadas	Pedreiro
13	Controle tecnológico do graute	Equipe de técnica de laboratório de controle
14	Conferência dos pontos de graute fazendo aberturas de inspeção	Engenheiro ou encarregado habilitado
15	Correções	Pedreiro
16	Emenda com transpasse feito nos pontos de graute verticais sobressaindo esperas na laje	Pedreiro habilitado ou armador + encarregado habilitado
17	Posicionamento e assentamento de canaletas J e canaletas U	Pedreiro
18	Montagem de cinta de amarração	Pedreiro habilitado ou armador + encarregado habilitado
19	Conferência das paredes para iniciação de montagem da laje de vigotas treliçadas	Engenheiro ou encarregado habilitado
20	Correções	Pedreiro

21	Montagem das escoras de acordo com com projeto	Pedreiro habilitado ou carpinteiro + encarregado habilitado
22	Posicionamento das vigotas conforme projeto	Pedreiro habilitado ou carpinteiro + encarregado habilitado
23	Conferência das alturas, do alinhamento e espaçamento entre as vigotas	Engenheiro ou encarregado habilitado
24	Correções na montagem da laje	Pedreiro habilitado ou carpinteiro
25	Colocação dos preenchimentos em eps, ajustando as peças caso seja necessário	Pedreiro habilitado ou carpinteiro ou ajudante + encarregado habilitado
26	Locação e posicionamento dos shafts e tubulações de descidas	Encarregado habilitado ou encanador
27	Execução das armaduras complementares	Pedreiro habilitado ou armador + encarregado habilitado
28	Conferência geral, inclusive armaduras e cobertura.	Equipe de engenharia
29	Correções	Equipe responsável pela atividade anterior (pedreiro, armador ou carpinteiro)
30	Concretagem	Equipe de concretagem (pedreiros, serventes e operador de bomba de concreto)
31	Controle tecnológico do concreto	Equipe de técnica de laboratório de controle
32	Cura do concreto	Encarregado
33	Retirada do escoramento	Carpinteiro ou pedreiro habilitado
34	Redimensionamento dos vãos para assentamento de esquadrias de madeira e alumínio.	Pedreiro

Fonte: Autoria própria

Empreendimento B

Estrutura com pilares em concreto armado e lajes protendidas pós-tracionada composta por monocordoalhas não aderentes.

A sequência executiva das atividades estruturais em concreto protendido, bem como das etapas de vedação e instalações, foi definida com base em literatura técnica especializada e em normas brasileiras relacionadas à execução de estruturas de concreto. As etapas de posicionamento de armaduras, montagem de formas e cimbramento, instalação e posicionamento de cordoalhas, concretagem da laje e posterior protensão dos cabos seguem as recomendações apresentadas nas obras Projeto e Execução de Lajes Protendidas, de Alexandre A. Emerick e Roberto Buchaim, e Concreto Protendido, de Walter Pfeil (2000), que descrevem os procedimentos de montagem das armaduras, posicionamento das cordoalhas, concretagem e aplicação da protensão em estruturas de concreto protendido.

As etapas relacionadas à montagem, posicionamento e tensionamento das cordoalhas também foram fundamentadas nas recomendações do manual Manual para a Boa Execução de Estruturas Protendidas Usando Cordoalhas de Aço Engraxadas e Plastificadas, de Eugênio Cauduro, que descreve detalhadamente o processo executivo das estruturas protendidas, incluindo posicionamento dos cabos, instalação das ancoragens, controle das alturas das cordoalhas, tensionamento e verificação de alongamentos.

Além disso, o estudo de caso apresentado no artigo O processo construtivo de uma laje protendida do edifício comercial Connect Towers localizado na cidade de Manaus/AM: estudo de caso, de John Andrew Printes de Souza, Walzenira Parente Miranda e Érika Cristina Nogueira Marques Pinheiro, também foi utilizado como referência para a definição da sequência executiva das atividades relacionadas à execução de lajes protendidas em edificações, incluindo montagem das armaduras, posicionamento das cordoalhas, concretagem, protensão e etapas posteriores de inspeção e controle.

As atividades de concretagem, controle tecnológico do concreto, cura e retirada de escoramentos seguem ainda as recomendações da norma ABNT NBR 14931, que estabelece os procedimentos para execução de estruturas de concreto. Já as etapas relacionadas à execução das alvenarias de vedação e sua interface com a estrutura foram fundamentadas nas recomendações da norma ABNT NBR 15812, que trata da execução de alvenaria estrutural, além de literatura técnica sobre processos construtivos em edificações.

As atividades executivas são:

Tabela 5 - Número de atividades e relação entre profissional e atividade no sistema de alvenaria estrutural do empreendimento B

Nº	Atividades	Equipe ou profissional habilitado
	ESTRUTURA	
1	Corte e montagem das peças de cordoalhas conforme projeto (a fabricação pode ser feita e concluída a qualquer momento antes do posicionamento das cordoalhas na laje)	Equipe de protensão (montadores de cabos) sob supervisão especializada
2	Locação dos pilares na laje	Encarregado habilitado ou engenheiro
3	Montagem da armadura dos pilares	Armador
4	Colocação de espaçadores	Armador
5	Verificação das armaduras	Engenheiro ou encarregado habilitado
6	Correções	Armador
7	Fechamento das fôrmas e montagem de cimbramento	Carpinteiro
8	Concretagem dos pilares	Equipe de concretagem (pedreiros, serventes e operador de bomba de concreto)
9	Verificação do prumo dos pilares	Encarregado habilitado ou engenheiro
10	Correções	Carpinteiro
11	Montagem das fôrmas e cimbramento das vigas e lajes	Carpinteiro
12	Verificação das formas, nível e posicionamento e distribuição das escoras	Encarregado habilitado ou engenheiro
13	Correções	Carpinteiro
14	Armação passiva: armadura das vigas e armadura positiva da laje	Armador
15	Locação e posicionamento dos shafts e tubulações de descidas	Encarregado habilitado ou encanador
16	Montagem da armação de punção	Armador
17	Marcação dos eixos dos cabos na forma da laje	Equipe de protensão
18	Posicionamento em planta das cordoalhas na laje	Equipe de protensão
19	Ancoragem e fixação dos cabos na fôrma de borda da laje	Equipe de protensão
20	Montagem da armação de fretagem e instalação de suportes para controle das alturas das cordoalhas	Armador + equipe de protensão
21	Posicionamento em perfil das cordoalhas	Equipe de protensão
22	Inspeção geral + verificação de montagem da protensão e da armação	Equipe de engenharia
23	Correções necessárias	Equipe responsável pela atividade anterior
24	Concretagem da laje	Equipe de concretagem (pedreiros, serventes e operador de bomba de concreto)
25	Controle tecnológico do concreto	Equipe técnica de laboratório de

		controle
26	Procedimentos que garantam a cura do concreto	Encarregado
27	Desforma inicial da lateral da laje	Equipe de protensão ou carpinteiro
28	Etapas de Protensão das cordoalhas	Equipe de protensão
29	Verificação das perdas e dos alongamentos	Engenheiro ou profissional especializado
30	Correções e caso não conformidade consulta ao projetista estrutural para correção	Engenheiro ou profissional especializado + em conjunto com projetista estrutural
31	Após as finalização das etapas de protensão e após atingida resistência adequada do concreto é feita a desforma e retirada das escoras	Carpinteiro
32	Reescoramento	Carpinteiro
33	Retirada das escoras de reescoramento.	Carpinteiro
34	Corte das sobras das cordoalhas e grauteamento para proteção das ancoragens.	Equipe de protensão ou pedreiro habilitado
1	VEDAÇÃO	
2	Limpeza e preparação da laje	Equipe de apoio geral
3	Passar argamassa colante nos pilares	Pedreiro
4	Marcação de linhas de nivelamento	Pedreiro
5	Marcação da alvenaria (primeira fiada)	Encarregado habilitado
6	Verificação da marcação	Engenheiro ou mestre de obras
7	Correções	Pedreiro
8	Fixar mecanismo de ancoragem entre estrutura e alvenaria	Pedreiro
9	Início da elevação das paredes até uma fiada abaixo da altura dos vãos	Pedreiro
10	Verificação do prumo a cada 4 fiadas	Pedreiro + encarregado habilitado ou equipe de engenharia
11	Montagem e Concretagem de vergas e contravergas	Pedreiro
12	Continuidade na alvenaria	Pedreiro
13	Por fim encunhamento.	Pedreiro
	INSTALAÇÕES	
1	Cortes e passagens de eletrodutos.	Eletricista

Fonte: Autoria própria

6.1.1 Número de atividades

- **Empreendimento A**
Apresenta um total de 34 atividades.
- **Empreendimento B**
 $34 + 12 + 1 = 47$
Total de 47
Apresenta um total de 47 atividades.

6.2 Levantamento do número de equipes especializadas necessárias

Embora em obras de pequeno porte seja comum que os mesmos operários responsáveis pelo assentamento dos blocos participem das atividades de grauteamento, para fins de análise técnico-produtiva as atividades foram consideradas separadamente, uma vez que apresentam naturezas distintas no processo construtivo, envolvendo diferentes operações e ritmos de produção.

Tabela 6 - Equipes especializadas por empreendimento

Empreendimento A	Empreendimento B
Equipe de apoio geral(ajudantes)	Equipe de apoio geral
Equipe técnica de laboratório de controle	Engenheiro
Pedreiro habilitado para alvenaria estrutural	Equipe de protensão
Pedreiro habilitado para montagem de laje treliçada	Encarregado habilitado para conferências de estrutura e vedação
Engenheiro	Equipe técnica de laboratório de controle
Encarregado habilitado para fiscalizações	Carpinteiro
Eletricista	Armador
Equipe de concretagem (pedreiros, serventes e operador de bomba de concreto)	Equipe de concretagem (pedreiros, serventes e operador de bomba de concreto)
Total de 8 equipes	pedreiro
	Eletricista
	Total de 10 equipes

Fonte: Autoria própria

6.3 Levantamento do número de interfaces

O número de interfaces no contexto da gestão da produção na construção civil e dos princípios do Lean Construction, refere-se à quantidade de pontos de interação ou dependência entre diferentes atividades, equipes, sistemas construtivos ou disciplinas de projeto ao longo do processo de execução de uma obra.

De forma conceitual, uma interface ocorre sempre que uma atividade precisa ser

iniciada, interrompida ou coordenada em função da atuação de outra equipe, etapa ou sistema construtivo. Em outras palavras, trata-se dos pontos de transição entre diferentes processos ou agentes envolvidos na produção. Essas transições podem ocorrer, por exemplo, entre diferentes equipes de trabalho (como pedreiros, armadores e carpinteiros), entre etapas construtivas (estrutura, vedação e instalações) ou entre disciplinas de projeto (arquitetura, estrutura e instalações).

Sob a ótica da construção enxuta, o número de interfaces é um indicador relevante para a análise do fluxo produtivo, pois quanto maior for a quantidade de interfaces, maior tende a ser a complexidade de coordenação do processo construtivo. Cada interface representa um potencial ponto de interrupção do fluxo de trabalho, podendo gerar esperas, retrabalhos, conflitos de execução ou necessidade de replanejamento. (BALLARD; HOWELL, 1998) destacam que sistemas produtivos com elevado número de interfaces costumam apresentar maior variabilidade e menor confiabilidade de planejamento, uma vez que o desempenho de uma atividade passa a depender diretamente da conclusão adequada de outra.

Na análise comparativa entre sistemas construtivos, o número de interfaces pode ser utilizado como um indicador da complexidade operacional do método construtivo. Sistemas mais industrializados ou racionalizados, como a alvenaria estrutural, tendem a apresentar menor número de interfaces, pois integram funções estruturais e de vedação em um único processo executivo. Já sistemas convencionais ou mais fragmentados, como estruturas em concreto armado ou protendido com vedação independente, costumam apresentar maior quantidade de interfaces, uma vez que envolvem a participação sequencial de diversas equipes e etapas construtivas distintas.

Assim, no âmbito desta pesquisa, o **número de interfaces** será considerado como um parâmetro de análise comparativa quantitativa do processo produtivo, permitindo avaliar o grau de fragmentação das atividades e sua influência na continuidade do fluxo de trabalho, na variabilidade da produção e na eficiência global da execução. Tais aspectos estão diretamente relacionados aos princípios do **Lean Construction**, que buscam reduzir interrupções no fluxo produtivo, minimizar dependências entre etapas e aumentar a estabilidade dos processos construtivos. (KOSKELA, 1992; BALLARD; HOWELL, 1998)

$$\text{Interfaces} = \sum (\text{Mudança de responsável entre atividades})$$

$$\text{Interface (sim=1) (não=0)}$$

Tabela 7 - Atividades e relação dos profissionais do empreendimento A

Atividades	Equipe ou profissional habilitado	Responsável	Equipe anterior	Interface	Descrição da interface
Limpeza e preparação da laje	Equipe de apoio geral	Encarregado	x	0	x
Marcação da alvenaria -primeira fiada	Pedreiro encarregado habilitado +	Equipe de alvenaria	Equipe de apoio geral	1	Equipe de apoio geral → Equipe de alvenaria
Grauteamento e nivelamento da primeira fiada	Pedreiro	Equipe de alvenaria	Equipe de alvenaria	0	
Verificação da marcação (conferência da modulação, esquadro, prumo, nivelamento e alinhamento)	Engenheiro encarregado habilitado ou	Equipe de engenharia	Equipe de alvenaria	1	Equipe de alvenaria → Equipe de engenharia
Perfuração e Ancoragem de Armaduras verticais na laje inferior	Pedreiro encarregado habilitado +	Equipe de alvenaria	Equipe de engenharia	1	Equipe de engenharia → Equipe de alvenaria
Início da elevação das paredes Até uma fiada abaixo da altura dos vãos	Pedreiro	Equipe de alvenaria	Equipe de alvenaria	0	
Controle tecnológico da argamassa	Equipe técnica de laboratório de controle	Equipe técnica de laboratório de controle	Equipe técnica de laboratório de controle	0	
Passagem dos eletrodutos a partir da segunda fiada	Eletricista	Eletricista	Equipe de alvenaria	1	Equipe de alvenaria → Eletricista
Verificação do prumo a cada 3 fiadas	Pedreiro encarregado habilitado +	Equipe de alvenaria	Eletricista	1	Eletricista → Equipe de alvenaria
Execução de vergas e contravergas	Pedreiro habilitado para alvenaria estrutural	Equipe de alvenaria	Equipe de alvenaria	0	

com assentamento de canaletas						
Armação de pontos de reforço	Pedreiro habilitado para estrutural armador ou	Equipe de alvenaria	Equipe de alvenaria	0		
Grauteamento dos elementos estruturais das paredes a cada sete fiadas	Pedreiro	Equipe de alvenaria	Equipe de alvenaria	0		
Controle tecnológico do graute	Equipe técnica de laboratório de controle	Equipe técnica de laboratório de controle	Equipe técnica de laboratório de controle	0		
Conferência dos pontos de graute fazendo aberturas de inspeção	Engenheiro encarregado habilitado ou	Equipe de engenharia	Equipe de alvenaria	1	Equipe de alvenaria → Equipe de engenharia	
Correções	Pedreiro	Equipe de alvenaria	Equipe de engenharia	1	Equipe de engenharia → Equipe de alvenaria	
Emenda com transpasse feito nos pontos de graute verticais sobressaindo esperas na laje	Pedreiro habilitado para estrutural armador ou encarregado habilitado +	Equipe de alvenaria	Equipe de alvenaria	0		
Posicionamento e assentamento de canaletas J e canaletas U	Pedreiro	Equipe de alvenaria	Equipe de alvenaria	0		
Montagem de cinta de amarração	Pedreiro habilitado para estrutural armador encarregado habilitado +	Equipe de alvenaria	Equipe de alvenaria	0		
Conferência das paredes para iniciação de montagem da laje de vigotas	Engenheiro encarregado habilitado ou	Equipe de engenharia	Equipe de alvenaria	1	Equipe de alvenaria → Equipe de engenharia	

treliçadas					
Correções	Pedreiro	Equipe de alvenaria	Equipe de engenharia	0	Equipe de engenharia → Equipe de alvenaria
Montagem das escoras de acordo com projeto com projeto	Pedreiro habilitado para montagem de laje treliçada ou carpinteiro + encarregado habilitado	Equipe de montagem da laje	Equipe de alvenaria	1	Equipe de alvenaria → Equipe de montagem da laje
Posicionamento das vigotas conforme projeto	Pedreiro habilitado para montagem de laje treliçada ou carpinteiro + encarregado habilitado	Equipe de montagem da laje	Equipe de montagem da laje	0	
Conferência das alturas, do alinhamento e espaçamento entre as vigotas	Engenheiro ou encarregado habilitado	Equipe de engenharia	Equipe de montagem da laje	1	Equipe de montagem da laje → Equipe de engenharia
Correções	Pedreiro habilitado para montagem de laje treliçada ou carpinteiro	Equipe de montagem da laje	Equipe de engenharia	1	Equipe de engenharia → Equipe de montagem da laje
Colocação dos preenchimentos em eps, ajustando as peças caso seja necessário	Pedreiro habilitado para montagem de laje treliçada ou carpinteiro ou ajudante + encarregado habilitado	Equipe de montagem da laje	Equipe de montagem da laje	0	
Locação e posicionamento dos shafts e tubulações de descidas	Encarregado habilitado ou encanador + equipe de engenharia	Equipe de engenharia	Equipe de montagem da laje	1	Equipe de montagem da laje → Equipe de engenharia
Execução das armaduras complementares (tela e reforços)	Pedreiro habilitado para montagem de laje treliçada ou armador + encarregado habilitado	Equipe de montagem da laje	Equipe de engenharia	1	Equipe de engenharia → Equipe de montagem da laje
Conferência geral, inclusive armaduras e	Equipe de engenharia	Equipe de engenharia	Equipe de montagem da laje	1	Equipe de montagem da laje → Equipe de

cobrimento.					engenharia
Correções	Equipe responsável pela atividade anterior (pedreiro, armador ou carpinteiro)	Equipes de execução	Equipe de engenharia	1	Equipe de engenharia → Equipes de execução
Concretagem	Equipe de concretagem (pedreiros, serventes e operador de bomba de concreto)	Equipe de concretagem	Equipes de execução	1	Equipes de execução → Equipe de concretagem
Controle tecnológico do concreto	Equipe técnica de laboratório de controle	Equipe técnica de laboratório de controle	Equipe de concretagem	1	Equipe de concretagem → Equipe técnica de laboratório de controle
Procedimentos que garantam a cura do concreto	Encarregado	Encarregado	Equipe de concretagem (pedreiros, serventes e operador de bomba)	1	Equipe de concretagem → Encarregado
Retirada do escoramento	Carpinteiro ou Pedreiro habilitado para desmontagem de escoramento	Equipe de montagem da laje	Equipe técnica de laboratório de controle	1	Equipe técnica de laboratório de controle → Equipe de montagem da laje
Redimensionamento dos vãos para assentamento de portas e esquadrias.	Pedreiro	Equipe de alvenaria	Equipe montagem de laje	1	Equipe de montagem da laje → Equipe de alvenaria
Total de interfaces	20				

Fonte: Autoria própria

Tabela 8 - Atividades e relação dos profissionais do empreendimento B

Atividades	Equipe ou profissional habilitado	Responsável	Equipe anterior	Interface	Descrição da interface
ESTRUTURA					
Corte e montagem das peças de cordoalhas conforme projeto (a fabricação pode ser feita e concluída a qualquer momento antes do posicionamento das cordoalhas na laje)	Equipe de protensão (montadores de cabos) sob supervisão especializada		Equipe de protensão x	0	
Locação dos pilares na laje	Encarregado habilitado ou engenheiro		Equipe de Engenharia x	0	
Montagem da armadura dos pilares	Armador		Equipe de Armação	Equipe de Engenharia 1	Equipe de engenharia → Equipe de armação
Colocação de espaçadores	Armador		Equipe de Armação	Equipe de Armação 0	
Verificação das armaduras	Engenheiro ou encarregado habilitado		Equipe de Engenharia	Equipe de Armação 1	Equipe de armação → Equipe de engenharia
Correções	Armador		Equipe de Armação	Equipe de Engenharia 1	Equipe de engenharia → Equipe de armação
Fechamento das fôrmas e montagem de cimbramento	Carpinteiro		Equipe de montagem das formas	Equipe de Armação 1	Equipe de armação → Equipe de montagem das formas
Concretagem dos pilares	Equipe de concretagem (pedreiros, serventes e operador de bomba de concreto)		Equipe de concretagem	Equipe de montagem das formas 1	Equipe de montagem das formas → Equipe de concretagem
Verificação do prumo dos pilares	Encarregado habilitado ou engenheiro		Encarregado em conjunto com Equipe de montagem das formas	Equipe de concretagem 1	Equipe de concretagem → Equipe de montagem das formas
Correções	Carpinteiro		Equipe de montagem das formas	Equipe de montagem das formas 0	
Montagem das fôrmas e cimbramento das vigas	Carpinteiro		Equipe de montagem	Equipe de montagem 0	

e lajes		das formas	das formas			
Verificação das formas, nível e posicionamento e distribuição das escoras	Encarregado habilitado engenheiro	ou	Equipe de Engenharia	Equipe de montagem das formas	1	Equipe de montagem das formas → Equipe de Engenharia
Correções	Carpinteiro		Equipe de montagem das formas	Equipe de Engenharia	1	Equipe de engenharia → Equipe de montagem das formas
Armação passiva: armadura das vigas e armadura positiva da laje	Armador		Equipe de Armação	Equipe de montagem das formas	1	Equipe de montagem das formas → Equipe de Armação
Montagem da armação de punção	Armador		Equipe de Armação	Equipe de Armação	0	
Locação e posicionamento dos shafts e tubulações de descidas	Encarregado habilitado encanador	ou	Equipe de Engenharia em conjunto com (+) encanador ou equipe de montagem das formas	Equipe de Armação	1	Equipe de armação → Equipe de engenharia
Marcação dos eixos dos cabos na forma da laje	Equipe de protensão		Equipe de protensão	Equipe de Engenharia	1	Equipe de engenharia → Equipe de protensão
Posicionamento em planta das cordoalhas na laje	Equipe de protensão		Equipe de protensão	Equipe de protensão	0	
Ancoragem e fixação dos cabos na fôrma de borda da laje	Equipe de protensão		Equipe de protensão	Equipe de protensão	0	
Montagem da armação de fretagem e instalação de suportes para controle das alturas das cordoalhas	Armador + equipe de protensão		Equipe de Armação+E equipe de protensão	Equipe de protensão	1	Equipe de protensão → Equipe de armação
Posicionamento em perfil das cordoalhas	Equipe de protensão		Equipe de protensão	Equipe de protensão	0	
Inspeção geral + verificação de montagem da protensão e da armação	Equipe de engenharia		Equipe de Engenharia	Equipe de protensão	1	Equipe de protensão → Equipe de engenharia
Correções necessárias	Equipes gerais de execução		Equipes de execução	Equipe de Engenharia	1	Equipe de engenharia →

		operacional			Equipes de execução
Concretagem da laje	Equipe de concretagem (pedreiros, serventes e operador de bomba de concreto)	Equipe de concretagem	Equipes de execução operacional	1	Equipes de execução operacional → Equipe de concretagem
Controle tecnológico do concreto	Equipe técnica de laboratório de controle	Equipe técnica de laboratório de controle	Equipe de concretagem	1	Equipe de concretagem → Equipe técnica de laboratório de controle
Procedimentos que garantam a cura do concreto	Encarregado	Encarregado	Equipe de concretagem	1	Equipe de concretagem → Encarregado
Desforma inicial da lateral da laje	Equipe de protensão ou carpinteiro	Equipe de montagem das formas	Encarregado	1	Encarregado → Equipe de montagem das formas
Etapas de Protensão das cordoalhas	Equipe de protensão	Equipe de protensão	Equipe de montagem das formas	1	Equipe de montagem das formas → Equipe de protensão
Verificação das perdas e dos alongamentos	Engenheiro ou profissional especializado	Equipe de Engenharia	Equipe de protensão	1	Equipe de protensão → Equipe de Engenharia
Correções e caso não conformidade consulta ao projetista estrutural para correção	Engenheiro ou profissional especializado + em conjunto com projetista estrutural	Equipe de Engenharia	Equipe de Engenharia	0	
Após a finalização das etapas de protensão e após atingida resistência adequada do concreto é feita a desforma e retirada das escoras	Carpinteiro	Equipe de montagem das formas	Equipe de protensão	1	Equipe de protensão → Equipe de montagem das formas
Reescoramento	Carpinteiro	Equipe de montagem das formas	Equipe de montagem das formas	0	
Retirada das escoras de reescoramento.	Carpinteiro	Equipe de montagem das formas	Equipe de montagem das formas	0	
Corte das sobras das cordoalhas e grauteamento para	Equipe de protensão ou pedreiro habilitado	Equipe de protensão	Equipe de protensão	0	

proteção das ancoragens.					
VEDAÇÃO					
Limpeza e preparação da laje	Equipe de apoio geral	Equipe de apoio geral	Equipe de montagem das formas	1	Equipe de montagem das formas → Equipe de apoio geral
Passar argamassa colante nos pilares	Pedreiro	Equipe de alvenaria	Equipe de apoio geral	1	Equipe de apoio geral → Equipe de alvenaria
Marcação de linhas de nivelamento	Pedreiro	Equipe de alvenaria	Equipe de alvenaria	0	
Marcação da alvenaria (primeira fiada)	Encarregado habilitado	Equipe de alvenaria	Equipe de alvenaria	0	
Verificação da marcação	Engenheiro ou mestre de obras	Equipe de engenharia	Equipe de alvenaria	1	Equipe de alvenaria → Equipe de engenharia
Correções	Pedreiro	Equipe de alvenaria	Equipe de engenharia	1	Equipe de engenharia → Equipe de alvenaria
Fixar mecanismo de ancoragem entre estrutura e alvenaria	Pedreiro	Equipe de alvenaria	Equipe de alvenaria	0	
Início da elevação das paredes até uma fiada abaixo da altura dos vãos	Pedreiro	Equipe de alvenaria	Equipe de alvenaria	0	
Verificação do prumo a cada 4 fiadas	Pedreiro + encarregado habilitado ou equipe de engenharia	Equipe de engenharia + equipe de alvenaria	Equipe de alvenaria	1	Equipe de alvenaria → Equipe de engenharia
Montagem e Concretagem de vergas e contravergas	Pedreiro	Equipe de alvenaria	Equipe de alvenaria	0	
Continuidade na alvenaria	Pedreiro	Equipe de alvenaria	Equipe de alvenaria	0	
Por fim encunhamento.	Pedreiro	Equipe de alvenaria	Equipe de alvenaria	0	
INSTALAÇÕES					
Cortes e passagens de eletrodutos.	Eletricista	Equipe de instalações elétricas	Equipe de alvenaria	1	Equipe de alvenaria → Equipe de instalações elétricas
Total de interfaces					27

Fonte: Autoria própria

6.3.1 Índice de complexidade executiva

$$ICE = \frac{N^{\circ} \text{ de interfaces}}{N^{\circ} \text{ total de atividades}}$$

- **Empreendimento A**
 34 atividades.
 20 Interfaces.
 6 atividades que demandam inspeção técnica da engenharia.
 $ICE = 34/20 = 1.7$
 $ICE = 1,7$
- **Empreendimento B**
 47 atividades.
 27 interfaces
 8 atividades que demandam inspeção técnica da engenharia.
 $27/47 = 0.574$
 $ICE = 0,574$

6.4 Levantamento do número de atividades repetitivas e Índice de repetitividade

NÚMERO DE ATIVIDADES REPETITIVAS PARA NÚMERO DE ATIVIDADES TOTAIS

Considerou-se como atividade repetitiva aquela que ocorre múltiplas vezes dentro do ciclo de execução do pavimento tipo, sendo aplicada em diferentes elementos construtivos, como paredes, pilares ou pontos de instalação. Já as atividades não repetitivas são aquelas executadas apenas uma vez durante o ciclo analisado, como a concretagem da laje ou a locação inicial da estrutura.

$$IR = \frac{N^{\circ} \text{ de atividades repetitivas}}{N^{\circ} \text{ total de atividades}}$$

Tabela 9 - Análise de atividades repetitivas do empreendimento A

Atividades	Atividade repetitiva? (sim) = 1 , (não) = 0
Limpeza e preparação da laje	0
Marcação da alvenaria -primeira fiada	0
Grauteamento e nivelamento da primeira fiada	0
Verificação da marcação (conferência da modulação, esquadro, prumo, nivelamento e alir	1
Perfuração e Ancoragem de Armaduras verticais na laje inferior	1
Início da elevação das paredes Até uma fiada abaixo da altura dos vãos	1
Controle tecnológico da argamassa	0
Passagem dos eletrodutos a partir da segunda fiada	1
Verificação do prumo a cada 3 fiadas	1
Execução de vergas e contravergas com assentamento de canaletas	1
Armação de pontos de reforço	0
Grauteamento dos elementos estruturais das paredes a cada sete fiadas	1
Controle tecnológico do graute	0
Conferência dos pontos de graute fazendo aberturas de inspeção	1
Correções	0
Emenda com transpasse feito nos pontos de graute verticais sobressaindo esperas na laje	1
Posicionamento e assentamento de canaletas J e canaletas U	1
Montagem de cinta de amarração	0
Conferência das paredes para iniciação de montagem da laje de vigotas treliçadas	0
Correções	0
Montagem das escoras de acordo com com projeto	1
Posicionamento das vigotas conforme projeto	1
Conferência das alturas, do alinhamento e espaçamento entre as vigotas	0
Correções	0
Colocação dos preenchimentos em eps, ajustando as peças caso seja necessário	1
Locação e posicionamento dos shafts e tubulações de descidas	0
Execução das armaduras complementares	1
Conferência geral, inclusive armaduras e cobertura.	0
Correções	0
Concretagem	0
Controle tecnológico do concreto	0
Procedimentos que garantam a cura do concreto	0
Retirada do escoramento	1
Redimensionamento dos vãos para assentamento de portas e esquadrias.	1
TOTAL DE ATIVIDADES REPETITIVAS	16

Fonte: Autoria própria

$$IR = \frac{16}{34}$$

$$IR = 0,471$$

Tabela 10 - Análise de atividades repetitivas do empreendimento B

Atividades	Atividade repetitiva? (sim) = 1 , (não) = 0
ESTRUTURA	
Corte e montagem das peças de cordoalhas conforme projeto (a fabricação pode ser feita e concluída a qualquer momento antes do posicionamento das cordoalhas na laje)	1
Locação dos pilares na laje	0
Montagem da armadura dos pilares	1
Colocação de espaçadores	1
Verificação das armaduras	1
Correções	0
Fechamento das fôrmas e montagem de cimbramento	1
Concretagem dos pilares	1
Verificação do prumo dos pilares	1
Correções	0
Montagem das fôrmas e cimbramento das, vigas e lajes	1
Verificação das formas, nível e posicionamento e distribuição das escoras	1
Correções	0
Armação passiva: armadura das vigas e armadura positiva da laje	1
Montagem da armação de punção	1
Locação e posicionamento dos shafts e tubulações de descidas	0
Marcação dos eixos dos cabos na forma da laje	1
Posicionamento em planta das cordoalhas na laje	1
Ancoragem e fixação dos cabos na fôrma de borda da laje	1
Montagem da armação de fretagem e instalação de suportes para controle das alturas das cordoalhas	1
Posicionamento em perfil das cordoalhas	1
Inspeção geral + verificação de montagem da protensão e da armação	0
Correções necessárias	0
Concretagem da laje	0
Controle tecnológico do concreto	0
Procedimentos que garantam a cura do concreto	0
Desforma inicial da lateral da laje	1

Etapas de Protensão das cordoalhas	1
Verificação das perdas e dos alongamentos	0
Correções e caso não conformidade consulta ao projetista estrutural para correção	0
Após as finalização das etapas de protensão e após atingida resistência adequada do concreto é feita a desforma e retirada das escoras	1
Reescoramento	1
Retirada das escoras de reescoramento.	1
Corte das sobras das cordoalhas e grauteamento para proteção das ancoragens.	1
VEDAÇÃO	
Limpeza e preparação da laje	0
Passar argamassa colante nos pilares	1
Marcação de linhas de nivelamento	1
Marcação da alvenaria (primeira fiada)	0
Verificação da marcação	0
Correções	0
Fixar mecanismo de ancoragem entre estrutura e alvenaria	1
Início da elevação das paredes até uma fiada abaixo da altura dos vãos	1
Verificação do prumo a cada 4 fiadas	1
Montagem e Concretagem de vergas e contravergas	1
Continuidade na alvenaria	1
Por fim encunhamento.	1
INSTALAÇÕES	
Cortes e passagens de eletrodutos.	1
TOTAL DE ATIVIDADES REPETITIVAS	31

Fonte: Autoria própria

$$IR = \frac{31}{47}$$

$$IR = 0,66$$

6.5 Tempo de Ciclo

- A unidade de análise adotada foi o pavimento tipo da edificação, por representar a maior parcela da produção repetitiva da obra e permitir a comparação direta entre os sistemas construtivos.

Para a estimativa do tempo de ciclo das atividades construtivas, foi considerada a composição de equipes de trabalho compatíveis com a execução dos sistemas construtivos analisados. No empreendimento A, executado em sistema de alvenaria estrutural com laje pré-fabricada treliçada, adotou-se uma equipe composta por **11 trabalhadores**, sendo 6 pedreiros responsáveis pela execução da alvenaria, 4 montadores especializados na montagem da laje pré-fabricada e 1 eletricista responsável pela execução das instalações elétricas embutidas durante a elevação da alvenaria.

No empreendimento B, executado em estrutura de concreto armado moldada in loco com laje protendida, foi considerada uma equipe também composta por **11 trabalhadores**, sendo 3 carpinteiros responsáveis pela montagem das formas, 3 armadores responsáveis pela execução das armaduras passivas, 4 pedreiros envolvidos nas atividades de concretagem e serviços auxiliares e 1 eletricista responsável pela execução das instalações elétricas embutidas.

Os índices de produtividade utilizados para o cálculo do tempo das atividades foram obtidos principalmente a partir da publicação TCPO – Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos, 15ª edição, amplamente utilizada como referência técnica para estimativas de produtividade e composições de custos na construção civil. Como exceção, o índice de produtividade relacionado às atividades de protensão das cordoalhas foi obtido a partir do Caderno Técnico de Composições do SINAPI, desenvolvido pela Caixa Econômica Federal, que apresenta composições de serviços e consumos de mão de obra utilizados como referência nacional em orçamentos de obras públicas.

Dessa forma, a duração das atividades foi estimada a partir da relação entre os quantitativos de serviço e os respectivos índices de produtividade das equipes consideradas, permitindo a determinação do tempo necessário para execução de cada etapa do ciclo produtivo do pavimento analisado.

Para evitar a ocorrência de juntas frias durante a concretagem, conforme recomendações técnicas presentes na literatura e nas normas de execução de estruturas de concreto, foi necessária a ampliação temporária da equipe de pedreiros durante as etapas de lançamento do concreto. Essa medida tem como objetivo garantir a continuidade da concretagem e a adequada compactação do material, evitando interrupções no processo que possam comprometer o desempenho estrutural do elemento.

Considerando a produtividade média apresentada por Souza (2005) para execução de infraestrutura elétrica em edificações residenciais, estimada entre 25 e 40 m² por equipe por dia, adotou-se para o presente estudo um valor médio equivalente a aproximadamente 0,25 h/m², permitindo estimar o tempo necessário para execução das instalações elétricas no pavimento tipo analisado.

No **empreendimento B**, executado em estrutura de concreto com laje protendida, houve ainda a necessidade de contratação de **equipe especializada para a execução das atividades de protensão**, uma vez que o tensionamento das cordoalhas e o controle dos alongamentos exigem mão de obra qualificada e equipamentos específicos. Essa prática é recomendada na literatura técnica sobre concreto protendido, que indica que as operações de protensão devem ser realizadas por profissionais treinados e com experiência nesse tipo de sistema estrutural.

A execução da alvenaria sobre lajes de concreto moldadas no local deve ocorrer apenas após o concreto atingir resistência suficiente para suportar as cargas provenientes da execução. Em práticas usuais de obra, o início da elevação das paredes ocorre aproximadamente sete dias após a concretagem da laje, podendo variar conforme o projeto estrutural, o tipo de concreto e as condições de cura (ABNT NBR 14931, 2004; ABCP).

No empreendimento A, a análise inicial do processo construtivo indicou que a execução completa de um pavimento, considerando a sequência integral das atividades estruturais, de vedação e de instalações, apresentou duração aproximada de 6 semanas.

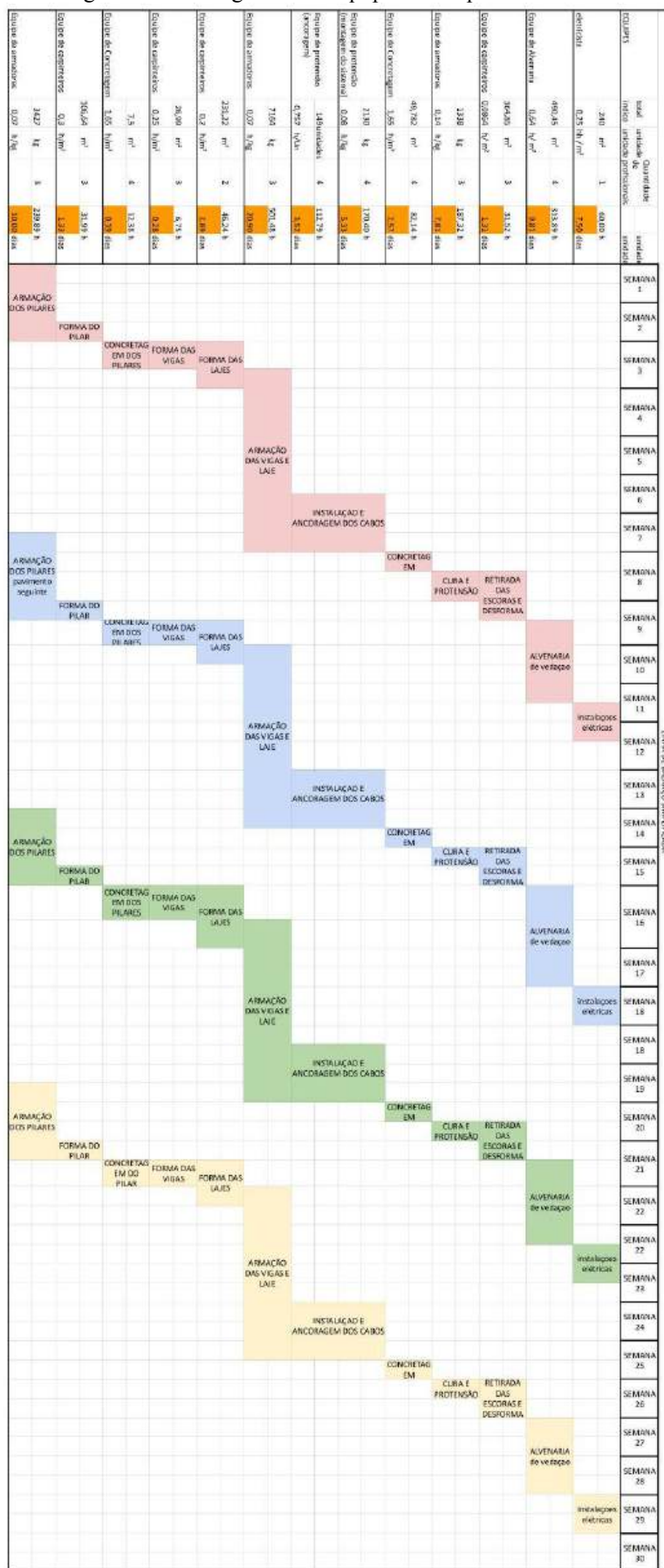
Entretanto, observa-se que, na prática da produção em edificações verticais, as equipes executam diferentes atividades de forma simultânea e sobreposta, permitindo que o ciclo de execução de um pavimento seja iniciado enquanto as atividades finais do pavimento anterior ainda estão sendo concluídas. Esse tipo de organização da produção é comum em obras de edifícios e está relacionado ao conceito de fluxo contínuo de produção, amplamente discutido na literatura de gestão da construção.

Considerando essa sobreposição de atividades, verificou-se que a execução dos quatro pavimentos tipo ocorreu em aproximadamente 18 semanas. Dessa forma, ao se dividir o tempo total de execução pelo número de pavimentos executados, obtém-se um tempo médio de ciclo de aproximadamente 4,5 semanas por pavimento, conforme apresentado a seguir:

$$\text{Tempo médio / número de pavimentos} = 18/4 = 4.5 \text{ semanas / pavimento}$$

Esse valor representa o ritmo médio de produção da estrutura, considerando a sobreposição das atividades entre pavimentos consecutivos.

Figura 16 - Cronograma das equipes do empreendimento B



Fonte: Autoria própria

No empreendimento **B**, executado em sistema estrutural de concreto armado com laje protendida, verificou-se que a execução completa de um pavimento, considerando a sequência integral das atividades estruturais, apresentou duração aproximada de 11,5 semanas.

Entretanto, assim como observado no empreendimento **A**, na prática da produção em edificações verticais ocorre a sobreposição de atividades entre pavimentos, uma vez que as equipes executam diferentes etapas de forma simultânea. Dessa forma, enquanto determinadas atividades de um pavimento ainda estão em fase de finalização, já é possível iniciar as etapas iniciais do pavimento imediatamente superior.

Considerando essa lógica de produção, verificou-se que a execução dos quatro pavimentos tipo ocorreu em aproximadamente 29 semanas. A partir dessa informação, foi possível determinar o tempo médio de ciclo de produção por pavimento, conforme apresentado a seguir:

$$\text{Tempo médio / número de pavimentos} = 29/4 = 7,25 \text{ semanas / pavimento}$$

Assim, o tempo médio de ciclo obtido foi de aproximadamente 7,25 semanas, ou cerca de 7 semanas e meia por pavimento.

Esse valor representa o ritmo médio de produção da estrutura, considerando a sobreposição das atividades entre pavimentos consecutivos durante a execução da obra.

7 INDICADORES E PARÂMETROS DA GERAÇÃO DE VALOR

7.1 Aproveitamento de área na garagem

A área destinada à garagem exige espaços adequados para circulação e manobra de veículos, tornando o aproveitamento do espaço um fator relevante para a geração de valor no empreendimento. Nesse contexto, o sistema estrutural em concreto protendido apresenta vantagem em relação ao sistema alternativo, uma vez que permite a redução do número de pilares estruturais devido à capacidade de vencer maiores vãos. No caso analisado, o pavimento de garagem apresenta apenas 12 pilares quando adotado o sistema protendido, enquanto o sistema misto de mesa em concreto armado em junção com alvenaria estrutural necessita de 26 pilares. Essa redução de elementos estruturais contribui para maior área livre, melhorando a funcionalidade do espaço e agregando valor ao projeto arquitetônico.

7.2 Flexibilidade arquitetônica

A flexibilidade arquitetônica constitui um dos principais diferenciais entre os sistemas construtivos analisados. Na alvenaria estrutural, as paredes desempenham função resistente, o que exige compatibilização rigorosa entre projeto arquitetônico e estrutural, limitando alterações posteriores no layout das unidades. Por outro lado, no sistema em concreto protendido, a estrutura é composta predominantemente por pilares e lajes protendidas, enquanto as paredes internas atuam apenas como elementos de vedação. Essa característica permite maior liberdade na configuração arquitetônica e possibilita vencer maiores vãos estruturais, reduzindo o número de pilares e ampliando as áreas livres dos pavimentos

Tabela 11 - Concepção do aspecto de valor gerado pela estrutura

Aspecto	Alvenaria estrutural	Concreto protendido
Modulação	obrigatória	não obrigatória
Alteração de layout	limitada	possível
Abertura de vãos	restrita	flexível
Flexibilidade arquitetônica	baixa	alta

Fonte: Autoria própria

Tabela 12 - Entrega de valor

Critério	Alvenaria estrutural	Concreto protendido
Função das paredes	estrutural	vedação
Liberdade de projeto	limitada	elevada
Número de pilares	maior	menor
Possibilidade de reformas	baixa	maior

Fonte: Autoria própria

Com exceção do pavimento de garagem, observa-se que a maior parte dos pilares permanece embutida nas paredes dos pavimentos habitacionais, o que geralmente não compromete a sensação de amplitude dos ambientes nem gera interferências visuais significativas no espaço arquitetônico. Embora o sistema estrutural em concreto protendido apresenta elevado potencial de agregação de valor ao permitir maiores vãos e maiores possibilidades na distribuição dos ambientes, em edificações residenciais compostas predominantemente por apartamentos compactos, com no máximo dois quartos e elevada densidade de paredes internas, esse benefício pode não se traduzir em ganhos perceptíveis para o usuário final. Nesses casos, a flexibilidade espacial proporcionada pelo sistema estrutural tende a ser limitada pela própria configuração arquitetônica das unidades habitacionais, reduzindo o impacto desse diferencial quando comparado a sistema de alvenaria estrutural.

8 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise comparativa entre os sistemas construtivos foi estruturada a partir do modelo Transformação–Fluxo–Valor (TFV), proposto por (KOSKELA, 1992). Nesse modelo, a produção é compreendida como a integração de três dimensões complementares: transformação dos insumos em produtos, fluxo das atividades ao longo do processo produtivo e geração de valor para o cliente. Com base nessa abordagem, foram definidos indicadores técnicos relacionados à produtividade e consumo de materiais (transformação), ao fluxo produtivo e à organização das atividades (fluxo), e aos benefícios gerados para o empreendimento (valor).

8.1 Consumo de insumos materiais para transformação do produto

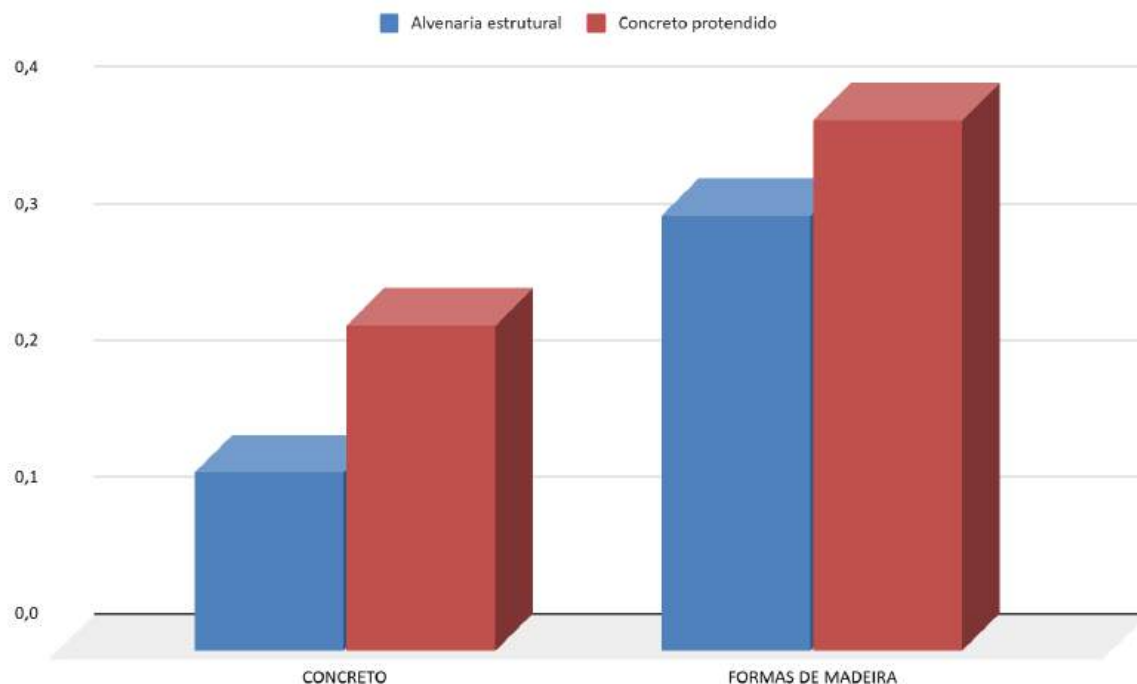
Baseado no princípio de construção enxuta qual sistema construtivo gerou um maior consumo dos respectivos materiais

Tabela 13 - Índices de consumo

ÍNDICES DE CONSUMO		
MATERIAL	A	B
	Alvenaria estrutural	Concreto protendido
CONCRETO m ³ /m ²	0,131	0,238
FORMAS DE MADEIRA m ² /m ²	0,318	0,388

Fonte: Autoria própria

Gráfico 1 - Análise entre alvenaria estrutural e concreto protendido



Fonte: Autoria própria

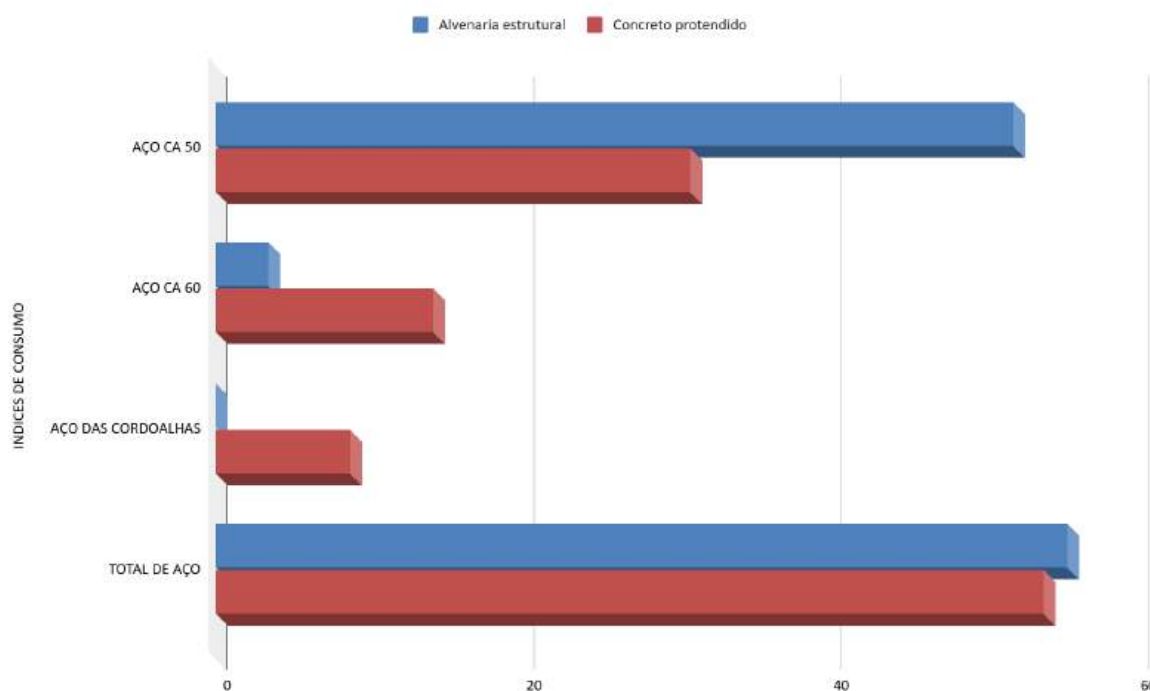
A partir da análise do gráfico apresentado, observa-se que, no conjunto de materiais considerados neste estudo, o sistema construtivo em alvenaria estrutural apresentou menor consumo relativo quando comparado ao sistema em concreto protendido, indicando maior economia na execução da superestrutura para o empreendimento analisado.

Tabela 14 - Índices do consumo de aço

ÍNDICES DE CONSUMO DO AÇO		
MATERIAL	A	B
	Alvenaria estrutural	Concreto protendido
AÇO CA 50	52	30,91
AÇO CA 60	3,48	14,22
AÇO DAS CORDOALHAS	0	8,84
TOTAL DE AÇO	55,48	53,97

Fonte: Autoria própria

Gráfico 2 - Análise do consumo de aço



Fonte: Autoria própria

Por outro lado, na análise do consumo de aço especificado em projeto, o sistema em alvenaria estrutural apresentou maior demanda de aço quando comparado ao sistema em concreto protendido. Esse resultado ocorre mesmo considerando que o sistema protendido utiliza elementos de aço específicos, como as cordoalhas de protensão, inexistentes no sistema de alvenaria estrutural. Entretanto, ao avaliar o consumo total de aço empregado na estrutura, verificou-se que o sistema em concreto protendido apresentou menor consumo global do material, demonstrando-se, nesse aspecto, maior economia do material.

8.2 Parâmetros do fluxo produtivo

Entende-se que parâmetros como variabilidade do processo, índice de complexidade e tempo de execução associado à produtividade constituem indicadores relevantes para a análise do fluxo produtivo em sistemas construtivos. Esses parâmetros permitem avaliar o comportamento das atividades ao longo do processo construtivo, considerando aspectos como estabilidade da produção, interdependência entre equipes e eficiência na utilização dos recursos. Sob a ótica do Lean Construction, a análise desses indicadores contribui para identificar possíveis fontes de desperdício, interrupções no fluxo de trabalho e oportunidades de melhoria no planejamento e na organização da produção.

8.2.1 Parâmetros de variabilidade

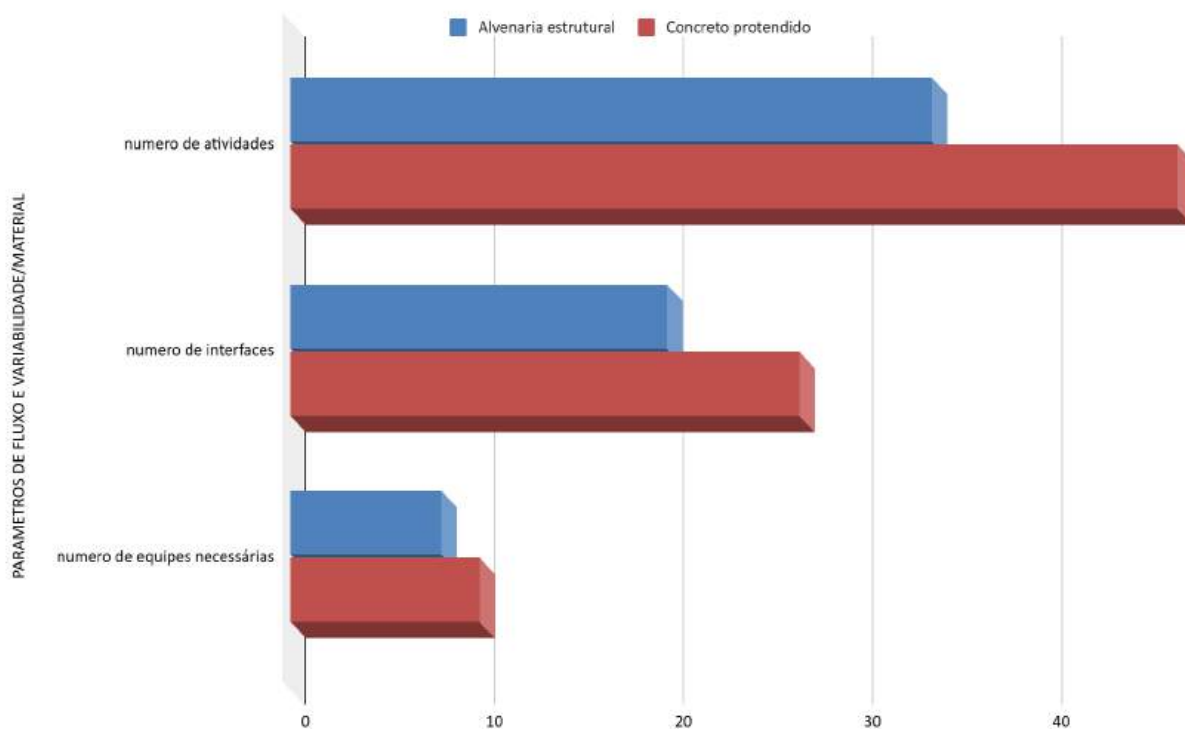
Tabela 15 - Parâmetros de variabilidade

PARÂMETROS DE FLUXO E VARIABILIDADE		
	A	B
	Alvenaria estrutural	Concreto protendido
Número de atividades	34	47
Número de interfaces	20	27
Número de equipes necessárias	8	10

Fonte: Autoria própria

Gráfico 3 - Parâmetros das atividades

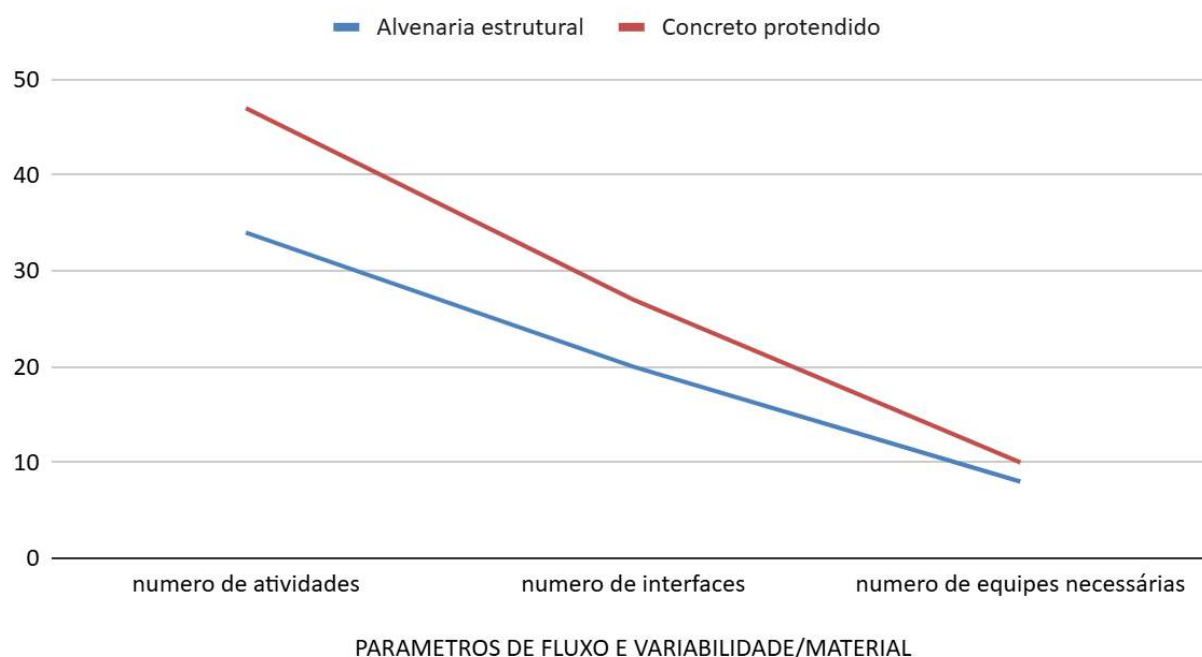
Alvenaria estrutural e Concreto protendido



Fonte: Autoria própria

Gráfico 4 - Parâmetro de fluxo e variabilidade do material

Alvenaria estrutural e Concreto protendido



Fonte: Autoria própria

Na análise dos parâmetros de variabilidade do processo construtivo, observou-se que o sistema em concreto protendido apresentou, de forma predominante, maior variabilidade quando comparado ao sistema em alvenaria estrutural. Esse comportamento indica maior instabilidade no fluxo de execução das atividades, resultante da maior interdependência entre etapas e da necessidade de procedimentos específicos. Dessa forma, nesse parâmetro o sistema em concreto protendido apresentou menor aderência ao princípio de fluxo contínuo proposto pelo Lean Construction, que busca reduzir variabilidades e interrupções no processo produtivo.

8.2.2 Parâmetros de complexidade

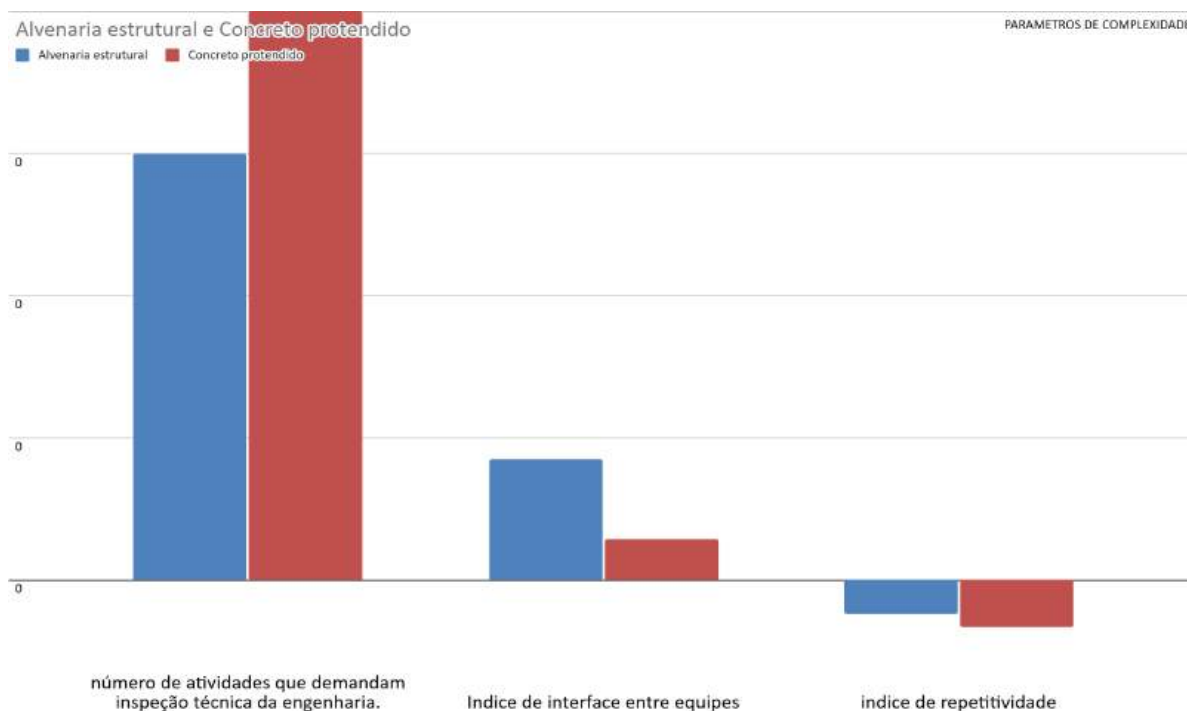
Tabela 16 - Parâmetros de complexidade

PARÂMETROS DE COMPLEXIDADE		
Indicadores	A	B
	Alvenaria estrutural	Concreto protendido
Índice de interface entre equipes	1,7	0,574
Índice de repetitividade	-0,471	-0,66
Número de atividades que demandam inspeção técnica da engenharia.	6	8

Fonte: Autoria própria

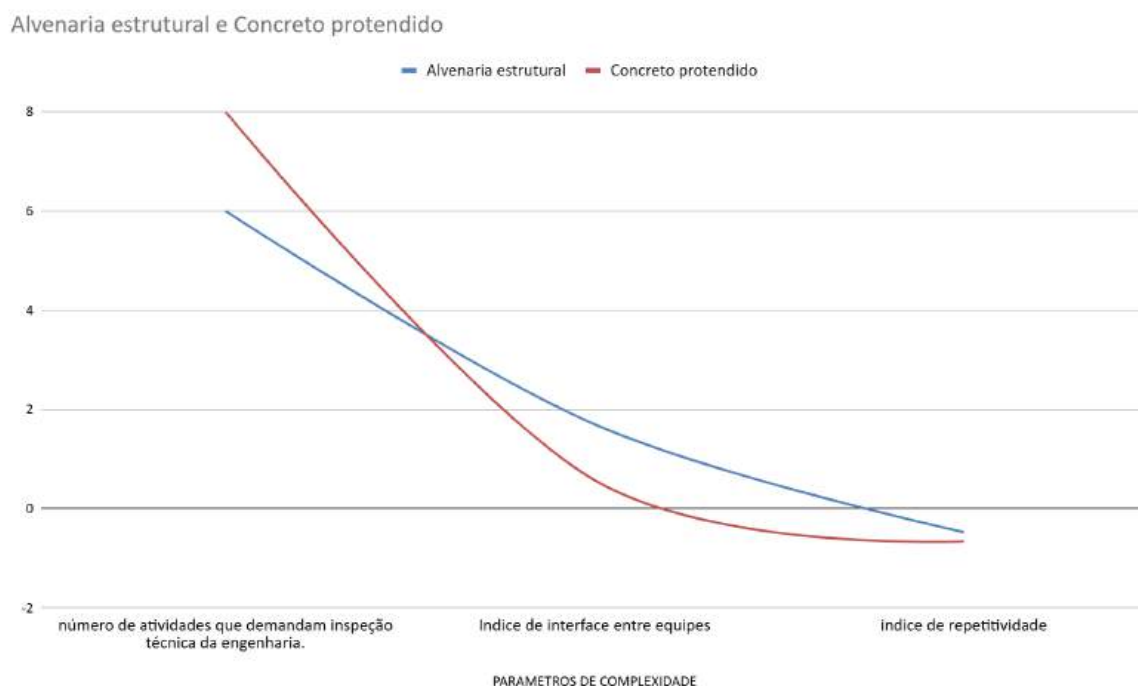
Observa-se que, para a construção do gráfico de complexidade do processo construtivo, foi realizada a conversão do índice de repetitividade para valores negativos. Tal procedimento foi adotado considerando que a repetitividade das atividades possui relação inversa com a complexidade do processo produtivo. Dessa forma, quanto menor a repetitividade das atividades executivas, maior tende a ser o nível de complexidade do conjunto de operações envolvidas. Assim, a conversão do índice permite representar graficamente essa relação inversa, facilitando a visualização comparativa entre os sistemas construtivos analisados.

Gráfico 5 - Parâmetros de complexidade



Fonte: Autoria própria

Gráfico 6 - Análises de complexidade



Fonte: Autoria própria

A análise dos gráficos indica que a complexidade dos sistemas construtivos apresentou comportamentos distintos. O sistema em alvenaria estrutural demonstrou maior complexidade organizacional, principalmente devido ao maior índice de interfaces entre as atividades. Esse fator aumenta a interdependência entre equipes e pode gerar gargalos no fluxo produtivo quando não há adequada coordenação. Além disso, esse sistema apresentou menor índice de repetitividade em comparação ao sistema em concreto protendido, o que também aponta para uma maior complexidade das atividades. Por outro lado, o sistema em concreto protendido apresentou maior complexidade técnica, pois envolve etapas mais especializadas, como protensão da laje, exigindo maior controle técnico das equipes. Dessa forma, observa-se que os sistemas apresentam diferentes tipos de complexidade: enquanto a alvenaria estrutural apresenta maior complexidade organizacional associada às interfaces entre atividades, o concreto protendido apresenta maior complexidade técnica relacionada às etapas especializadas de execução.

8.2.3 Tempo de ciclo

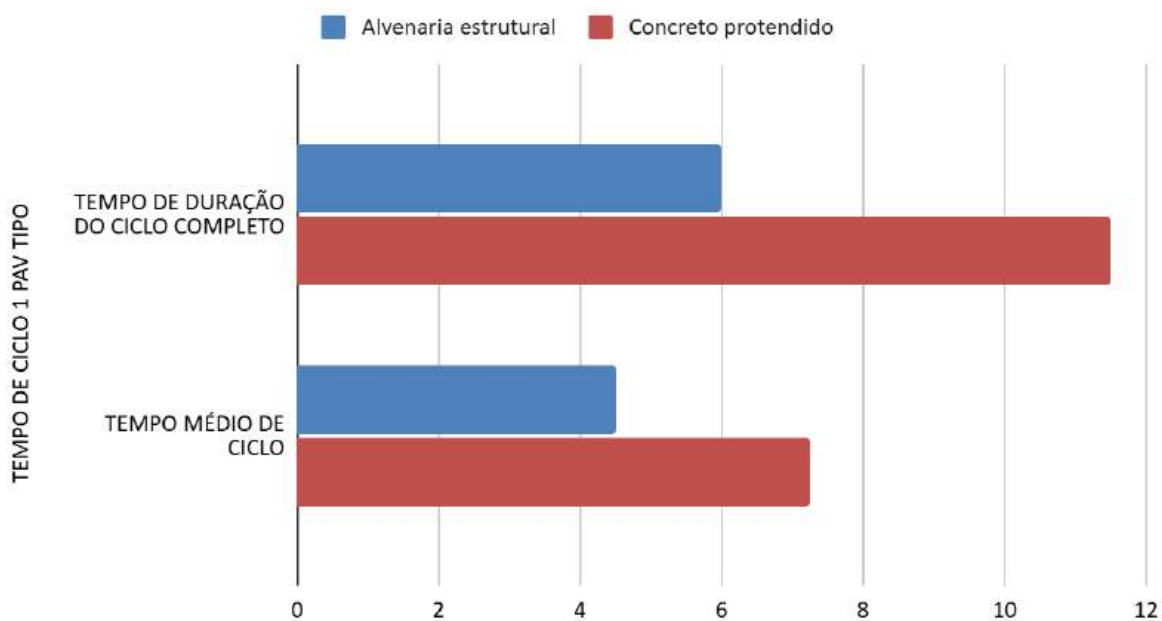
Tabela 17 - Tempo de ciclo do 1º pavimento tipo

TEMPO DE CICLO 1 PAV TIPO		
	A	B
tempo em (semanas)	Alvenaria estrutural	Concreto protendido
TEMPO DE DURAÇÃO DO CICLO COMPLETO	6	11,5
TEMPO MÉDIO DE CICLO	4,5	7,25

Fonte: Autoria própria

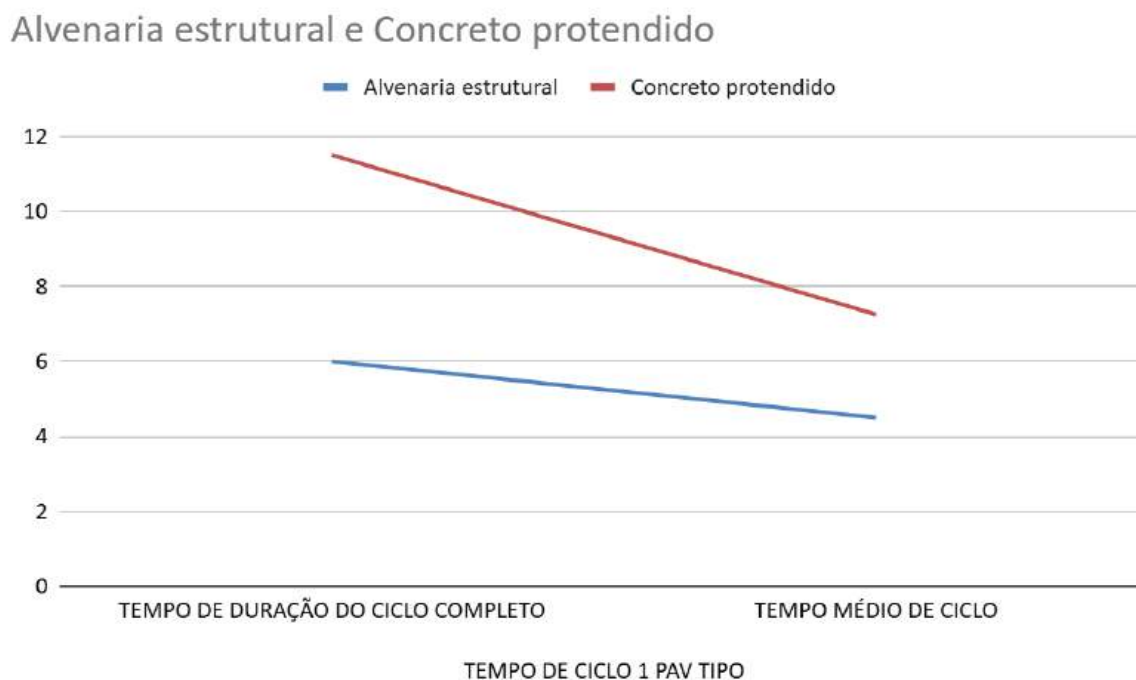
Gráfico 7 - Análise do tempo de ciclo do 1º pavimento tipo

Alvenaria estrutural e Concreto protendido



Fonte: Autoria própria

Gráfico 8 - Análise entre tempo de duração do ciclo completo e médio



Ainda na análise dos gráficos, observa-se que o tempo total de ciclo apresentou duração significativamente menor para o sistema em alvenaria estrutural quando comparado ao sistema em concreto protendido. Entretanto, ao analisar a média do tempo de ciclo por atividade, essa diferença torna-se menos acentuada.

Nos gráficos de tendência, percebe-se uma maior inclinação na reta associada ao sistema em concreto protendido, indicando uma possível maior taxa de ganho de produtividade ao longo do avanço para os pavimentos subsequentes. Esse comportamento sugere que, embora o sistema em alvenaria estrutural apresente melhor desempenho no cenário analisado, o sistema em concreto protendido pode apresentar vantagens produtivas em empreendimentos com maior número de pavimentos tipo, nos quais o efeito de repetitividade das atividades tende a favorecer a estabilização do processo produtivo e a otimização das equipes.

Dessa forma, os resultados indicam que o desempenho relativo entre os sistemas construtivos pode variar em função da escala do empreendimento, sendo necessário considerar não apenas o tempo de ciclo observado no estudo de caso, mas também o potencial de ganho de produtividade associado à repetição dos ciclos construtivos em edificações de

maior porte.

A repetitividade de ciclos construtivos em edifícios de múltiplos pavimentos tende a favorecer ganhos de produtividade decorrentes do aprendizado das equipes e da estabilização do fluxo produtivo (FORMOSO et al., 2002; KOSKELA, 1992).

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No contexto desta pesquisa, em que não foi realizada uma análise de mercado ou de preferência do consumidor, a avaliação dos indicadores de geração de valor torna-se relativamente abstrata. Dessa forma, embora o empreendimento B, em concreto protendido, apresente maior potencial de geração de valor em função da possibilidade de maiores vãos e maior flexibilidade arquitetônica, esse diferencial somente se tornaria efetivamente relevante caso houvesse evidências de demanda ou valorização desse atributo por parte do usuário final ou do mercado imobiliário.

9.1 Conclusão

A presente pesquisa teve como objetivo realizar uma análise comparativa da viabilidade técnico-produtiva entre o sistema construtivo em alvenaria estrutural com laje treliçada e o sistema estrutural em concreto protendido com vedação convencional, sob a ótica dos princípios do Lean Construction, considerando sua aplicação em edificações residenciais multifamiliares classificadas como R5 no município de Cabedelo–PB. Para isso, adotou-se como unidade de análise o ciclo construtivo correspondente à execução da superestrutura e vedação de um pavimento tipo, permitindo avaliar de forma comparável os dois sistemas construtivos a partir da interpretação técnica dos projetos arquitetônicos e estruturais.

A análise foi estruturada com base em indicadores associados às dimensões da teoria Transformação-Fluxo-Valor (TFV), proposta por Koskela (1992), contemplando aspectos relacionados ao consumo de insumos materiais, à organização do fluxo produtivo e à geração de valor ao usuário final da edificação.

No que se refere à dimensão da transformação, os resultados indicaram diferenças relevantes entre os sistemas construtivos quanto ao consumo de materiais estruturais. O

sistema em concreto protendido apresentou tendência de maior consumo de determinados insumos estruturais quando comparado ao sistema em alvenaria estrutural.

Sob a perspectiva do fluxo produtivo, observou-se que o sistema em alvenaria estrutural apresentou menor quantidade de atividades, menor número de interfaces entre equipes e maior estabilidade do processo construtivo. Essas características tendem a favorecer a previsibilidade do planejamento e a redução da variabilidade operacional, aspectos diretamente associados aos princípios do Lean Construction. Por outro lado, o sistema em concreto protendido apresentou maior complexidade executiva e maior dependência de atividades especializadas, o que pode aumentar a sensibilidade do processo produtivo a atrasos e interferências entre equipes caso não haja planejamento adequado.

Entretanto, ao analisar o tempo de ciclo, verificou-se que, embora o ciclo inicial do sistema em alvenaria estrutural tenha se mostrado inferior, a análise gráfica indicou maior inclinação na curva correspondente ao sistema em concreto protendido. Esse comportamento sugere potencial de redução do tempo médio de ciclo em empreendimentos com maior número de pavimentos tipo, nos quais os ganhos de produtividade tendem a se acumular ao longo da repetição dos ciclos construtivos.

No que diz respeito à geração de valor, observou-se que o sistema em concreto protendido apresentou vantagens relacionadas ao melhor aproveitamento espacial da edificação, especialmente em áreas como a garagem, onde a redução do número de pilares permite maior área útil para manobra e estacionamento de veículos. Essa característica pode representar maior valor percebido pelo usuário final do empreendimento, conforme discutido na literatura do Lean Thinking.

De forma geral, os resultados indicam que não existe um sistema estrutural universalmente superior, sendo a escolha entre alvenaria estrutural e concreto protendido dependente das prioridades estabelecidas para o empreendimento. Enquanto a alvenaria estrutural tende a favorecer maior estabilidade produtiva, padronização e repetitividade das atividades, o concreto protendido apresenta maior potencial de geração de valor espacial e otimização estrutural.

Dentre os indicadores analisados, o sistema em alvenaria estrutural apresentou aderência ligeiramente superior aos princípios da teoria Transformação-Fluxo-Valor do Lean Construction no caso específico de edificações classificadas no R5. Contudo, como limitação

da pesquisa, destaca-se o fato de que a análise foi baseada exclusivamente na interpretação técnica de projetos arquitetônicos e estruturais, sem acompanhamento direto da execução em campo. Dessa forma, fatores relacionados à gestão do canteiro, à produtividade real das equipes e às condições específicas de obra não puderam ser observados empiricamente.

Nesse sentido, recomenda-se que estudos futuros aprofundem a investigação por meio de análises orçamentárias com dados reais de empreendimentos e estudos em obras executadas, incluindo medições de produtividade real, aplicação de ferramentas de planejamento enxuto, como o *Last Planner System*, e avaliação de indicadores de confiabilidade do planejamento, como o *Percent Plan Complete* (PPC).

Por fim, espera-se que os resultados apresentados contribuam para ampliar a compreensão das implicações técnico-produtivas associadas à escolha de sistemas estruturais em edificações residenciais, oferecendo subsídios para projetistas, construtoras e gestores de obras na tomada de decisão ainda nas fases iniciais de concepção e planejamento dos empreendimentos, em consonância com os princípios do Lean Construction.

10 REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT).
NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT).
NBR 7197: Projeto e execução de estruturas de concreto protendido. Rio de Janeiro: ABNT, 1989.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT).
NBR 14859: Laje pré-fabricada – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT).
NBR 15575: Edificações habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT).
NBR 15961: Alvenaria estrutural – Blocos de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- ANDERSON, T. W.
An Introduction to Multivariate Statistical Analysis. 3. ed. Hoboken: Wiley, 2003.
- BALLARD, Glenn.
The Last Planner System of Production Control. Birmingham: University of Birmingham, 2000.
- BALLARD, Glenn; HOWELL, Gregory.

Shielding production: essential step in production control. *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 124, n. 1, p. 11–17, 1998.

BURLAMAQUE, Diego Badzinski.

Sistema híbrido de mesa em concreto armado para edificações em alvenaria estrutural.

Balneário Camboriú: Centro Universitário Avantis – UNIAVAN, 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil).

Disponível em:

<https://www.idd.edu.br/file-repository/tcc/4666e38add848dc5e7bf2c37ad8a2e1e.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2026.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL.

SINAPI: caderno técnico de composições – concreto protendido. Brasília: CAIXA, 2023.

Disponível em: <https://www.caixa.gov.br/sinapi>. Acesso em: 20 mar. 2026.

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues.

Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado. São Carlos: EduFSCar, 2004.

CBIC – CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO.

Dados do setor da construção civil no Brasil. Brasília: CBIC, 2023. Disponível em:

<https://cbic.org.br>. Acesso em: 20 mar. 2026.

FORMOSO, Carlos Torres et al.

Perdas na construção civil: conceitos, classificações e métodos de avaliação. Porto Alegre: NORIE/UFRGS, 2002.

FREYSSINET, Eugène.

Une révolution dans l'art de bâtir: la précontrainte. Paris: Dunod, 1928.

FUSCO, Péricles Brasiliense.

Técnica de armar estruturas de concreto. São Paulo: Pini, 2002.

HOWELL, Gregory A.

What is Lean Construction? In: INTERNATIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION CONFERENCE, 7., 1999, Berkeley. *Proceedings...* Berkeley, 1999.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA.

Indicadores da construção civil no Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

KANT, Immanuel.

Fundamentação da metafísica dos costumes. São Paulo: Martins Fontes, 2009.

KOSKELA, Lauri.

Application of the new production philosophy to construction. Stanford: Stanford University, 1992.

LEONHARDT, Fritz.

Prestressed Concrete: Design and Construction. Berlin: Ernst & Sohn, 1979.

LIN, T. Y.

Design of Prestressed Concrete Structures. New York: Wiley, 1981.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C.

Applied Statistics and Probability for Engineers. 6. ed. New York: Wiley, 2014.

OHNO, Taiichi.

Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production. Portland: Productivity Press, 1988.

PARSEKIAN, Guilherme Aris.

Alvenaria estrutural. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

PFEIL, Walter.

Concreto protendido. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

PINI.

TCPO: tabelas de composições de preços para orçamentos. 15. ed. São Paulo: Pini, 2017. ISBN 978-85-7266-481-3.

RAMALHO, Márcio Antônio; CORRÊA, Márcio Roberto Silva.

Projeto de edifícios de alvenaria estrutural. São Paulo: Pini, 2003.

SABBATINI, Fernando Henrique.


Desenvolvimento de métodos, processos e sistemas construtivos: formulação e aplicação de uma metodologia. São Paulo: EPUSP, 2003.

SFREDDO, André.

Indicadores de desempenho para avaliação da produção em edifícios verticais. Porto Alegre: UFRGS, 2012.

WOMACK, James P.; JONES, Daniel T.

Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation. New York: Simon & Schuster, 1996.

	INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
	Campus João Pessoa - Código INEP: 25096850
	Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, CEP 58015-435, João Pessoa (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0002-56 - Telefone: (83) 3612.1200

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Trabalho de Conclusão de Curso

Assunto:	Trabalho de Conclusão de Curso
Assinado por:	Camila Fama
Tipo do Documento:	Tese
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Camila Campos Gomez Fama, COORDENADOR(A) DE CURSO - FUC1 - CBEC-JP**, em 08/04/2026 19:32:48.

Este documento foi armazenado no SUAP em 08/04/2026. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1829113

Código de Autenticação: f1bbd68745

