



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO ENGENHARIA CIVIL

Ellen Tacconi Ferraz de Campos

**Modelo para Caracterizar a Organização da Produção Fabril em Empresas de
Construções Off-site.**

Florianópolis
2024

Ellen Tacconi Ferraz de Campos

**Modelo para Caracterizar a Organização da Produção Fabril em Empresas de
Construções Off-site**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharela em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Juan José Oviedo Haito

Florianópolis
2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Campos, Ellen Tacconi Ferraz de
Modelo para Caracterizar a Organização da Produção Fabril
em Empresas de Construções Off-site / Ellen Tacconi Ferraz
de Campos ; orientador, Ricardo Juan José Oviedo Haito,
2024.
94 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Construção Modular. 3.
Construção Off-site. 4. Construção Pré Fabricada. I. Haito,
Ricardo Juan José Oviedo. II. Universidade Federal de
Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

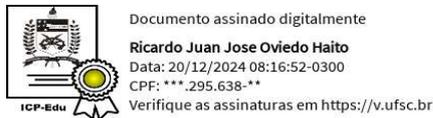
Ellen Tacconi Ferraz de Campos

Modelo para Caracterizar a Organização da Produção Fabril em Empresas de Construções Off-site

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheira Civil e aprovado em sua forma final pelo Curso o Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 20 de dezembro de 2024.

Banca examinadora



Prof. Ricardo Juan José Oviedo Haito, Dr. Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Eduardo Lobo, Dr.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Engenheiro Paulo Oliveira
Avaliador
Aratau Construção Modular

Engenheiro Ramon Polnow
Avaliador
Kata Offsite

Engenheiro Maurian Guimarães Carvalho
Avaliador
M7 Engenharia e Consultoria

Florianópolis, 2024

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha mais profunda gratidão a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a conclusão deste trabalho e para minha trajetória acadêmica, marcada por grandes desafios e aprendizados.

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Roseli e Marcelo, pelos ensinamentos sobre o valor da dedicação e do estudo. Em especial, ao meu pai, Marcelo, cuja orientação constante, apoio incondicional e companheirismo, mesmo à distância, foram indispensáveis para que eu chegasse até aqui. Você é, sem dúvida, um exemplo.

À minha madrasta, Sílvia, expresse meu carinho e minha gratidão por acreditar em mim e por ensinar sobre o verdadeiro significado de família. Os momentos que você proporcionou tornaram esta jornada especial e memorável.

Ao meu irmão Lucas, pela nossa maior aproximação durante essa jornada, mesmo com a distância.

Ao meu namorado e companheiro, Igor, obrigada por sua paciência, compreensão e apoio em todos os momentos de dificuldade. Sua presença tornou essa caminhada mais leve e repleta de amor e motivação.

Ao meu querido amigo Rafael, que tornou o cotidiano mais leve e divertido. Dividir o apartamento 328 com você foi como viver em um seriado de comédia ao estilo *Friends*. Minha gratidão por sua amizade e companheirismo.

À minha amiga e parceira de graduação, Victoria, obrigada por tornar a rotina acadêmica, tantas vezes desgastante e desafiadora, repleta de risadas e bom humor. Sua amizade é um presente que levarei para a vida.

À Alice, minha amiga e com quem compartilhei meu primeiro lar em Florianópolis, minha gratidão por construir comigo um vínculo que transcendeu a amizade e se tornou família.

Aos colegas de faculdade e aos docentes que marcaram minha trajetória acadêmica, agradeço pelos ensinamentos, pela convivência enriquecedora e pelos momentos compartilhados ao longo desses anos.

Ao meu orientador, Dr. Ricardo Juan José Oviedo Haito, minha gratidão por aceitar me orientar, acreditar no meu potencial e contribuir intensamente para o meu crescimento profissional. Obrigada pela paciência, por explicar quantas vezes fosse necessário e pela dedicação em estar sempre presente e disponível para sanar minhas dúvidas. Sua orientação foi essencial para que eu alcançasse este momento tão significativo.

Neste aspecto, gostaria de agradecer a ele pela indicação dos trabalhos de iniciação científica sobre a organização da produção fabril de Jennifer Bistafa Liu, Matheus Simon Vicente, Matheus Henrique Dalboni Basilio da Silva e de Gabriela Baú que foram o ponto de partida para o modelo aqui proposto.

RESUMO

A indústria da construção civil enfrenta desafios relacionados à produtividade, sustentabilidade e controle sobre os processos produtivos. Nesse contexto, a industrialização da construção surge como uma alternativa promissora, destacando-se nela as construções *off-site*. Entre suas tipologias, a construção modular é uma das mais representativas, oferecendo benefícios significativos, mas enfrentando desafios, como a organização da produção fabril em termos de pré-fabricação e estratégias de customização e produção. Este trabalho teve como objetivo investigar e caracterizar a organização da produção fabril em empresas de construção modular e *off-site*, propondo um modelo estruturado em quatro etapas: 1) projeto; 2) planejamento; 3) fabricação; e 4) logística. Para tanto, utilizou-se uma abordagem qualitativa baseada na revisão de literatura e entrevistas com especialistas do setor. Os resultados incluem a elaboração de um modelo que integra linhas de produto e componentes, permitindo sua aplicação em empresas que produzem módulos volumétricos 3D, painéis, chassis metálicos e kits pré-fabricados com modularidade. Como principal contribuição, o modelo oferece uma ferramenta prática para categorizar a organização da produção modular e *off-site*, promovendo maior integração entre teoria e prática.

Palavras-chave: Construção modular. Construção *off-site*. Pré-fabricação. Industrialização da construção.

ABSTRACT

The construction industry faces challenges related to productivity, sustainability and control over production processes. In this context, the industrialization of construction has emerged as a promising alternative, particularly the off-site construction. Among its types, modular construction is one of the most representative, offering significant benefits but facing challenges such as the organization of factory production in terms of prefabrication and customization and production strategies. The aim of this study was to investigate and characterize the organization of manufacturing production in modular and off-site construction companies, proposing a model structured into four stages: 1) design; 2) planning; 3) manufacturing; and 4) logistics. To this end, a qualitative approach was used, based on a literature review and interviews with specialists in the sector. The results include the development of a model that integrates product lines and components, allowing it to be applied in companies that produce 3D volumetric modules, panels, metal chassis and prefabricated kits with modularity. As its main contribution, the model offers a practical tool for categorizing the organization of modular and off-site production, promoting greater integration between theory and practice.

Keywords: Modular construction. Off-site construction. Prefabrication. Construction industrialization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Módulos 2D e 3D.....	19
Figura 2 - Aumento da complexidade em projetos modulares.....	24
Figura 3 - Fluxo de trabalho do processo de design com princípios do DfMA	26
Figura 4 – Etapa de otimização do modelo BIM.....	26
Figura 5 - Motivos para adotar ou evitar a pré-fabricação	28
Figura 6 - Classificação dos objetivos de produção	28
Figura 7 - Representação gráfica da relação entre customização e volume de produção	31
Figura 8 - Modelos de customização em massa no espectro entre padronização e customização..	32
Figura 9 – Matriz de estratégias da cadeia de suprimentos para customização em massa.....	33
Figura 10 – Extensão da padronização da produção no projeto "NewWay" da GSK.....	34
Figura 11 - Ilustração do posicionamento do CODP.....	35
Figura 12 - Sequência de atividades que agregam valor ao produto em relação ao CODP	36
Figura 13 - Representação do aumento do grau de pré-engenharia	36
Figura 14 - Estratégias de produção para Winch.....	37
Figura 15 - Estratégias de produção para Pan e Arrif 2011, a partir de Winch 2003.....	38
Figura 16 - Níveis de utilização dos componentes modulares e pré-fabricados	41
Figura 17 -Tipos de sistema de produção	42
Figura 18 - Níveis de padronização e volume de produção	43
Figura 19 - Níveis de industrialização.....	45
Figura 20 - Classificação dos sistemas de produção para Slack, 2018	47
Figura 21 - Resumo das principais características dos sistemas de produção.....	49
Figura 22 - Adaptação da matriz de sistemas de produção para construção off-site	49
Figura 23 - Relação ideal entre volume e variedade e os tipos de arranjo físico	52
Figura 24 - Rede de valor logístico	53
Figura 25 - Exemplo de cadeia de fornecedores para um empreendimento de construção	54
Figura 26 - Formas distintas de governança.....	55
Figura 27 - Orientação das estratégias de relacionamento com fornecedor.....	56
Figura 28 - Atividades de suporte para a integração dos componentes no canteiro de obras	59
Figura 29 - Ciclo da construção modular	59
Figura 30 - Metodologia.....	61
Figura 31 - Etapas e perguntas relacionadas ao ciclo de vida da construção modular.....	65
Figura 32 - Modelo Teórico proposto para caracterização da produção modular.....	67
Figura 33 – Esquema que ilustra Linha de Produto e Linha de Componentes.....	76
Figura 34 - Etapa de Projeto.....	77
Figura 35 - Etapa de Planejamento.....	79
Figura 36 - Etapa de Fabricação.....	81
Figura 37 - Etapa de Logística.....	83

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparação das definições de módulo e modularidade na literatura.....	17
Quadro 2 - Categorias de produtos pré-fabricados baseada em Chauhan et al. (2022) - Traduzido	20
Quadro 3 - Categorias de produtos pré-fabricados por Ginigaddara et al. (2022) - Traduzido	21
Quadro 4 - Agrupamento dos objetivos de produção na construção modular	29
Quadro 5 - Comparação entre estratégias de customização na manufatura e equivalente na construção.....	39
Quadro 6 - Síntese das características dos modos de construir	44
Quadro 7 - Classificação dos sistemas de produção para Miltenburg (2005)	47
Quadro 8 - Tipos de layout de arranjos físicos.....	50
Quadro 9 - Classificação das relações com fornecedores a partir de Cox e Thompson 1997	57
Quadro 10 - Entrevistados.....	62
Quadro 11 - Parâmetros para identificação do volume de produção.	68
Quadro 12 - Classificação dos níveis de pré-fabricação.	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

OSC – *Off-Site Construction*

ABMI – Associação Brasileira do Mercado Imobiliário

MMC – Métodos Modernos de Construção

BIM – *Building Information Modeling*

DfMA – *Design for Manufacturing and Assembly*

CODP – *Customer Order Decoupling Point*

JIT – *Just-in-Time*

MTO – *Make-to-Order*

ETO – *Engineer-to-Order*

ATO – *Assemble-to-Order*

MTS – *Make-to-Stock*

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivos Gerais	13
1.1.2	Objetivos Específicos	13
1.2	LIMITAÇÕES DO TRABALHO	14
2.	REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1	INDUSTRIALIZAÇÃO E CONSTRUÇÃO OFF-SITE.....	15
2.1.1	Construção Off-Site e Construção Modular.....	15
2.2	CARACTERÍSTICAS DO PROJETO EM CONTRUÇÕES MODULARES... 16	
2.2.1	Módulo e Modularidade	16
2.2.2	Tipos De Módulos.....	18
2.2.3	Componentes e Elementos Modulares	22
2.2.4	Compatibilização De Projetos.....	23
2.2.5	BIM (<i>Building Information Model</i>)	24
2.2.6	DFMA (<i>Design Manufacturing and Assembly</i>)	25
2.3	PLANEJAMENTO	27
2.3.1	Objetivo De Produção	27
2.3.2	Produção e Customização em Massa	29
2.3.3	Padronização e Customização	31
2.3.4	Variedade versus Customização.....	33
2.3.5	Estratégias de Customização da Produção	34
2.4	FABRICAÇÃO.....	40
2.4.1	Nível de pré-fabricação dos componentes e terceirização da produção.....	40
2.4.2	Modo de fabricação e industrialização.....	43
2.4.3	Sistema de produção dos módulos	46
2.4.4	Layout de Fabricação	50
2.5	LOGÍSTICA DE SUPRIMENTOS	52
2.5.1	Gestão da cadeia de suprimentos	52
2.5.2	Estratégia de abastecimento de suprimentos.....	54
2.5.3	Estratégia de relacionamento com fornecedores.....	55

2.6	TRANSPORTE, MONTAGEM E INSTALAÇÃO IN LOCO	58
2.6.1	Modo de Transporte de Módulos	58
2.6.2	Montagem e Instalação.....	59
3.	METODOLOGIA.....	61
3.1	PERGUNTA DE PESQUISA E ENTENDIMENTO DO TEMA.....	62
3.2	ESCOLHA DAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	62
3.3	COLETA DE DADOS.....	63
3.3.1	Teórica.....	63
3.3.2	Prática.....	63
3.4	ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS	63
3.5	ESCRITA DE RESULTADOS E CONCLUSÕES.....	64
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	65
4.1	MODELO TEÓRICO	65
4.2	ENTREVISTA COM ESPECIALISTAS DO MERCADO	69
4.2.1	Entrevistado A.....	70
4.2.2	Entrevistado B	71
4.2.3	Entrevistado C	72
4.2.4	Entrevistado D.....	73
4.2.5	Principais Contribuições	74
4.3	PROPOSTA DE MODELO FINAL.....	75
4.3.1	Apresentação por Etapas do Modelo.....	76
4.4	DISCUSSÕES	83
5	CONCLUSÃO.....	85
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	85
	REFERÊNCIAS	87
	APÊNDICE A – Modelo final de caracterização da organização da produção Off-site	93

1. INTRODUÇÃO

O setor da construção civil desempenha um papel crucial na economia brasileira, representando cerca de 5,8% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional em 2022, conforme dados da Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC, 2023). Além de ser um motor para o crescimento econômico, o setor é um dos maiores empregadores do país, com aproximadamente sete milhões e meio de trabalhadores diretamente envolvidos em 2021 (Abramat, 2022). Contudo, a indústria da construção exerce um impacto ambiental significativo, sendo responsável por quase metade do consumo global de energia e matérias-primas (Labaran et al., 2022).

Apesar de sua importância econômica, a construção civil enfrenta desafios substanciais em termos de eficiência, produtividade e sustentabilidade. Tradicionalmente conhecida por sua baixa inovação e altos índices de desperdício, a indústria tem dificuldades para acompanhar os avanços tecnológicos que poderiam otimizar sua produtividade e mitigar seu impacto ambiental (Hossain; Nadeem, 2019). Além disso, um estudo para a ABMI (2020), projeta que o déficit habitacional no Brasil pode atingir 30,7 milhões de moradias até 2030, destacando a necessidade urgente de modernização e adoção de novas tecnologias no setor.

Os Métodos Modernos de Construção (MMC) representam uma alternativa promissora frente aos desafios da construção tradicional, caracterizada pela execução majoritariamente in loco (Ginigaddara et al., 2022; Salama et Al., 2017). Esses métodos abrangem práticas de construção *off-site*, nas quais parte significativa do processo é transferida para ambientes fabris controlados, permitindo a fabricação de componentes, painéis, módulos e até edifícios completos, que são posteriormente transportados e montados no canteiro de obras (Salama et al., 2017). Essa abordagem inclui uma ampla gama de tipologias, desde elementos básicos, como portas e janelas, até estruturas volumétricas complexas, como módulos pré-fabricados. (Ginigaddara; Perera, 2019). A escolha do nível de pré-fabricação, bem como das estratégias de customização e produção, é essencial para a efetividade dos MMC e sua implementação no setor, industrializando-o.

Neste sentido, a industrialização na construção civil é entendida como um processo que busca transferir atividades tradicionalmente realizadas no canteiro de obras para um ambiente industrializado, mais controlado e otimizado (Baú, 2021). Nesse contexto, a construção *off-site* surge como uma aplicação direta da industrialização, onde componentes, elementos ou módulos são produzidos em fábricas especializadas e transportados para montagem no local da obra (Ferreira, 2024). Esse processo incorpora princípios como padronização, modularização e produção em série, que visam aumentar a eficiência, a qualidade e a sustentabilidade das construções (Kamali; Hewage, 2016). Além disso, a industrialização engloba não apenas a automação dos processos, mas também a mecanização e a pré-fabricação, permitindo maior controle e otimização das etapas produtivas (Rosso, 1980).

Apesar dos benefícios evidentes, a implementação da construção *off-site* ainda enfrenta barreiras significativas, como o alto investimento inicial em instalações fabris (Ferreira, 2024) a resistência à mudança por parte dos profissionais da indústria, acostumados aos métodos construtivos tradicionais (Baú, 2021; Soares, 2024), e a complexidade do planejamento logístico, envolvendo transporte e prazos de entrega (Baú, 2021; Ferreira, 2024; Li et al., 2019).

Adicionalmente, a percepção de que a construção off-site limita a flexibilidade de projeto e a customização também contribui para a lenta adoção dessa abordagem (Ferreira, 2024).

Nesse contexto, o sistema de construção modular se destaca por apresentar um nível mais elevado de produção *off-site* e por ser amplamente estudado devido às suas características produtivas e benefícios potenciais (Baú, 2021; Ferreira, 2024; Soares, 2024). Esse sistema é composto por módulos construídos em fábricas e entregues no canteiro de obras em um estágio avançado de finalização, prontos para serem montados e consolidados na fundação permanente (Baú, 2021).

A construção modular tem ganhado destaque como uma abordagem eficaz para enfrentar os problemas do setor, como a escassez de mão de obra e baixa produtividade, devido aos seus benefícios: maior produtividade, redução de tempo, melhor qualidade e segurança ocupacional (Hyun et al., 2020). Entretanto, apesar de suas vantagens, sua aplicação ainda é limitada quando comparada à construção convencional (Abdul Nabi; El-Adaway, 2020; Baú, 2021; Kamali; Hewage; Milani, 2018).

Embora a literatura aborde extensivamente os benefícios, desafios, custos e redução de prazos desse tipo de construção, conforme aponta Abdul Nabi e El-Adaway (2020), a análise da organização da produção em empresas que atuam com construção modular ainda é incipiente. Recentemente, Ferreira (2024) destacou a relevância da construção volumétrica *off-site* na melhoria da eficiência construtiva em relação às estratégias de customização. Baú (2021) mapeou o processo executivo de edificações modulares, detalhando as etapas de sua produção. Apesar disso, permanecem lacunas sobre modelos estruturados que categorizem e aparelhem a produção fabril em termo de organização da produção de maneira abrangente.

Assim, a motivação deste trabalho reside em responder à seguinte pergunta de pesquisa: Como é organizada a produção fabril em empresas de construção *off-site*, considerando diferentes níveis de pré-fabricação e o uso de sistemas modulares? A investigação busca oferecer um modelo estruturado que contribua para o entendimento e a categorização da produção modular e *off-site*, promovendo uma base prática e teórica para a modernização e industrialização do setor.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos Gerais

Este trabalho tem como objetivo geral investigar e caracterizar a organização da produção fabril em empresas de construção off-site, com foco em empresas que operam na construção modular, por meio de um modelo estruturado em quatro etapas: projeto, planejamento, fabricação e logística.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um modelo teórico a partir da literatura para categorizar a organização da produção modular;

- Comparar o modelo teórico com base nas contribuições práticas de entrevistas com profissionais do mercado, ampliando sua aplicabilidade para diferentes tipos de empresas e produtos;
- Elaborar um modelo final que integre linhas de produto e componentes, para categorização da organização da produção modular e off-site.

1.2 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Este trabalho apresenta algumas limitações que devem ser consideradas para a interpretação dos resultados e das propostas realizadas. Primeiramente, a pesquisa empírica foi conduzida com base em um número restrito de entrevistas com profissionais do mercado, o que pode limitar a abrangência das conclusões. Além disso, o modelo proposto não foi aplicado diretamente em empresas de construção *off-site*, restringindo sua validação prática a uma análise qualitativa com profissionais que atuam nesse mercado.

Outra limitação está relacionada ao foco principal nas etapas de planejamento e fabricação, com menor profundidade nas etapas de projeto, logística e montagem. As simplificações realizadas para caracterizar o modo de fabricação industrializado e as variáveis logísticas também podem influenciar a aplicabilidade do modelo em contextos mais específicos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 INDUSTRIALIZAÇÃO E CONSTRUÇÃO OFF-SITE

A industrialização da construção civil é uma resposta estratégica às limitações de produtividade enfrentadas por este setor, frequentemente criticado por sua baixa eficiência (Barbosa et al., 2017; Baú, 2021). Enquanto a produtividade da construção civil global cresceu apenas cerca de 1% ao ano, outros setores industriais experimentaram avanços significativos, alcançando taxas de crescimento de até 3,6% no mesmo período (Barbosa et al., 2017). A construção off-site emergiu como uma solução central nesse processo, caracterizada pela transferência de atividades construtivas para ambientes fabris controlados, com o objetivo de otimizar a qualidade, os prazos e os custos das obras (Baú, 2021; Kamali; Hewage, 2016)

A construção off-site é amplamente definida como o processo que engloba o projeto, a fabricação e a montagem de componentes ou módulos construtivos em um local diferente do da instalação final, promovendo eficiência e rapidez na execução das obras (Ferreira, 2024; Smith; Quale, 2017). Essa abordagem não apenas melhora a produtividade, mas também eleva os padrões de qualidade e sustentabilidade das construções (Ginigaddara et al., 2022; Kamali; Hewage, 2016).

Alguns autores, como Warszawski (1999) argumentam que a construção *off-site* pode ser considerada sinônimo de industrialização quando envolve automação nos processos. Por outro lado Sabbatini (1989) conceitua a industrialização na construção como um processo evolutivo que, por meio da implementação de inovações tecnológicas, métodos organizacionais e técnicas de controle, busca aprimorar o desempenho da atividade construtiva e aumentar sua produtividade.

Para Jonsson e Rudberg (2014) a industrialização implica que a maior parte das atividades de valor agregado ocorre fora do canteiro, através da pré-fabricação de elementos e módulos. Dentro dessa perspectiva, a construção *off-site* abrange técnicas diversas, incluindo sistemas modulares, painéis pré-fabricados, elementos construtivos e componentes pré-fabricados (Ginigaddara; Perera, 2019).

2.1.1 Construção Off-Site e Construção Modular

A construção modular é amplamente reconhecida como uma subcategoria da construção *off-site* (Ginigaddara; Perera, 2019) se distingue pela produção de módulos com alto grau de acabamento (BAÚ, 2021). Essa abordagem se baseia nos princípios da construção *off-site*, mas eleva o nível de industrialização ao concentrar a maior parte do processo construtivo em fábricas especializadas, garantindo maior controle sobre qualidade, custos e prazos (Lawson; Ogden; Goodier, 2014).

Gibb (2001), Kempton e Syms (2009) destacam que a construção modular não apenas incorpora os benefícios da construção *off-site*, mas também potencializa a eficiência operacional por meio da padronização e da fabricação de módulos. A modularidade permite que módulos sejam fabricados em um ambiente industrializado, deixando apenas as etapas finais de montagem e acabamento para o canteiro de obras (Coyado Petrella, 2016; Ferreira,

2024). Isso reduz significativamente o tempo de execução e os custos associados, além de aumentar o controle sobre o processo construtivo (Gibb, 2001; Kempton; Syms, 2009).

Assim, ao integrar os princípios da construção off-site, a modularidade se apresenta como uma solução viável para os desafios contemporâneos do setor da construção civil, destacando-se como uma alternativa promissora para atender às demandas por rapidez, qualidade e eficiência (Baú, 2021; Ferreira, 2024).

2.2 CARACTERÍSTICAS DO PROJETO EM CONTRUÇÕES MODULARES

A etapa de projeto é fundamental para o sucesso de construções modulares, pois exige uma abordagem integrada que leve em consideração as particularidades da produção *off-site* e da montagem *on-site* dos módulos (Baú, 2021). De acordo com Lawson, Ogden e Bergin (2012) os detalhes do projeto devem ser definidos nas fases iniciais, o que proporciona maior controle sobre o processo construtivo e minimiza retrabalhos

Neste sentido, a modularidade é um conceito essencial no desenvolvimento de projetos modulares. Segundo Emmatty e Sarmah (2012), modularidade refere-se à “*extensão da estruturação proposital da arquitetura do produto para identificação de unidades independentes, padronizadas ou intercambiáveis para satisfazer diversas funções*”. Nesse contexto, tais autores definem os módulos sendo considerados componentes ou subconjuntos projetados para serem intercambiáveis dentro da arquitetura do produto, promovendo flexibilidade e adaptabilidade na produção de diferentes configurações de edifícios. A modularidade, portanto, é um aspecto central que sustenta a eficiência e a viabilidade da construção modular.

Outro aspecto importante é a coordenação modular, que alinha dimensões e funcionalidades dos módulos. Essa integração evita incompatibilidades e facilita o encaixe durante a montagem final (Qi; Costin, 2023). Esses princípios são importantes para a integração dos projetos modulares.

2.2.1 Módulo e Modularidade

A definição de módulo na construção modular é amplamente discutida na literatura, com variações que refletem diferentes abordagens teóricas e práticas. Para Tatum (1987), um módulo é descrito como uma seção principal de uma planta, composta por diversos sistemas e geralmente sendo a maior unidade transportável de uma instalação. Essa visão é complementada por Bastos (2015), que define o módulo como a unidade fundamental de um sistema construtivo, remetendo à sua origem etimológica no latim *modulus*, significando “medida-base” ou “modelo”.

Gosling *et al.* (2016) ampliam a definição ao considerar o módulo como uma unidade funcional que interage com outras para compor produtos por combinação, enquanto Ginigaddara *et al.* (2022) o caracteriza como um elemento de construção pré-fabricado fora do local, já incluindo acessórios e acabamentos. De forma similar, Baú (2021) reforça a ideia de que um módulo é uma unidade funcional construída off-site e montada on-site, destacando que

elementos 2D, como painéis, só são considerados modulares se forem praticamente finalizados em fábricas antes do transporte.

Além disso, Ginigaddara et al., (2022) observaram que, na construção modular, até 60-70% do valor do projeto é agregado fora do canteiro de obras, com 90% das atividades do projeto sendo transferidas para fábricas, refletindo a essência da produção modular. Coyado Petrella (2016), por sua vez, destaca a falta de consenso na definição de modularidade na indústria da construção, defendendo a necessidade de um conceito claro que integre diferentes perspectivas e a cadeia de suprimentos.

O Quadro 1 apresenta uma comparação das diversas definições de módulo e modularidade, evidenciando tanto as convergências quanto as divergências entre os autores.

Quadro 1 - Comparação das definições de módulo e modularidade na literatura

Definição Traduzida	Aspecto	Autor
"Um módulo é um elemento de construção pronto para uso, fabricado fora do local, incluindo todos os acessórios e acabamentos."	Definição de módulo	Ginigaddara et al. (2022)
"Uma seção principal de uma planta resultante de uma série de operações de montagem remota e pode incluir partes de muitos sistemas. É geralmente a maior unidade ou componente transportável de uma instalação."	Definição de módulo	Tatum (1987)
"Unidade fundamental do sistema construtivo modular [...] 'medida-base, aquilo que serve de medida ou modelo'."	Definição de módulo	Bastos (2015)
"Uma unidade funcional relativa ao produto em que é parte, tendo interações que permitem composições de produtos por combinação."	Definição de módulo	Gosling et al. (2016)
"Uma unidade funcional, construída <i>offsite</i> e montada <i>onsite</i> junto a outras unidades análogas, para formação de um sistema modular."	Definição de módulo	Baú (2021)
"Um módulo é uma unidade funcional essencial e independente, relativa ao produto do qual faz parte. O módulo possui, em relação a uma definição de sistema, interfaces padronizadas e interações que permitem a composição de produtos por combinação."	Definição genérica de módulo	Miller e pedersen, (1998)
"Fornecimento de soluções modulares construídas <i>offsite</i> e usando princípios modulares, a serem entregues, instaladas e comissionadas <i>onsite</i> , advindas de um plano modular pré-determinado."	Princípios modulares aplicados na construção	Doran e Giannakis, (2011)
"A modularidade é a chave para alcançar a customização em massa (CM)."	Definição de modularidade	Pine (1993)

"Um produto modular possui sistemas decomponíveis com alto grau de independência."	Definição de modularidade	Sanchez e Mahoney (1996)
"Um projeto modular é composto por unidades que são projetadas de forma independente, mas que funcionam como um sistema integrado."	Definição de modularidade	Baldwin e Clark, (1997)
"Denota a utilização de unidades comuns para criar variantes de produtos, sendo que elas podem ser independentes, padronizadas ou intercambiáveis para satisfazer uma variedade de funções."	Definição de modularidade	Huang e Kusiak, (1996)
"Fornece um meio para a produção repetitiva, [...] permite que parte do produto seja feita em grande volume, como módulos padrão."	Definição de modularidade	Duray (2002)
"Há independência e conexão entre os módulos, o que idealmente deveria permitir que eles fossem intercambiáveis."	Definição de modularidade	Gershenson, Prasad e Zhang (2003)
"Tornar a complexidade administrável; permitir o trabalho paralelo; e acomodar a incerteza futura."	Definição de modularidade	Baldwin e Clark (2006)

Fonte: a autora, a partir de Baú (2021)

A análise desses conceitos evidencia uma divergência significativa na literatura, tanto em relação ao que constitui um módulo quanto ao papel da modularidade. Enquanto autores como Tatu (1987) e Baú (2021) se concentram na funcionalidade e no transporte; outros, como Pine (1993), Baldwin e Clark (1997), enfatizam a independência e a adaptabilidade das unidades como chave para customização e escalabilidade.

2.2.2. Tipos De Módulos

A literatura aponta para a existência de diferentes tipos de módulos utilizados em edificações modulares, com destaque para os módulos tridimensionais (3D) e bidimensionais (2D). Segundo Balaguer et al. (2002), "*existem dois tipos principais de módulos que podem formar uma edificação modular: módulos de três dimensões (3D) e módulos de duas dimensões (2D)*", conforme Figura 1. Os módulos 3D, por exemplo, podem incluir elementos como vigas, painéis e instalações que são pré-montados em linhas de produção. Já os módulos 2D, como molduras, paredes, janelas e portas, geralmente formam painéis bidimensionais que compõem fachadas.

Figura 1 - Módulos 2D e 3D

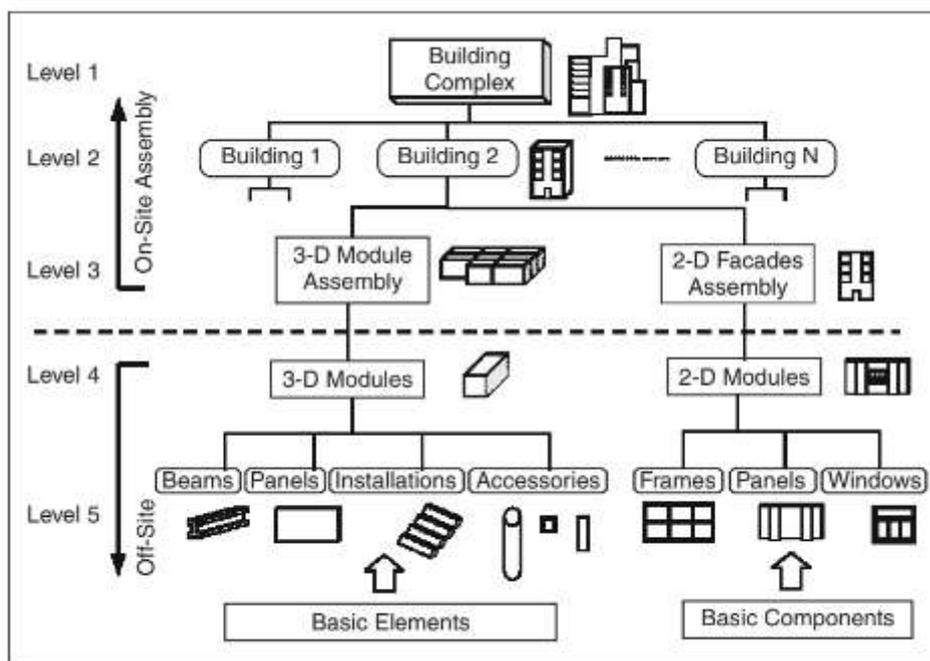


Figure 1. Building complex tree.

Fonte: a: adaptado de Balaguer et al. (2002)

Chauhan et al. (2019) contribuem para o entendimento desses tipos ao diferenciar a pré-montagem volumétrica da não volumétrica. A pré-montagem volumétrica, representada por unidades como banheiros pré-fabricados, adiciona diretamente espaço utilizável à edificação. Em contraste, a pré-montagem não volumétrica, como painéis de parede, não gera espaços, mas oferece suporte estrutural e funcional essencial. Essa diferenciação reforça que tanto elementos volumétricos quanto não volumétricos podem ser considerados módulos, desde que possuam modularidade e representem uma parte funcional da edificação.

A falta de unanimidade na classificação das tipologias da construção *off-site* modular e na definição do conceito de módulo é evidente. Essa questão reflete diferentes perspectivas e critérios de análise. Por exemplo, Chauhan et al. (2022) sugerem uma categorização com base na pré-montagem volumétrica e não volumétrica; Balaguer et al. (2002) dividem os módulos em 3D e 2D, os quais compõem os módulos volumétricos; enquanto Ginigaddara et al. (2022) propõe uma classificação fundamentada na proporção de trabalho realizado *off-site*.

A modularidade, como discutido por Ulrich e Eppinger (2016), está intrinsecamente ligada à funcionalidade por meio de interfaces padronizadas, permitindo a criação de sistemas complexos e eficientes. Chauhan et al. (2022) também enfatizam que a funcionalidade desses módulos, independentemente de serem 2D ou 3D, é um fator determinante para sua classificação. O Quadro 2 apresenta uma síntese da categorização proposta por Chauhan et al. (2022), destacando as características, impactos e exemplos de módulos volumétricos e não volumétricos.

Quadro 2 - Categorias de produtos pré-fabricados baseada em Chauhan et al. (2022) - Traduzido

Categoria	Definição	Exemplos	Impactos	Autores
1.Edifícios modulares	Unidades volumétricas pré-montadas que formam um edifício completo ou parte do edifício. Consistem no mais alto nível de produção e padronização <i>off-site</i> .	Hotéis, blocos de prisões, edifícios residenciais e casas.	Acelera o cronograma de construção em até 50%, mais econômico do que as casas com painéis e melhor segurança e produtividade.	Jonsson; Rudberg (2014); Lopez; Froese (2016)
2.Pré-montagem volumétrica	Uma parte específica do edifício que encerra espaços utilizáveis, mas não constitui todo o edifício.	Banheiros modulares, salas de plantas e chuveiros.	Redução do peso próprio, menos complexo para manutenção e redução de custos gerais.	Pan; Gibb; Dainty (2008); Weng et al. (2020)
3.Pré-montagem não-volumétrica	Elementos pré-montados que não criam espaços utilizáveis.	Painéis de parede, esquadrias estruturais e unidades de ponte.	Melhora o desempenho estrutural, reduz o risco ergonômico e reduz o custo e o prazo.	Deng et al. (2019); Hassan et al. (2020); Morelli; Brandt (2016)
4.Fabricação e submontagem de componentes	Normalmente feito em uma fábrica e nunca considerado para construção no local.	Tijolos, telhas e janelas.	Impactos da construção tradicional.	Gibb; Isack(2003)

Fonte: A autora, adaptado de Chauhan et al. (2019)

Ginigaddara et al. (2022), por outro lado, classifica a construção *off-site* em seis tipologias distintas, organizadas de acordo com a proporção crescente de trabalho realizado fora do canteiro de obras. Essa categorização, representada graficamente no Quadro 3, considera a complexidade dos elementos pré-fabricados e o nível de integração entre eles.

Quadro 3 - Categorias de produtos pré-fabricados por Ginigaddara et al. (2022) - Traduzido

Tipologia	Proporção Offsite	Complexidade/Integração	Exemplo
Componentes	10-15%	Baixa	Portas, janelas, ferragens, luminárias.
Painéis	15-25%	Média	Paredes, telhados, piso.
Pods	30-50%	Alta	Banheiros, cozinhas, unidades prisionais.
Módulos	60-70%	Muito Alta	Lojas, escritórios, escolas, apartamentos.
Edifícios Completos	Quase 100%	Máxima - Unidade Volumétrica Completa	Unidade de apartamento autônoma, módulo hospitalar completo, casa pré-fabricada transportada em um único módulo
Flat Pack	Quase 100%	Máxima - Sistema Modular Desmontável	Painéis estruturais e de vedação para casas e edifícios multifamiliares, sistemas de banheiro e cozinha pré-fabricados em pacotes planos, estruturas desmontáveis para abrigos de emergência

Fonte: A autor, adaptado de Ginigaddara et al., (2022)

De acordo com Baú (2021), a construção modular apresenta características específicas no que se refere aos elementos bidimensionais. A autora ressalta que "*elementos 2D (painéis) só são considerados [...] como elementos modulares (módulos) caso apresentem quase a totalidade da sua produção off-site, principal característica da construção modular. Ou seja, se esse elemento 2D for produzido off-site e transportado para o canteiro praticamente finalizado, então esse elemento é dito modular e pode ser chamado de módulo 2D.*"

Portanto, para este trabalho, admite-se o módulo como uma unidade funcional pronta para uso, fabricada fora do local, incluindo todos os acessórios e acabamentos (Ginigaddara et al., 2022). Essa definição engloba tanto módulos tridimensionais quanto bidimensionais, desde que apresentem alto nível de terminalidade e contribuam diretamente para a edificação final, como discutido por Baú (2021) e Chauhan et al. (2019). Nesse contexto, elementos como painéis de fachadas também são considerados módulos 2D (Balaguer et al., 2002), reforçando a abrangência do conceito e sua aplicabilidade no cenário da construção modular.

2.2.3 Componentes e Elementos Modulares

Os processos de construção racionalizados e industrializados utilizam componentes, elementos e sistemas como bases para otimizar a execução de edificações. Sabbatini (1989) define essas categorias como sendo:

- **Componente:** unidade básica, como um bloco de concreto ou tijolo.
- **Elemento:** conjunto de componentes que formam uma parte funcional da edificação, como uma parede ou uma laje.
- **Sistema:** integração de elementos e componentes em um processo construtivo completo, como sistemas de painéis pré-fabricados.

A partir de Sabbatini (1989), para tanto, um sistema construtivo é definido como um processo construtivo, composto por elementos e componentes integrados de maneira organizada e sequencial. Esses sistemas visam aumentar a eficiência e a produtividade da construção civil por meio da racionalização e pré-fabricação. Quando aplicados ao contexto da construção modular, os sistemas construtivos são caracterizados pela integração de módulos pré-fabricados, que cumprem um conjunto ou a totalidade das funcionalidades da edificação. Esses módulos volumétricos ou painelizados são fabricados em ambientes controlados e transportados para o canteiro de obras, onde são montados e finalizados (Baú, 2021).

A literatura apresenta interpretações complementares sobre componentes e elementos modulares. Para Ginigaddara et al. (2022), os componentes são descritos como "itens pré-fabricados" ou "subconjuntos em pequena escala", correspondendo a elementos que representam "até 10-15% do valor do projeto". Exemplos incluem portas, janelas, ferragens, luminárias, painéis de parede, conjuntos de tubulações e seções estruturais. A ênfase está na fabricação fora do local e na posterior montagem no canteiro.

Por outro lado, Chauhan et al. (2019) classificam como componentes modulares as partes que constituem os módulos, caracterizadas pela modularidade, mas sem função na edificação final, quando consideradas isoladamente.

Os autores apresentam, assim, diferentes perspectivas sobre componentes e elementos, mas que podem ser complementares. De acordo com Sabbatini (1989), os componentes representam as unidades básicas que constituem os módulos, como vigas, painéis e elementos de instalações. Esses componentes, quando beneficiados e integrados, formam os elementos, definidos como conjuntos funcionais da edificação. Estes elementos podem assumir naturezas bidimensionais (2D), como painéis de isolamento e revestimento, ou tridimensionais (3D), como chassis metálicos ou envelopes estruturais do módulo. Chauhan et al. (2019) reforçam que esses elementos possuem modularidade, mas não desempenham função final na edificação de forma independente.

Já os módulos se destacam por serem unidades funcionais completas, com função final na edificação. Segundo Tatum (1987), os módulos podem ser divididos em duas categorias principais:

- **Módulos volumétricos (3D):** como banheiros modulares, prontos para instalação.

- **Módulos painelizados (2D):** como fachadas pré-fabricadas, transportadas praticamente finalizadas para o canteiro de obras.

Esses módulos, conforme Ginigaddara et al. (2022), são caracterizados por representarem uma alta porcentagem do valor do projeto e por possuírem quase a totalidade de sua produção *off-site*, o que é destacado por Baú (2021) como a principal característica da construção modular.

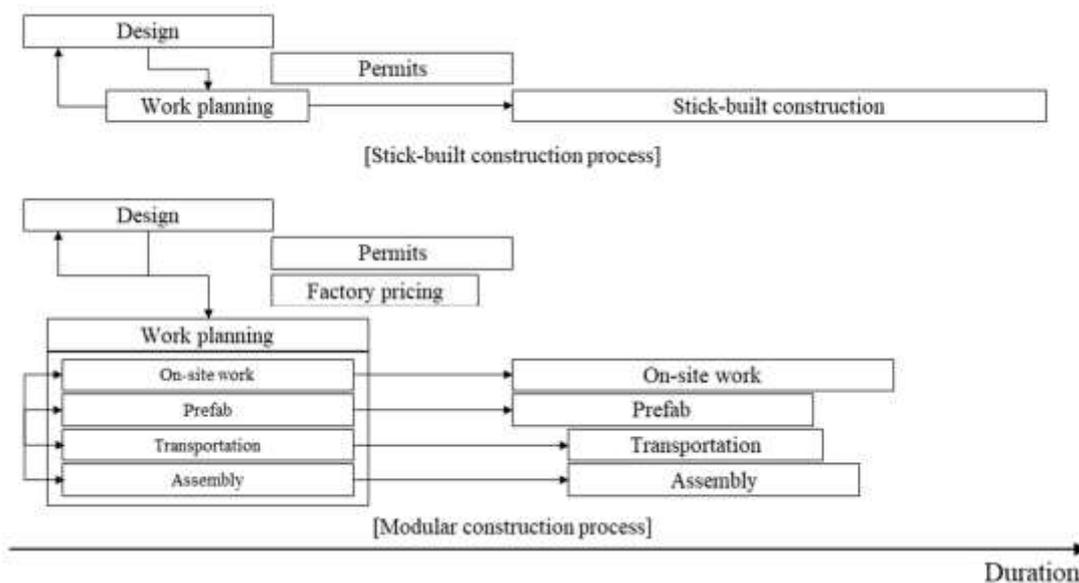
A modularidade está presente em todas as unidades descritas, desde componentes básicos até módulos completos, constituindo um atributo comum que orienta a produção e a integração desses elementos em sistemas construtivos mais complexos (Bastos, 2015; Emmatty; Sarmah, 2012; Ginigaddara et al., 2022; Wasim; Vaz Serra; Ngo, 2022) Essa visão possibilita a classificação dos produtos modulares em diferentes níveis de pré-fabricação, conectando os conceitos de "partes" (componentes, elementos e sistemas) às linhas de produtos com modularidade variada.

2.2.4 Compatibilização De Projetos

Na construção modular, a produção dos módulos e as atividades no local são realizadas simultaneamente Baú (2021). Essa simultaneidade exige uma definição detalhada do projeto desde o início, evitando erros, omissões e conflitos que podem gerar retrabalho e custos adicionais (Hyun et al., 2020).

O projeto modular diferencia-se do convencional ao incorporar, desde as etapas iniciais, as especificidades da fabricação e montagem. Hyun et al. (2020) observa que esse tipo de projeto apresenta uma maior complexidade, devido à necessidade de integrar processos adicionais, como transporte e montagem, que não estão presentes na construção tradicional. A Figura 2, extraída de Hyun et al. (2020), exemplifica como essas etapas impactam o fluxo de trabalho, aumentando o número de decisões críticas no início do desenvolvimento do projeto.

Figura 2 - Aumento da complexidade em projetos modulares



Fonte: Hyun et al. (2020)

Hyun et al. (2020) discute a relevância de decisões estruturais, decisões que englobam mais de uma parte interessada ou agente da cadeia produtiva da construção, destacando limitações impostas por leis de trânsito e restrições de transporte, que influenciam diretamente o tamanho e o *design* dos elementos pré-fabricados. Além disso, fatores como vibrações durante o transporte, resistência a impactos e a eficiência na montagem devem ser considerados no planejamento, segundo o autor.

Coyado Petrella (2016) reforça a importância da integração da cadeia de suprimentos, especialmente devido à necessidade de interfaces precisas entre os módulos. Essa colaboração, que abrange desde fornecedores até os agentes atuantes no canteiro de obras, garante eficiência no processo de montagem e minimiza perdas. Qi e Costin (2023) apontam que a compatibilização entre disciplinas é essencial para que os módulos individuais se integrem em uma estrutura coesa após a montagem. Por tanto, a compatibilização é essencial para reduzir perdas, evitar conflitos e garantir eficiência na montagem.

2.2.5 BIM (*Building Information Model*)

Diversos estudos investigaram as contribuições do BIM para resolver desafios na construção modular. Entre eles, Yuan, Sun e Wang (2018) discutiram seu papel na compatibilização de componentes e otimização do design dos módulos. Azhar, Lukkad e Ahmad (2013) apontaram que o BIM pode melhorar a comunicação entre stakeholders e facilitar a integração de processos. Hyun et al. (2020) mencionaram que a ferramenta auxilia na identificação e solução de conflitos espaciais. Além disso, Lu et al. (2020) exploraram a aplicação do BIM em simulações de fabricação e montagem, visando prever possíveis problemas. Essas evidências sugerem que o uso de BIM apresenta potencial para melhorar a eficiência em diferentes etapas do projeto.

O detalhamento viabilizado pelo BIM também é frequentemente destacado em relação às construções *off-site*. Soares (2024) afirmaram que a criação de modelos 3D informativos pode atender às exigências de planejamento e fabricação modular. Hyun, Kim e Kim (2022) apontaram que o BIM promove uma melhor comunicação entre projetistas e fabricantes, conectando o design e a produção de maneira mais integrada. Nesse sentido, o uso de BIM estabelece práticas integradas, com a potencialidade de conectar a etapa de projeto com os processos de fabricação e montagem.

2.2.6 DFMA (*Design Manufacturing and Assembly*)

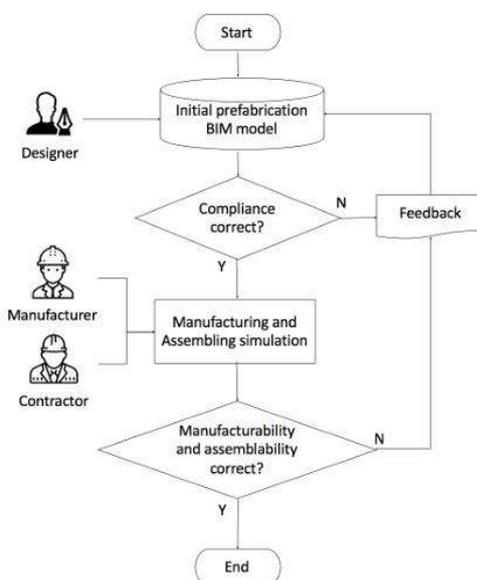
A metodologia *Design for Manufacturing and Assembly* (DfMA), originária da indústria manufatureira, busca otimizar o projeto considerando os processos de fabricação e montagem (Emmatty; Sarmah, 2012). Na construção modular, a adoção dessa abordagem visa integrar diferentes etapas do ciclo de vida do projeto.

Embora a filosofia do DfMA não seja nova no setor da construção, sua implementação prática tem se fortalecido com os avanços em materiais, tecnologias de produção e montagem, bem como na gestão da cadeia logística (Lu et al., 2020). No Brasil, esta prática existe quando da elaboração de projetos pensando na fabricação e montagem das partes; os chamados projetos para a produção, difundidos para diversos serviços de obras como fôrmas, alvenaria de vedação e estrutural, fachadas, dentre outros. Tais práticas têm permitido que os princípios do DfMA sejam aplicados em projetos modulares.

A implementação do DfMA exige uma mudança de mentalidade nos profissionais envolvidos, priorizando a colaboração entre projetistas, engenheiros, empreiteiros e fabricantes (Qi; Costin, 2023). Essa abordagem colaborativa busca garantir que os projetos atendam aos requisitos de fabricação e montagem desde suas fases iniciais.

A Figura 3 apresenta o fluxo de trabalho do processo de projeto baseado nos princípios do DfMA. Adaptada do trabalho de Yuan, Sun e Wang (2018) por Qi, Costin (2023), a Figura 3 destaca a interação entre diferentes profissionais, bem como a importância da comunicação e do feedback. O processo é descrito como um fluxo cíclico, em que os intervenientes colaboram para criar um modelo BIM (*Building Information Modeling*) que atenda a todos os requisitos de fabricação e montagem.

Figura 3 - Fluxo de trabalho do processo de design com princípios do DfMA

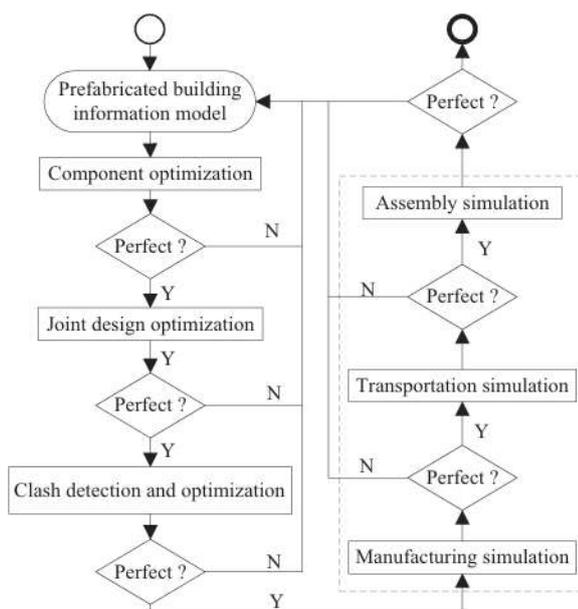


Fonte: adaptado de Yuan; Sun; Wang (2018) por Qi; Costin (2023)

Esse fluxo ilustra a importância da comunicação e da colaboração para a otimização do projeto pré-fabricado. Utilizando plataformas BIM e simulações, o modelo final é ajustado de forma iterativa, assegurando eficiência e viabilidade do projeto (Qi; Costin, 2023).

Complementarmente, a Figura 4 detalha a etapa de otimização do modelo BIM, que ocorre após a validação inicial do projeto. Nesse estágio, o objetivo principal é garantir a viabilidade, eficiência e segurança durante a fabricação e montagem dos componentes pré-fabricados (Yuan; Sun; Wang, 2018).

Figura 4 – Etapa de otimização do modelo BIM



Fonte: Yuan, Sun e Wang (2018)

Conforme ilustrado na Figura 4, o processo de otimização também é iterativo. Cada etapa de simulação pode gerar feedback que, por sua vez, é incorporado ao modelo BIM, resultando em ajustes e refinamentos contínuos até a obtenção de um modelo final adequado (Yuan; Sun; Wang, 2018).

Em resumo, o projeto em construções modulares exige uma abordagem integrada que abranja o *design* dos módulos, a compatibilização de projetos, o uso do BIM e a aplicação do DfMA, com comunicação eficaz entre os envolvidos para garantir o sucesso da produção. Além disso, a modularidade e a coordenação modular são cruciais para garantir flexibilidade e eficiência, alinhando dimensões e funcionalidades dos módulos.

2.3 PLANEJAMENTO

2.3.1 Objetivo De Produção

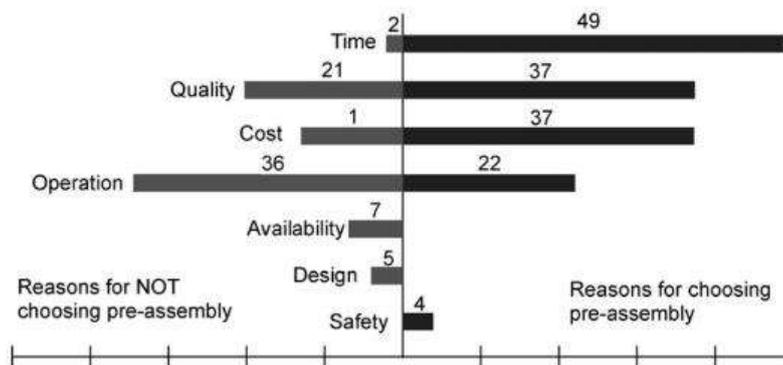
Diferentes autores abordam a importância de alinhar os objetivos de produção com as estratégias organizacionais.

Nesse sentido, Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018) destaca que os objetivos de produção devem estar alinhados às estratégias competitivas da organização. Por exemplo, em operações que competem com base na rapidez de resposta ao cliente, os processos devem ser projetados para minimizar o tempo entre o pedido e a entrega. Da mesma forma, quando a estratégia se baseia em preços baixos, a eficiência de custos assume prioridade, utilizando práticas como o DfMA.

Essa lógica vincula os objetivos de produção aos processos individuais, promovendo operações otimizadas e capazes de atender às expectativas dos clientes. Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018) classifica os objetivos estratégicos organizacionais em categorias como qualidade, velocidade, confiabilidade, flexibilidade, custo e sustentabilidade.

Gibb e Isack (2003) abordam os objetivos de produção no contexto da pré-fabricação, destacando as razões para adotar ou não essa abordagem. Razões como "prazo" e "qualidade" são frequentemente citadas como motivações para a escolha, enquanto "operação" e "*design*" aparecem entre os fatores que dificultam a adoção, conforme Figura 5. Essa análise demonstra que os objetivos de produção devem equilibrar aspectos operacionais, de projeto e de segurança, considerando as especificidades de cada contexto produtivo.

Figura 5 - Motivos para adotar ou evitar a pré-fabricação

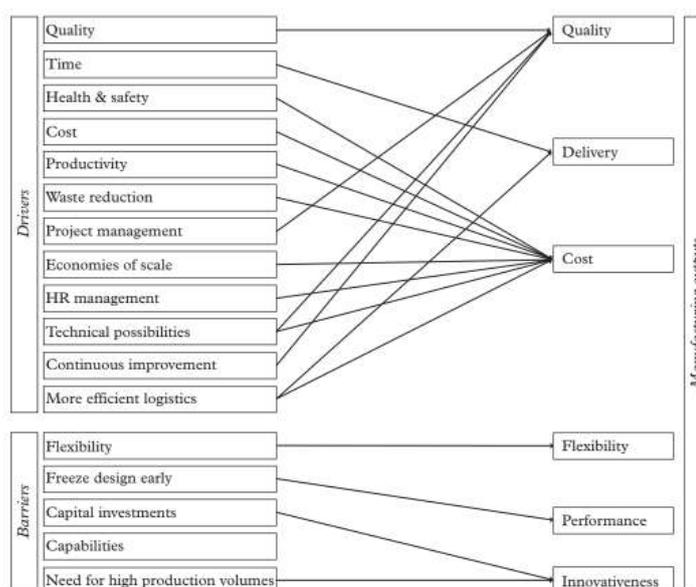


Fonte: Gibb e Isack (2003)

Kamali e Hewage (2016) analisaram a construção modular a partir de parâmetros de vantagens e desvantagens, agrupando-os em categorias como tempo, custo, segurança, qualidade, produtividade, sustentabilidade e entrega. Essa abordagem amplia a compreensão dos objetivos de produção, relacionando-os a fatores tangíveis e intangíveis que impactam diretamente o desempenho das operações.

Jonsson e Rudberg (2014) classificam os objetivos de produção em seis categorias principais: qualidade, entrega, custo, flexibilidade, desempenho e inovação, conforme a Figura 6. Esses objetivos enfatizam tanto a necessidade de eficiência quanto a importância da inovação no contexto da produção, elencando diferentes objetivos atrelados às operações em obras modulares.

Figura 6 - Classificação dos objetivos de produção



Fonte: Jonsson e Rudberg (2014)

Uma síntese dos objetivos de produção identificados, que foram agrupados em categorias, apresenta-se no Quadro 4. Esse agrupamento sintetiza as contribuições da literatura e permite uma aplicação mais prática nas operações modulares.

Quadro 4 - Agrupamento dos objetivos de produção na construção modular

Categoria	Descrição	Autores
Eficiência e Produtividade	Envolve velocidade, tempo e entrega, enfatizando a agilidade e eficiência na execução.	Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018)
Desempenho e Qualidade	Inclui confiabilidade, performance, segurança e padrões elevados de produtos e serviços.	Gibb e Isack (2003) Jonsson e Rudberg (2014)
Flexibilidade e Inovação	Refere-se à adaptação e criatividade para lidar com mudanças e introduzir novas ideias.	Jonsson e Rudberg (2014)
Custo	Focado na otimização econômica dos recursos para sustentabilidade financeira.	Gibb e Isack (2003); Kamali e Hewage (2016)
Sustentabilidade	Responsabilidade ambiental e social, refletindo tendências de produção responsável.	Kamali e Hewage (2016)
Escala de Produção	Destaca a economia de escala na fabricação de unidades repetidas para redução de custos.	Lawson, Ogden e Bergin (2012)

Fonte: A autora

2.3.2 Produção e Customização em Massa

A produção em massa foca na fabricação de produtos padronizados em grande escala para atender um mercado amplo com custos reduzidos. Esse processo se baseia na padronização de projetos, processos repetitivos e tecnologia de produção rígida, como observado na manufatura tradicional (Duray, 2002; Ferreira, 2024). A padronização de produtos e processos permite a otimização da produção, a exploração de economias de escala e a redução de custos, como exemplificado pelos restaurantes fast-food, supermercados de desconto e fabricantes de vestuário que produzem roupas em tamanhos padronizados (Slack; Brandon-Jones; Johnston,

2018). No entanto, a produção em massa pode resultar em menor flexibilidade para atender às necessidades individuais dos clientes em especial no setor da construção civil.

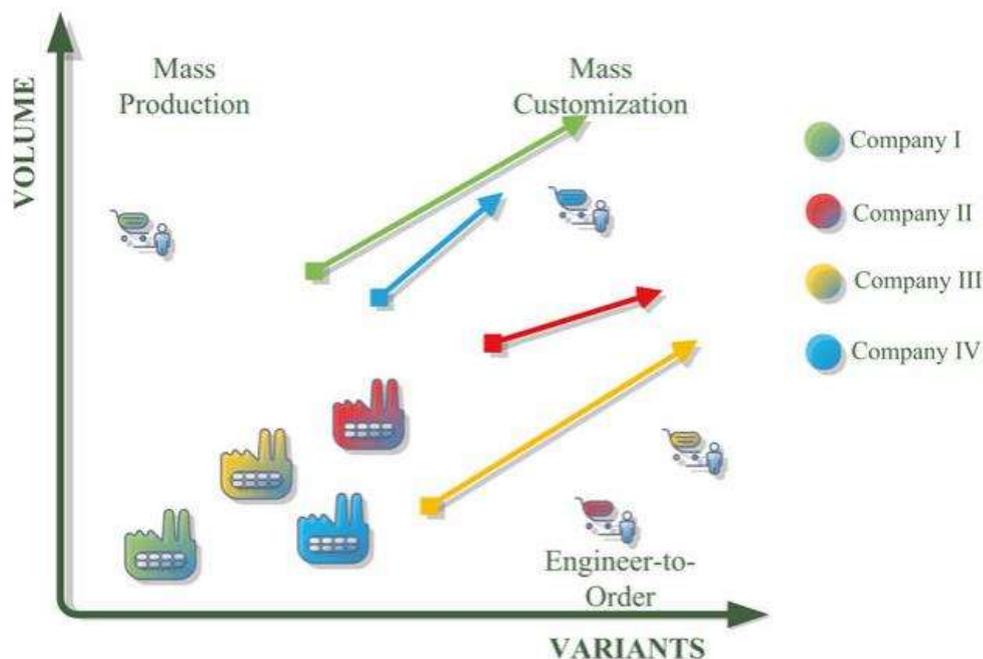
A customização em massa é uma abordagem estratégica que busca aliar os benefícios da produção em massa — como eficiência e custo reduzido — à capacidade de atender demandas específicas dos clientes, oferecendo produtos personalizados. Conforme destacado por Rocha (2011), o alinhamento entre a aplicação da customização em massa e os objetivos estratégicos de uma organização é essencial para seu sucesso, pois o contexto organizacional influencia diretamente na escolha da estratégia a ser adotada.

Nielsen et al. (2017) ampliam a discussão ao abordar o potencial dessa abordagem na indústria da construção, setor onde a customização em massa ainda é emergente. O autor ressalta que, para implementar essa estratégia com sucesso, é necessário integrar o cliente na cadeia de suprimentos e adotar processos que conciliem personalização e eficiência produtiva. Isso requer superar barreiras estruturais e culturais, comuns em setores mais tradicionais como a construção civil.

Um dos principais conceitos associados à customização em massa é a modularidade. Nielsen et al. (2017) destacam que ela permite a personalização de produtos a partir de componentes padronizados, viabilizando soluções individuais dentro de uma lógica de produção eficiente. Por exemplo, no contexto de construções modulares, o cliente pode personalizar o módulo final a partir de uma variedade de componentes previamente padronizados. Isso torna a modularidade uma peça-chave na aplicação prática da customização em massa.

Na Figura 7, Nielsen et al. (2017) propõem uma ferramenta visual para posicionar empresas em um gráfico que relaciona estratégias de produção, como o grau de customização oferecido, ao volume de produção. Empresas focadas em produção em massa de itens padronizados estão no extremo superior esquerdo do gráfico, enquanto aquelas que produzem sob demanda, com alto grau de customização, se posicionam no extremo inferior direito. Esse mapeamento orienta as organizações a avaliarem seu posicionamento atual e a definirem direções estratégicas para a adoção da customização em massa.

Figura 7 - Representação gráfica da relação entre customização e volume de produção



Fonte: Nielsen et al. (2017)

Tais direções estratégicas impactam diretamente nos resultados das empresas de construção modular. Neste aspecto, Nielsen et al. (2017) enfatizam que o sucesso da customização em massa depende de uma integração efetiva entre modularidade, eficiência produtiva e alinhamento estratégico. No contexto da construção modular, isso pode ser alcançado por meio de um planejamento detalhado, que considere aspectos como uma seleção padronizada de opções personalizáveis.

2.3.3 Padronização e Customização

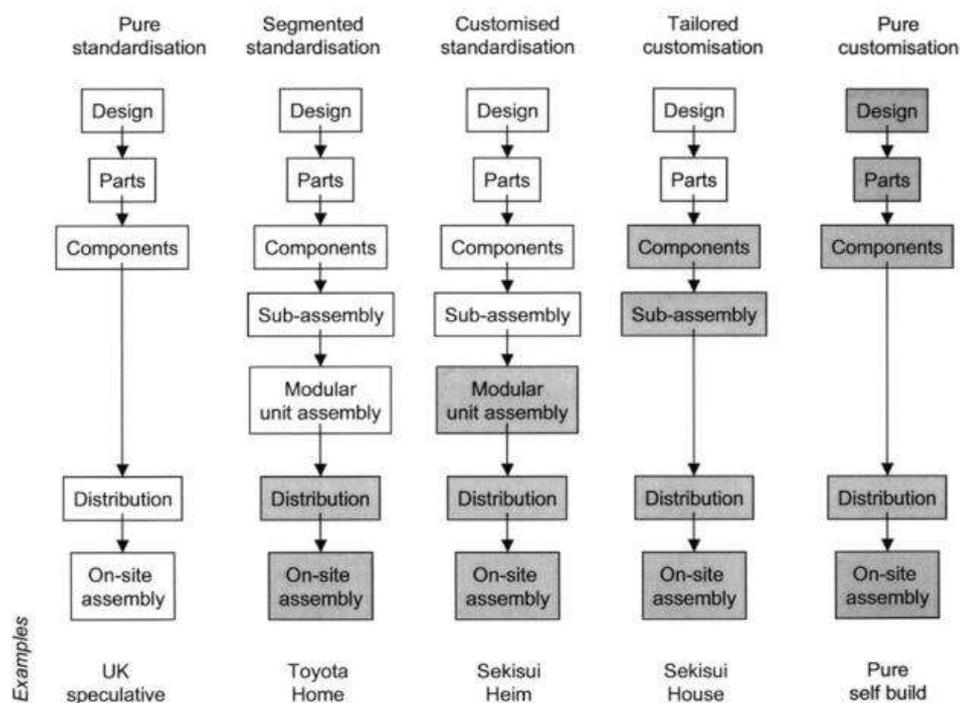
A relação entre padronização e customização é amplamente debatida na literatura acadêmica, principalmente no contexto da construção modular, onde a busca pelo equilíbrio entre eficiência e personalização é fundamental. Barlow et al. (2003) argumentam que a customização em massa não é um modelo único, mas uma gama de estratégias que utilizam o conceito de "ponto de desacoplamento". Esse conceito representa o momento na cadeia de suprimentos em que os produtos deixam de ser padronizados e passam a incorporar elementos personalizados.

Nesse sentido, Barlow et al. (2003) identificaram cinco modelos de padronização e customização. O espectro de estratégias apresentado por estes autores varia, nos seus extremos, desde a Padronização Pura, onde não há possibilidade de customização, até a Customização Pura, em que o cliente tem total liberdade de escolha. Entre esses extremos, são identificados três modelos intermediários:

- **Padronização Segmentada:** Permite escolhas limitadas na etapa de entrega ou configuração do produto.
- **Padronização Customizada:** Oferece opções personalizáveis nas etapas de componentes e montagem.
- **Customização Sob Medida:** Oferece ampla liberdade de personalização em todas as etapas, exceto no projeto inicial.

A Figura 8 contém uma representação destes modelos. Nela, utilizam-se áreas sombreadas para indicar os pontos da cadeia de suprimentos onde ocorrem as escolhas personalizáveis. Essa ferramenta visual auxilia as empresas a identificarem sua posição no espectro entre padronização e customização e a planejar estratégias que equilibrem custos, prazos e níveis de personalização.

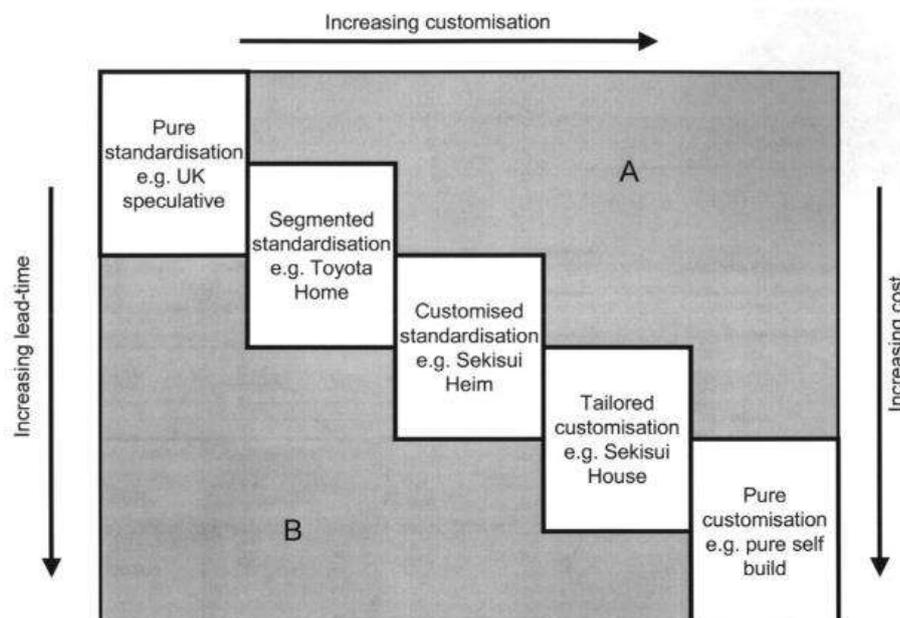
Figura 8 - Modelos de customização em massa no espectro entre padronização e customização.



Fonte: Barlow et al. (2003)

Além disso, Barlow et al. (2003) exploram como a escolha da estratégia de cadeia de suprimentos impacta os custos e os prazos de entrega. Estratégias mais padronizadas geralmente resultam em menores custos e prazos mais curtos, enquanto a customização pura tende a ser mais cara e demorada. A Figura 9, uma matriz que correlaciona tempo de entrega, custos e níveis de customização, destaca esses *trade-offs* e oferece uma abordagem prática para auxiliar empresas na escolha da estratégia mais adequada.

Figura 9 – Matriz de estratégias da cadeia de suprimentos para customização em massa



Fonte: Barlow et al. (2003)

Portanto, o debate entre padronização e customização influencia diretamente a escolha das estratégias de produção, destacando a importância de equilibrar eficiência, custos e satisfação do cliente.

2.3.4 Variedade versus Customização

A relação entre variedade e customização é central para compreender como empresas de construção modular podem atender às necessidades dos clientes, especialmente no contexto da construção volumétrica *offsite*. Esses conceitos são frequentemente utilizados na produção industrial e, embora relacionados, possuem distinções importantes que impactam diretamente as estratégias de fabricação e oferta.

A variedade refere-se à gama de produtos ou opções disponíveis para os consumidores, mas sem considerar necessariamente suas necessidades individuais. Segundo Mintzber (1994), a variedade proporciona escolhas, mas não permite que o cliente especifique os detalhes do produto. Um exemplo clássico é o caso de supermercados que oferecem centenas de tipos de cereais, mas sem a possibilidade de personalizar a formulação de um cereal específico com o fornecedor (Duray, 2002).

Por outro lado, a customização é projetada para atender às necessidades específicas de um cliente, implicando em seu envolvimento direto na definição do produto. Pine, Peppers e Rogers (1995) destacam que a customização visa fornecer produtos adaptados às preferências individuais. Essa capacidade de moldar o produto vai além de simplesmente oferecer opções; ela requer um diálogo ativo entre o cliente e o fabricante.

Essa relação entre variedade e customização pode ser exemplificada no uso de catálogos de produtos por fábricas modulares. Um catálogo pode apresentar uma ampla

variedade de módulos ou componentes modulares, mas nem sempre possibilita a customização. Por exemplo, uma empresa que fabrica painéis de fachada pode oferecer diferentes materiais, cores e texturas, representando variedade. No entanto, se o cliente não puder ajustar dimensões, tipos de encaixe ou outros detalhes específicos, essa oferta é limitada à variedade, sem alcançar a verdadeira customização (Ferreira, 2024).

A customização, por sua vez, implica na capacidade de o cliente influenciar diretamente nas características dos componentes que formam o módulo. Um exemplo disso é a customização em massa, na qual o cliente escolhe entre um conjunto controlado de opções para configurar o produto final (Maccarthy; Fernandes, 2000).

Embora algumas empresas ofereçam customização apenas em partes específicas dos módulos, isso representa um passo em direção à customização completa, mas ainda mantém limitações dentro de um escopo predefinido (Mintzberg, 1994)

Conclui-se que a customização, diferentemente da variedade, é definida pela possibilidade de o cliente moldar as características específicas do produto, atendendo às suas necessidades e desejos únicos, enquanto a variedade se limita a ampliar as opções disponíveis no mercado.

2.3.5 Estratégias de Customização da Produção

De acordo com Richard (2005), uma edificação pode ser dividida em cinco subsistemas principais: estrutura, envelopes, divisórias, serviços e equipamentos. Esses subsistemas podem ser customizados de acordo com as necessidades do projeto, refletindo a diversidade de abordagens adotadas no setor da construção. Diversos autores exploram como as estratégias de customização e padronização da produção podem ser aplicadas, cada um propondo diferentes classificações e modelos analíticos.

Gibb et al. (2007) apresentam uma abordagem que organiza os elementos construtivos em quatro níveis hierárquicos: partes, componentes, montagens e ativos. Esses níveis são relacionados a quatro estratégias de produção classificadas em produção sob medida, híbrida, customização em massa e produção em massa. A Figura 10, baseada no projeto "NewWay" da Glaxo Smith Kline (GSK), ilustra essa hierarquia e o esforço da empresa em reduzir a variedade de elementos em cada nível para alcançar a padronização em massa. O objetivo da GSK era trabalhar com apenas três tipos de ativos, trinta variantes de montagens, noventa componentes e novecentas partes. Esse modelo demonstra como a padronização e a customização podem ser avaliadas em diferentes níveis de complexidade, contribuindo para a eficiência da produção.

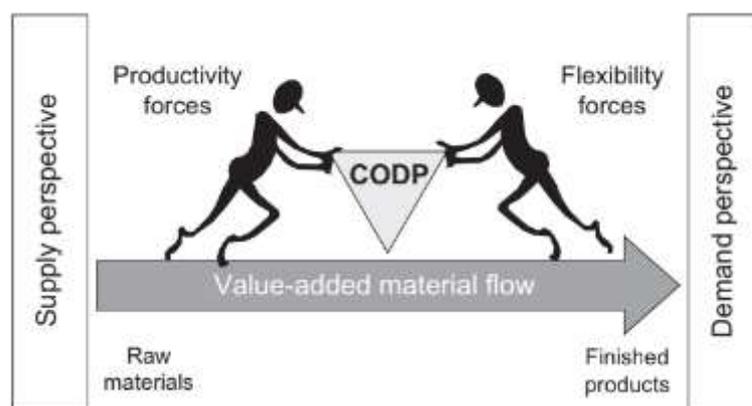
Figura 10 – Extensão da padronização da produção no projeto "NewWay" da GSK

	Bespoke	Hybrid	Mass Customised	Mass Produced	NewWay target
Parts					900
Components					90
Assemblies					30
Assets					3

Fonte: Gibb et al. (2007)

Rudberg e Wikner (2004) introduzem o conceito de Ponto de Desacoplamento do Pedido do Cliente (CODP). Esse ponto marca a transição no fluxo produtivo entre decisões baseadas em previsão e decisões guiadas por pedidos reais de clientes. Na Figura 11 observa-se o equilíbrio entre produtividade e flexibilidade, que são forças opostas no fluxo de materiais com valor agregado. As atividades a jusante do CODP são realizadas sob incerteza, enquanto as atividades a montante são orientadas por compromissos firmes.

Figura 11 - Ilustração do posicionamento do CODP

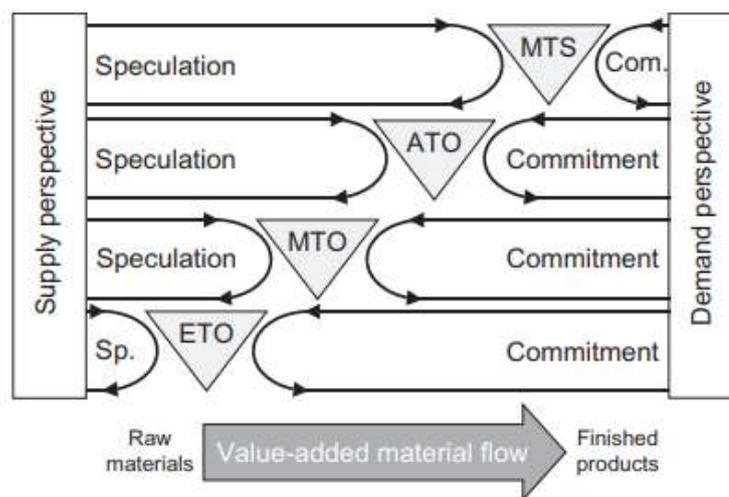


Fonte: Rudberg e Wikner (2004)

Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018) ampliam a discussão ao tratar dos *trade-offs* entre objetivos de desempenho, reforçando que as decisões estratégicas de produção exigem um equilíbrio cuidadoso entre produtividade e flexibilidade. Esses aspectos são fundamentais na escolha do posicionamento do CODP, que impacta diretamente na capacidade de atender demandas específicas do mercado sem comprometer a eficiência operacional.

Além disso, Rudberg e Wikner (2004) também apresentam uma abordagem sequencial típica para o conceito de CODP, detalhada na Figura 12. Essa Figura destaca como as atividades que agregam valor ao produto se relacionam ao CODP, com as etapas a jusante sendo realizadas sob especulação (incerteza) e as etapas a montante sendo baseadas em compromissos firmes com pedidos de clientes (informação certa). A Figura 12 contém conceitos como ETO, MTO, ATO e MTS, relativos a estratégias de produção vinculadas ao CODP, a serem discutidos mais adiante neste documento.

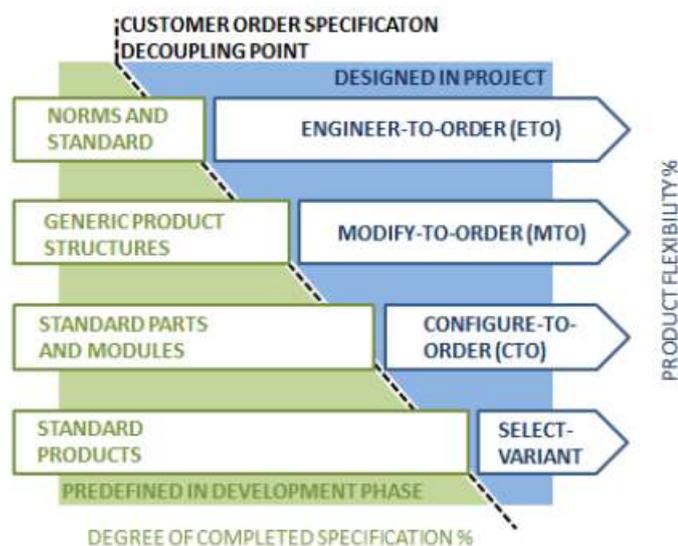
Figura 12 - Sequência de atividades que agregam valor ao produto em relação ao CODP



Fonte: Rudberg e Wikner (2004)

Essas estratégias se relacionam com o grau de detalhamento do projeto, ou pré-engenharia, requerido. Nesse sentido, Jensen, Lidelöw e Olofsson (2015) complementam a análise de CODP ao discutir o grau de pré-engenharia nos processos produtivos. A Figura 13 apresenta a progressão dos níveis de pré-engenharia, desde projetos desenvolvidos após o pedido do cliente até produtos totalmente padronizados e modulares. Esse modelo ilustra como diferentes graus de pré-engenharia se relacionam com a possibilidade de customização.

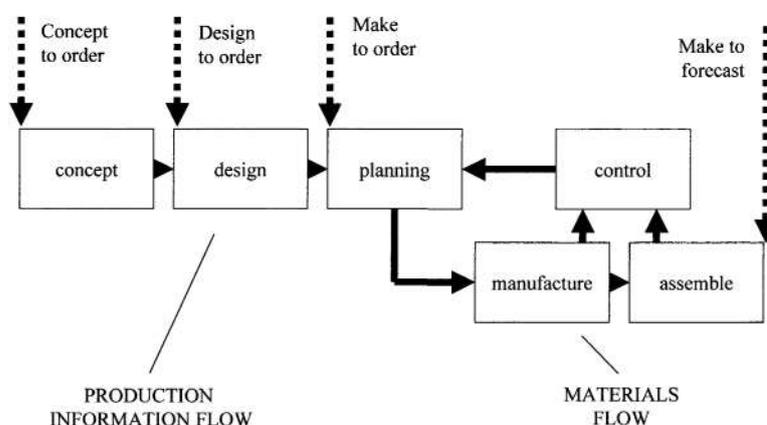
Figura 13 - Representação do aumento do grau de pré-engenharia



Fonte: Jensen, Lidelöw e Olofsson (2015)

Winch (2003) aborda as estratégias de produção ao analisar a evolução dos modelos de manufatura e sua aplicabilidade à indústria da construção, diferenciando-se do modelo proposto por Rudberg e Wikner (2004) voltado para a indústria de manufatura. Winch (2003) argumenta que a tentativa de replicar o modelo de produção em massa, inspirado na indústria automobilística, na construção civil, tem se mostrado inadequada, dado que a construção se assemelha à produção de sistemas complexos. Propondo um novo modelo que classifica as estratégias de produção em função em quatro categorias, Figura 14:

Figura 14 - Estratégias de produção para Winch



Fonte: Winch (2003)

Winch (2003) destaca a importância do fluxo de informação na produção, classificando as estratégias de produção de acordo com o ponto de entrada do cliente nesse fluxo, conforme apresentado na Figura 14. O autor define as seguintes estratégias:

- **Conceito-sob-Encomenda (CtO):** O cliente participa desde a concepção do produto, definindo suas funcionalidades e requisitos. Essa estratégia é comum em projetos complexos e de baixo volume, como navios e aeronaves militares.
- **Design-sob-Encomenda (DtO):** O cliente entra na fase de *design*, com a empresa já possuindo um conceito básico do produto. A empresa realiza um trabalho significativo de engenharia para atender às necessidades específicas do cliente. Essa estratégia é comum em projetos de engenharia, como usinas de energia e componentes aeroespaciais.
- **Produção-sob-Encomenda (MtO):** A empresa possui um *design* detalhado que pode ser configurado para atender às necessidades do cliente (customização em massa) ou produzido sem modificações após o pedido. Essa estratégia é comum na produção de componentes para veículos.

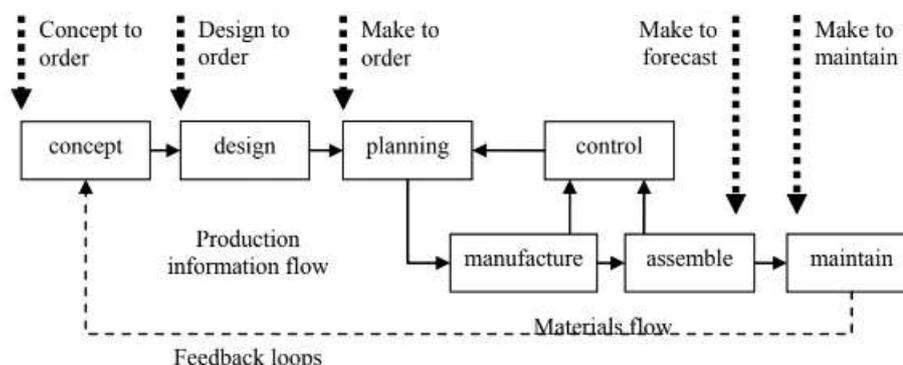
- **Produção-sob-Projeção (MtF):** O produto é fabricado para estoque e vendido posteriormente. Essa estratégia é típica da produção em massa de produtos padronizados, como na indústria automobilística.

Winch (2003) argumenta que o modelo de produção de sistemas complexos, baseado nas estratégias de Conceito-sob-Encomenda (CtO) e Design-sob-Encomenda (DtO), é mais adequado à indústria da construção, caracterizando-se por baixo volume de produção, com produtos grandes e complexos, geralmente feitos sob encomenda. Esse modelo enfatiza o design e a engenharia, com o processo de produção sendo orientado pelo projeto e pela participação do cliente na definição dos requisitos. Além disso, ele destaca a flexibilidade e a capacidade de resposta da produção, que é adaptada às necessidades específicas de cada cliente, ao invés de seguir a produção em massa de produtos padronizados.

Winch (2003) critica a tentativa de aplicar o modelo de produção em massa, baseado na produção-sob-projeção (MtF), na indústria da construção. Ele argumenta que a construção civil, com exceção da produção de casas, se caracteriza por projetos únicos e complexos, com baixo volume de produção. A aplicação do modelo de produção em massa, nesse contexto, levaria à ineficiência e à perda de flexibilidade. Winch conclui que a tentativa de replicar o modelo de produção em massa, com foco na padronização e na produção em larga escala, se mostra inadequada à realidade da indústria da construção.

Pan e Arif (2011) ampliam o modelo de estratégias de produção proposto por Winch (2003) ao incorporar a fase de "manutenção" e ao destacar a sustentabilidade, com foco na reconfiguração de módulos, conforme Figura 15. Eles propõem a estratégia Produção-sob-Manutenção (MtM), voltada para projetos de longo prazo, como *retrofit* e produção de habitações sociais, com foco na manutenção do ambiente construído existente. Essa abordagem considera a necessidade de manutenção contínua ao longo da vida útil do produto e enfatiza a sustentabilidade no contexto da construção industrializada.

Figura 15 - Estratégias de produção para Pan e Arrif 2011, a partir de Winch 2003



Fonte: Pan e Arif (2011)

Em resumo, o planejamento na construção modular requer a integração dos objetivos de produção com as estratégias organizacionais. A produção modular combina a eficiência da produção em massa com a personalização da customização em massa, utilizando a modularidade para adaptar produtos padrão às necessidades dos clientes. A relação entre padronização e customização permite que empresas equilibrem a eficiência operacional com a satisfação do cliente, a depender do objetivo de produção orientado pelo cliente, empregando estratégias de produção em relação a CODP.

A fim de facilitar o entendimento e a comparação dos conceitos apresentados, elaborou-se um quadro que relaciona os conceitos de Rudberg e Wikner (2004) – ETO, MTO, ATO e MTS – baseados na interação entre o Ponto de Desacoplamento do Pedido do Cliente (CODP) e o fluxo produtivo, com suas adaptações para o setor da construção civil. Essas adaptações, propostas por autores como Winch (2003) e Pan e Arif (2011), incluem as categorias CTO, DTO, MTO, MTF e MTM (Make-to-Maintain), que refletem as especificidades do ciclo de vida do setor da construção, como ilustrado no Quadro 5.

A fim de facilitar o entendimento e a comparação dos conceitos apresentados, elaborou-se um quadro que relaciona os conceitos da manufatura de Rudberg e Wikner (2004) – ETO, MTO, ATO e MTS – baseados na interação entre o Ponto de Desacoplamento do Pedido do Cliente (CODP) e o fluxo produtivo, com suas adaptações para o setor da construção civil. Essas adaptações, propostas por autores como Winch (2003) e Pan e Arif (2011), incluem as categorias CTO, DTO, MTO, MTF e MTM, que refletem as especificidades do ciclo de vida do setor da construção, como ilustrado no Quadro 5.

Quadro 5 - Comparação entre estratégias de customização na manufatura e equivalente na construção

Estratégia na manufatura	Definição	Equivalente na Construção	Fonte
Engineer-to-Order (ETO)	Produtos projetados e fabricados sob medida após o pedido do cliente.	Concept-to-Order (CTO): Cliente participa desde a concepção.	Rudberg e Wikner (2004); Winch (2003).
Make-to-Order (MTO)	Produtos fabricados após o pedido, utilizando um projeto padrão configurável.	Design-to-Order (DTO): Cliente especifica detalhes baseados em conceitos pré-existentes.	Rudberg e Wikner (2004); Winch (2003).
Assemble-to-Order (ATO)	Produtos montados a partir de componentes pré-fabricados, permitindo customização limitada.	Make-to-Order (MTO): Combina peças existentes com configurações específicas do cliente.	Rudberg e Wikner (2004); Slack et al. (2018).
Make-to-Stock (MTS)	Produtos fabricados para estoque, vendidos	Make-to-Forecast (MTF): Produtos produzidos em larga	Rudberg e Wikner

	posteriormente, sem customização.	escala para atender à demanda prevista.	(2004); Winch (2003).
		Make-to-Maintain (MTM): Foco em projetos de longo prazo com necessidades de retrofit e sustentabilidade.	Pan e Arif (2011).

Fonte: A autora

2.4 FABRICAÇÃO

2.4.1 Nível de pré-fabricação dos componentes e terceirização da produção

A decisão sobre o nível de pré-fabricação dos componentes e a estratégia de terceirização da produção são fundamentais para a definição do processo de construção modular. Essas decisões envolvem não apenas o grau de industrialização dos componentes, mas também o escopo da produção, ou seja, o que será produzido internamente e o que será terceirizado, de acordo com a estratégia da empresa. Como afirmam Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018) a terceirização envolve a escolha de adquirir produtos ou serviços de fornecedores, em vez de produzi-los internamente. Para essa decisão, o escopo da produção é crucial, pois define as fronteiras da operação, ou seja, as atividades que serão realizadas internamente e aquelas que serão adquiridas de fornecedores (Slack; Brandon-Jones; Johnston, 2018).

Na construção modular, essa definição do escopo da produção pode se manifestar em diferentes níveis de pré-fabricação. As empresas, ao adotar uma estratégia de terceirização, consideram tanto o que será terceirizado quanto quem será responsável por essa produção. A partir disso, a decisão de quanto terceirizar pode variar do extremo de produzir tudo internamente até o extremo de terceirizar toda a produção. Essa escolha dependerá dos objetivos estratégicos da empresa, que visam equilibrar custo, tempo de produção, e qualidade (Slack; Brandon-Jones; Johnston, 2018).

A decisão de terceirizar, no entanto, não é simples e envolve uma análise cuidadosa das circunstâncias e dos objetivos de desempenho necessários para a empresa competir de forma eficaz no mercado. Em alguns casos, uma produção mais descentralizada e com maior grau de terceirização pode ser mais vantajosa, enquanto em outros, uma abordagem mais interna pode trazer melhores resultados (Slack; Brandon-Jones; Johnston, 2018).

Essa análise, no contexto da construção pré-fabricada, pode ser vista na escolha do nível de pré-fabricação dos componentes que constituem os módulos. Com isso, a estratégia de terceirização deve alinhar-se com os objetivos de desempenho e com a complexidade dos componentes a serem fabricados.

3.3.1.1 Níveis de pré-fabricação dos componentes

A pré-fabricação na construção modular abrange uma ampla gama de elementos, desde componentes básicos até edifícios modulares completos, conforme discutido no item 3.1.3 sobre elementos e componentes modulares. Essas classificações são fundamentais para entender como componentes que constituem o produto podem apresentar diferentes níveis de pré-fabricação impactam na modularidade do produto e em toda cadeia logística e produtiva.

De acordo com a classificação de Lawson, Ogden e Goodier (2014) adaptada por Bastos (2015), os componentes podem ser classificados com base na complexidade e no grau de industrialização, abrangendo uma progressão desde a fabricação de componentes básicos até edifícios modulares completos, Figura 16.

Figura 16 - Níveis de utilização dos componentes modulares e pré-fabricados

NÍVEL	COMPONENTES	DESCRIÇÃO DA TECNOLOGIA
0	Materiais	Materiais básicos de construção de uso intensivo in loco, como concreto armado e alvenarias
1	Componentes	Elementos pré-fabricados, usados como parte da construção in loco, como treliças ou pilares de concreto pré-fabricadas
2	Sistemas Estruturais Planos	Combinação de componentes (nível 1) em 2 dimensões: sistemas estruturais planos, como frames ou painéis
3	Sistemas Volumétricos	Unidades totalmente modular, com alto grau de pré-fabricação, resultantes da combinação entre componentes e sistemas planos, gerando os módulos ou criando partes maiores das edificações.
4	Sistemas construtivos completos	Edificação feita inteiramente de forma modular e pre-fabricada

Fonte: Lawson et al. (2014)

Fonte: Adaptado por Bastos (2015), de Lawson, Ogden e Goodier (2014)

Bastos (2015) argumenta que a compreensão do edifício deve ir além da visão convencional, considerando-o como composto por elementos planos, como painéis, ou elementos volumétricos, como blocos, em vez de limitar-se a elementos lineares e planos. A pré-fabricação, portanto, abrange diferentes graus de industrialização, com um maior nível de sofisticação na fabricação dos componentes

Baú (2021), ao descrever os sistemas de produção na construção, segue a classificação original proposta por Gibb (1999) e adaptada por outros autores como Gibb e Isack (2003), Gibb e Pendlebury (2006), Jonsson e Rudberg (2014) e Kamali e Hewage (2016).

O Quadro de Baú (2021) é apresentado na Figura 17, que categoriza a pré-fabricação em quatro níveis principais: “*Component Manufacture and Sub-Assembly*”, “*Non-volumetric Pre-assembly*”, “*Volumetric Pre-assembly*” e “*Modular Building*”.

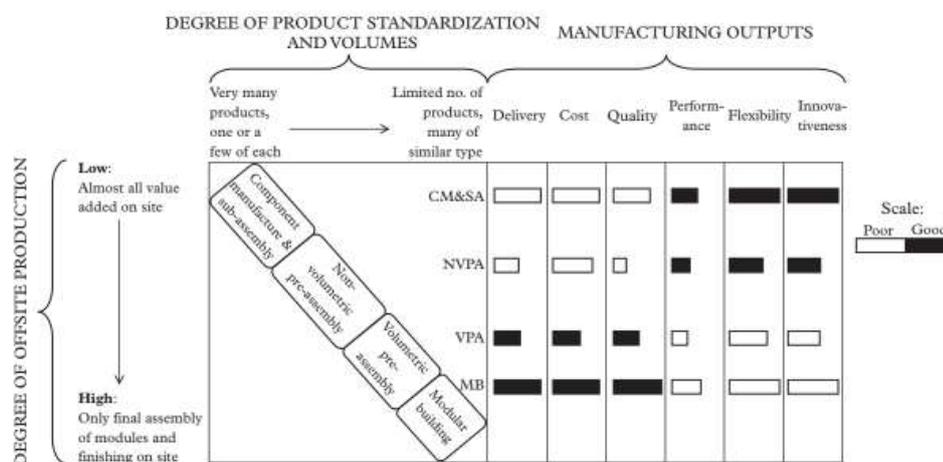
Figura 17 -Tipos de sistema de produção

TIPOS DE SISTEMA DE PRODUÇÃO	DEFINIÇÃO TRADUZIDA
<i>Component manufacture and sub-assembly</i>	Abordagem tradicional da construção. Matéria-prima e componentes são usados para construção dentro do canteiro.
<i>Non-volumetric pre-assembly</i>	Quando elementos de duas dimensões são pré-fabricados fora do canteiro de obras e montados dentro do canteiro.
<i>Volumetric pre-assembly</i>	Quando volumes relativos a partes específicas da construção são produzidos fora do canteiro e montados no canteiro e dentro de uma estrutura independente.
<i>Modular building</i>	Quando grande parte da produção acontece fora do canteiro de obras, com módulos fabricados com alto nível de conclusão. O único trabalho feito no canteiro é a montagem dos módulos, além das operações de finalização.

Fonte: Adaptado por Baú 2021, de Gibb e Isack (2003), Gibb e Pendlebury (2006), Jonsson e Rudberg (2014) e Kamali e Hewage (2016)

Esse Quadro classifica os componentes conforme a escala e a complexidade da pré-fabricação. O primeiro nível envolve a fabricação de componentes e subconjuntos básicos, enquanto o último, *Modular Building*, representa a construção de edifícios modulares completos, com a maior intensidade de industrialização e integração de diversos sistemas no processo de produção. Esta classificação foi também utilizada por Jonsson e Rudberg (2014) ao descrever os níveis de padronização e volume de produção, em relação aos objetivos de manufatura, Figura 18.

Figura 18 - Níveis de padronização e volume de produção



Fonte: Jonsson e Rudberg (2014)

No entanto, Ferreira (2024) observa que a matriz de Jonsson e Rudberg (2014) pode não capturar todas as nuances da produção off-site. Dentro de cada nível, há variações no grau de padronização e customização dos componentes, o que resulta em diferentes resultados para as empresas, dependendo do sistema de produção adotado. Em outras palavras, a flexibilidade na produção modular permite uma gama de opções para as empresas, desde a produção de componentes altamente padronizados até a personalização de sistemas mais complexos.

Bastos (2015) utiliza uma escala numérica de cinco níveis (de 0 a 4) para descrever a progressão da pré-fabricação, indo desde a ausência de pré-fabricação até a construção modular completa. Em contrapartida, o modelo de Gibb (1999) foca nos sistemas de produção com diferentes graus de industrialização, usando termos descritivos como "Pré-montagem Volumétrica" e "Construção Modular". Ambos os modelos buscam avaliar o grau de industrialização e a complexidade dos componentes, mas enquanto Bastos foca em uma escala mais numérica, Gibb (1999) adota uma abordagem descritiva que detalha as fases da industrialização.

Em resumo, o nível de pré-fabricação dos componentes está intimamente ligado à estratégia de terceirização adotada pela empresa, como discutido por (Slack; Brandon-Jones; Johnston, 2018). A decisão sobre quanto e o que terceirizar deve estar alinhada com os objetivos de produção e com o nível de sofisticação desejado na fabricação dos componentes, o que pode variar conforme a complexidade do projeto modular.

2.4.2 Modo de fabricação e industrialização

A fabricação modular, como apontado por Bastos (2015), é caracterizada por princípios de racionalização e industrialização, incluindo a padronização de componentes, a produção em série em ambientes fabris controlados e a otimização logística. Essas práticas, inspiradas em

setores industriais como o automobilístico, representam uma evolução nos métodos de construção, conforme destacado pelo autor.

A literatura especializada destaca diferentes modos de construção com base em aspectos como organização, pré-fabricação e uso de tecnologia. Neste sentido, Bastos (2015) prioriza a aplicação prática da Teoria da Coordenação Modular (TCM) para maximizar os benefícios da pré-fabricação, contrastando-a com os métodos tradicionais. Rosso (1980) diferencia a construção tradicional, dependente do canteiro de obras, da construção industrializada, caracterizada pela repetição e mecanização. Sabbatini (1989), por sua vez, aborda a gestão da produção com ênfase na organização dos recursos e na incorporação de princípios da manufatura.

Apesar das particularidades apontadas por cada autor, há um consenso de que a construção racionalizada representa um estágio intermediário entre os métodos tradicionais e os industrializados. Esse estágio se caracteriza pela incorporação de planejamento e organização sistemáticos, visando otimizar a produção. O Quadro 6 abaixo sintetiza os diferentes modos de construção — tradicional, racionalizado e industrializado — destacando algumas das características que definem cada um desses modos segundo a literatura. Portanto, a categorização do modo de construção varia em função de uma série de características.

Quadro 6 - Síntese das características dos modos de construir

Característica	Construção Tradicional	Construção Racionalizada	Construção Industrializada
Dependência do canteiro de obras	Alta	Média	Baixa
Grau de pré-fabricação	Nenhum	Uso parcial de componentes pré-fabricados	Elevado uso de componentes pré-fabricados
Organização e planejamento	Limitados	Sistematizados	Altamente Sistematizados
Mão de obra	Diversificada e artesanal	Semiespecializada	Altamente especializada
Tecnologia de Fabricação	Limitado, processo artesanal	Moderado, introdução ao uso de ferramentas e equipamentos	Avançado, uso intensivo de ferramentas e equipamentos na produção

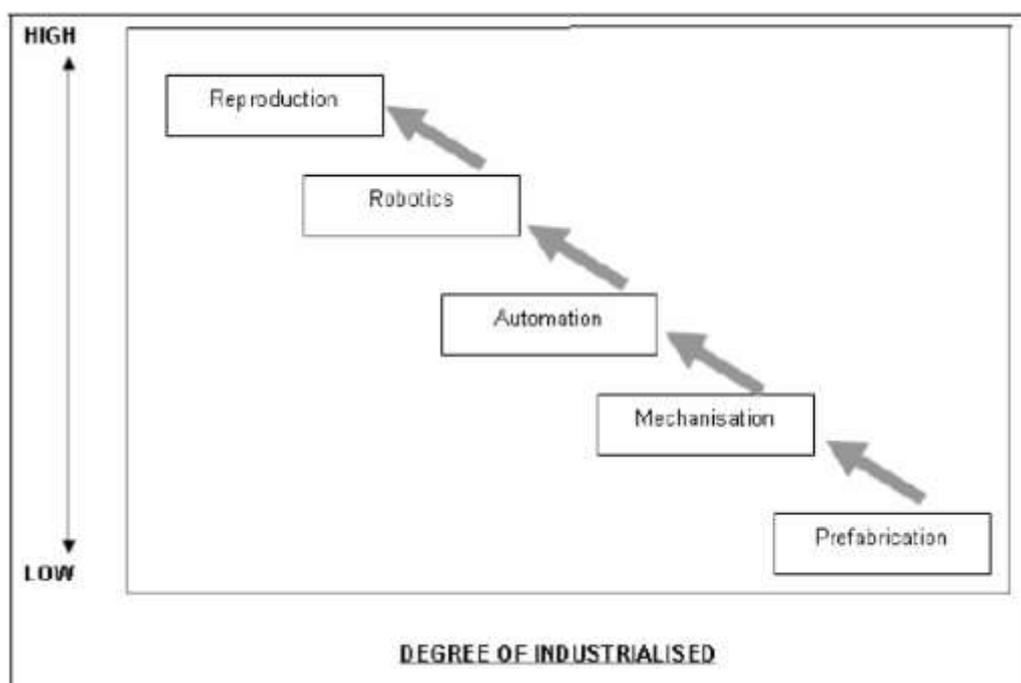
Fonte: A autora, a partir de Bastos (2015), Sabbatini (1989) e Rosso (1980)

O modo industrializado, segundo Kamar et al. (2011), é considerado o ápice da evolução construtiva, com a incorporação de automatização e robotização. A automatização, conforme o autor, substitui tarefas manuais por processos automatizados, melhorando a precisão e reduzindo erros. A robotização leva essa evolução ainda mais longe, utilizando robôs para

executar tarefas complexas de forma autônoma, permitindo customização em massa e eficiência máxima.

Richard (2005), citado por Kamar et al. (2011), descreve cinco níveis de industrialização que representam uma escala evolutiva da incorporação de tecnologia no contexto da construção industrializada, conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 19 - Níveis de industrialização



Fonte: Kamar et al., 2011

definem esses níveis como:

- **Pré-fabricação:** Produção de componentes em fábrica, reduzindo o tempo e a mão de obra no canteiro de obras.
- **Mecanização:** Uso de máquinas para tarefas construtivas, aumentando a produtividade.
- **Automação:** Implementação de sistemas automatizados para executar tarefas repetitivas, minimizando a intervenção humana.
- **Robótica:** Utilização de robôs para tarefas complexas e perigosas, promovendo segurança e eficiência.
- **Reprodução:** Criação de sistemas replicáveis que otimizam a produção em massa.

Rosso (1980) complementa que, no modelo industrial, cada operário executa apenas algumas operações, enquanto os produtos são padronizados e seriados. Esse método reflete o ápice da racionalização, alinhando-se às práticas mais avançadas da indústria manufatureira.

No entanto, apesar dos benefícios evidentes, Bastos (2015) ressalta que a implementação de processos industriais no Brasil ainda enfrenta desafios, como a resistência à mudança e a necessidade de requalificação da mão de obra. O autor observa que, no cenário brasileiro, é comum encontrar um modelo híbrido, onde componentes modulares são fabricados em indústrias, mas com processos ainda artesanais ou limitados. Apesar dessas limitações, o uso de produtos modulares, mesmo em estágios iniciais, tem se mostrado uma solução viável para promover avanços graduais no setor da construção.

2.4.3 Sistema de produção dos módulos

Ferreira (2024) argumenta que os termos "produção", "manufatura" e "operações" são frequentemente utilizados de maneira intercambiável por diferentes autores, assim como as expressões "sistema" e "processo". Segundo a autora, essas terminologias são empregadas de forma similar, embora existam nuances que as diferenciam, especialmente em relação à organização das atividades produtivas. Ferreira (2024) esclarece que, independentemente da expressão utilizada — como "sistema de produção", "sistema de manufatura", "processo de produção" ou "processo de manufatura" —, os autores, em geral, se referem à maneira como as empresas organizam as atividades de conversão dos recursos de produção em produtos ou serviços, com o objetivo de agregar valor às matérias-primas, como propõe Hitomi (1996).

Neste sentido, Oviedo Haito (2015) define ao sistema de produção na construção como sendo “*o conjunto de etapas físicas, gerenciais e temporais, relacionadas ao ciclo de vida da construção, para produzir uma construção ou parte dela*”. No presente trabalho, adota-se a expressão “sistema de produção” conforme recomendado por Oviedo Haito (2015), Ferreira (2024) e definido por Cardoso (1996) como o conjunto de atividades físicas e gerenciais que são articuladas e integradas em torno do projeto do produto e do projeto do processo de construção. Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018) contribuem para essa definição, argumentando que, de maneira geral, sistema de produção é um conjunto de recursos e atividades inter-relacionadas que transformam insumos em produtos ou serviços, agregando valor no processo, conforme descrito por Hitomi (1996). Esse conceito pode ser analisado sob três aspectos: estrutural, funcional e procedimental. O aspecto estrutural refere-se ao layout da fábrica, o funcional às atividades e funções desempenhadas, e o procedimental ao planejamento, implementação e controle da produção (Ferreira, 2024).

Diferentes autores propõem classificações para os sistemas de produção. Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018), por exemplo, classifica os sistemas de produção em cinco tipos principais: processos de projeto, processos de *jobbing*, processos de lote, processos em massa e processos contínuos. Essa classificação baseia-se nos arranjos físicos adotados para cada tipo de sistema de produção, conforme ilustrado na Figura 20 abaixo:

Figura 20 - Classificação dos sistemas de produção para Slack, 2018

Tabela 7.1 Alternativas de arranjo físico para cada tipo de processo

Tipos de processo de fabricação	Tipos de arranjo físico básicos		Tipos de processo de serviço
Processos do projeto	Arranjo físico posicional Arranjo físico funcional	Arranjo físico posicional Arranjo físico funcional	Serviços profissionais
Processos de <i>jobbing</i>	Arranjo físico funcional Arranjo físico celular	Arranjo físico celular	
Processos de lote	Arranjo físico funcional Arranjo físico celular	Arranjo físico funcional Arranjo físico celular	Loja de serviço
Processos em massa	Arranjo físico celular	Arranjo físico celular	Serviços em massa
Processos contínuos	Arranjo físico por produto Arranjo físico por produto	Arranjo físico por produto	

Fonte: Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018)

Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018), reconhece que, na prática, não há uma fronteira clara entre os diferentes tipos de sistemas, sendo comum a sobreposição de características entre eles.

Por outro lado, Miltenburg (2005) adota uma classificação mais detalhada, dividindo os sistemas de produção em: sistema de *jobbing*, sistema de lotes, sistema de linha de fluxo, sistema flexível de manufatura, sistema *just in time* e sistema de fluxo contínuo. Essa classificação considera diversos fatores, como a variedade e o volume de produção, o fluxo de materiais, a flexibilidade e a especialização dos processos de fabricação, o Quadro 7 a seguir resume essa classificação:

Quadro 7 - Classificação dos sistemas de produção para Miltenburg (2005)

Estratégia de Produção	Definição	Referência Bibliográfica
Sistema de <i>Jobbing</i> (Produção sob encomenda)	Produção em pequena escala e altamente personalizada, onde cada produto ou lote é único e fabricado sob encomenda. As máquinas e ferramentas são configuradas para fabricar diferentes produtos de acordo com a demanda específica.	Miltenburg (2005) e Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018)
Sistema de Lotes (Produção em lotes)	Produção de uma quantidade limitada de produtos em lotes, sendo cada lote fabricado e finalizado antes do início da produção do próximo. Este sistema permite uma maior flexibilidade do que a	Miltenburg (2005)

	produção em linha de fluxo, mas com menos customização do que o sistema de <i>jobbing</i> .	
Sistema de Linha de Fluxo (Produção em Massa)	Produção em grande escala onde os produtos são padronizados e fabricados em um fluxo contínuo, passando por várias etapas de produção em uma linha sequencial. O foco está na eficiência e na redução de custos.	Miltenburg (2005)
Sistema Flexível de Manufatura (FMS)	Sistema que combina a flexibilidade do sistema de <i>jobbing</i> com a eficiência da linha de fluxo. As máquinas são automatizadas e configuradas para mudar rapidamente de uma tarefa para outra, adaptando-se a diferentes produtos sem perder eficiência.	Miltenburg (2005)
Sistema Just In Time (JIT)	Filosofia de produção que busca eliminar desperdícios ao produzir apenas o que é necessário, no momento certo e na quantidade exata, reduzindo estoques e tempos de produção. É amplamente associado ao Sistema Toyota de Produção.	Miltenburg (2005)
Sistema de Fluxo Contínuo	Produção de bens altamente padronizados em grandes quantidades, onde o processo de produção é ininterrupto. Geralmente utilizado em indústrias de bens como químicos e alimentos, onde a produção não é discretizada em lotes.	Miltenburg (2005) e Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018)

Fonte: A autora

Ferreira (2024) agrupa os sistemas de produção propostos por Miltenburg (2005) em categorias que facilitam a compreensão e a distinção entre cada sistema, considerando variáveis como a variedade de produtos, o volume de produção, o fluxo de materiais, os equipamentos e a mão de obra envolvida, conforme a Figura 21. Esse agrupamento permite uma escolha mais precisa do sistema de produção mais adequado, conforme a estratégia adotada pela empresa.

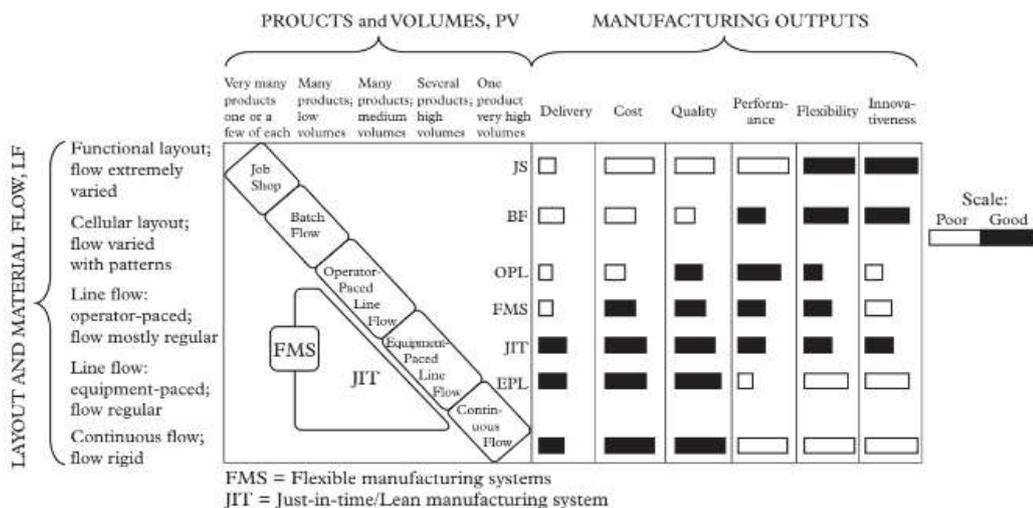
Figura 21 - Resumo das principais características dos sistemas de produção

Sistema de produção	Variedade de produtos	Volume de produção	Fluxo de materiais	Equipamentos	Mão de obra
Processos de projeto	Muito alta	Muito baixo	Muito variado	Flexível, de uso geral	Altamente qualificada
<i>Jobbing</i>	Muito alta	Muito baixo	Muito variado	Flexível, de uso geral	Altamente qualificada
Em lotes	Alta	Baixo	Variados com padrões	De uso geral com certa especialização	Polivalente
Em linha de fluxo	Baixa	Médio a alto	Regular	Especializado	Não-qualificada
Em fluxo contínuo	Muito baixa (padronizado)	Muito alto	Rígido	Especializado e muito automatizado	Não-qualificada
<i>Just-in-time</i>	Alta	Baixo a médio	Regular	De uso geral com especialização	Polivalente
Sistemas flexíveis de manufatura	Muito alta	Baixo	Regular	Flexível e muito automatizado	Não-qualificada

Fonte: Adaptado por Ferreira (2024) De Miltenburg (2005)

Jonsson e Rudberg (2014) reconhecem as particularidades da construção *off-site* em comparação com a manufatura tradicional, propondo uma matriz adaptação de Miltenburg (2005) para esse contexto específico. Sua adaptação considera duas dimensões principais: volume e variedade da produção, além dos resultados esperados em termos de custo, qualidade, desempenho, entrega, flexibilidade e inovação. A Figura 22 abaixo ilustra essa adaptação:

Figura 22 - Adaptação da matriz de sistemas de produção para construção off-site



Fonte: Jonsson e Rudberg (2014)

Em resumo, escolhe-se adotar determinado sistemas de produção na construção modular com base na combinação de fatores como volume, variedade e flexibilidade, visando otimizar a fabricação e montagem de componentes, conforme destacado por autores como Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018) e Jonsson e Rudberg (2014)

2.4.4 Layout de Fabricação

O conceito de arranjo físico, ou layout, de uma operação refere-se à forma como os recursos de produção são organizados no espaço e como as tarefas são distribuídas entre esses recursos, influenciando diretamente a eficiência do processo produtivo (Slack; Brandon-Jones; Johnston, 2018). Segundo esses autores, as decisões sobre o arranjo físico são cruciais, pois um layout inadequado pode gerar problemas como fluxos de trabalho confusos, longos tempos de processo, altos custos e uma resposta insatisfatória tanto para os funcionários quanto para os clientes. Dessa forma, a escolha do tipo de arranjo físico impacta a fluidez da produção e pode afetar a competitividade de uma operação.

Miltenburg (2005) identificou três tipos principais de arranjos físicos: o layout funcional, o layout celular e o layout em linha. O layout funcional organiza os recursos de acordo com suas funções similares, favorecendo flexibilidade, mas com a desvantagem de um fluxo de materiais mais complexo. O layout celular agrupa os recursos para produzir produtos semelhantes, reduzindo tempos de deslocamento e melhorando a eficiência. O layout em linha é mais adequado para processos de alta repetição, com fluxo contínuo e otimizado. Em sua revisão, Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018) introduziram um quarto tipo, o layout posicional, no qual os recursos são fixos e os materiais se movem ao redor deles, ideal para a fabricação de produtos pesados ou grandes. Os tipos básicos de arranjos físicos são apresentados no Quadro 8 abaixo:

Quadro 8 - Tipos de layout de arranjos físicos

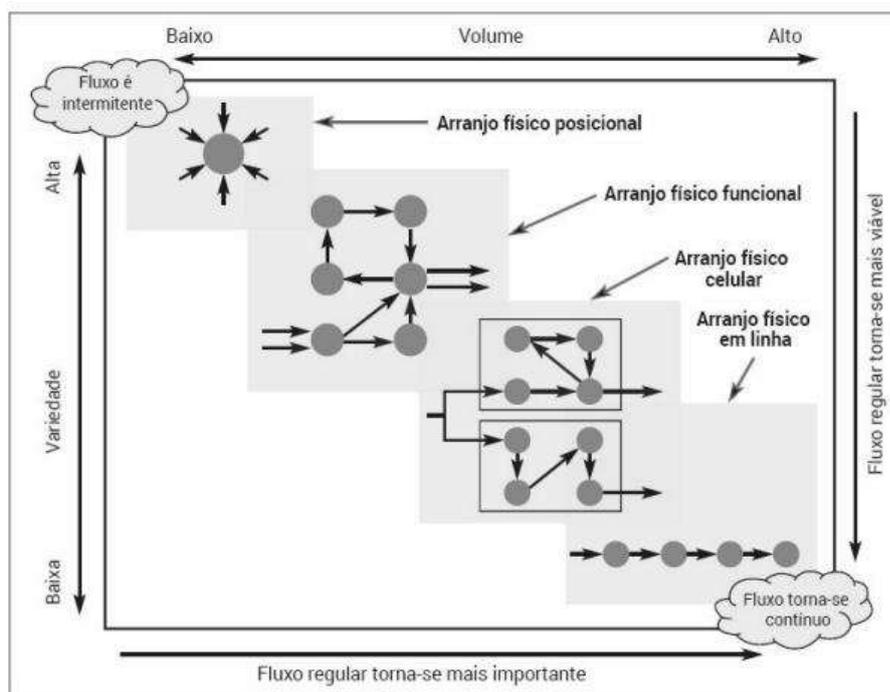
Tipo de Layout	Descrição	Vantagens	Desvantagens	Aplicações	Referências
Posicional	Os recursos transformados (materiais, informações ou clientes) permanecem fixos, enquanto os recursos de transformação se movem ao redor deles.	Adequado para produtos grandes e complexos; permite alto grau de customização.	Pode ser ineficiente para produção em massa; alto custo de movimentação de recursos.	Construção de navios, grandes obras de infraestrutura, projetos de construção complexos.	Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018)
Funcional (ou por Processo)	Reúne recursos de transformação semelhantes em um mesmo local,	Alta flexibilidade para lidar com variedade de produtos; permite	Fluxo de materiais pode ser complexo e ineficiente; dificuldade em balancear a	Oficinas mecânicas, hospitais, produção de peças sob encomenda.	Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018)

	otimizando a utilização de recursos específicos.	especialização de funcionários e equipamentos.	capacidade das diferentes áreas.		
Celular	Organiza os recursos de transformação em células, cada uma dedicada à produção de uma família de produtos com necessidades semelhantes.	Fluxo de materiais mais eficiente que o layout funcional; permite maior autonomia e responsabilidade das células.	Pode ser menos eficiente que o layout em linha para produção em massa; requer planejamento e balanceamento cuidadosos das células.	Produção de componentes modulares para construção off-site, produção de móveis, fabricação de peças em lotes.	Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018)
Em Linha (ou por Produto)	Dispõe os recursos de transformação em uma sequência linear, de acordo com a ordem das etapas do processo produtivo.	Alta eficiência para produção em massa; simplifica o fluxo de materiais e o controle da produção.	Baixa flexibilidade para lidar com variações na demanda ou customização de produtos; pode ser monótono para os trabalhadores.	Produção em massa de automóveis, eletrodomésticos, linhas de montagem de módulos padronizados.	Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018)

Fonte: A autora a partir de Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018)

A escolha do arranjo físico ideal está diretamente relacionada à combinação de volume e variedade da produção. Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018) propõem a análise da eficiência do layout com base em uma “diagonal de eficiência”, que representa a combinação ideal entre essas variáveis e o tipo de arranjo físico mais adequado, conforme ilustrado na Figura 23. Desvios dessa diagonal podem indicar ineficiências, como no caso de uma produção de alto volume e baixa variedade operando com um layout posicional, mais apropriado para cenários de baixa variedade e volume. Nesse contexto, a substituição por um layout em linha, mais alinhado à característica do processo, poderia aumentar a eficiência, aproximando a operação da configuração ideal.

Figura 23 - Relação ideal entre volume e variedade e os tipos de arranjo físico



Fonte: Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018)

De acordo com Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018), a escolha do arranjo físico adequado é essencial para a eficiência da produção, pois ele determina o fluxo de materiais, o tempo de processamento e os custos operacionais. Em muitos casos, as fábricas utilizam arranjos híbridos ou mistos, combinando elementos de diferentes layouts básicos para melhor atender às necessidades específicas da produção, como observado por Ferreira (2024). Essa flexibilidade permite que as empresas ajustem seus processos conforme as características dos produtos e as variações da demanda.

Em síntese, a fabricação na construção modular envolve uma série de decisões. O nível de pré-fabricação é uma delas, que varia desde componentes básicos a edifícios completos, influenciando a escolha entre produção interna e terceirização, com base nos objetivos estratégicos da empresa, como custo, tempo e qualidade. A fabricação modular é caracterizada por princípios de racionalização e industrialização, porém o modo de fabricação pode apresentar características tradicionais, racionalizados e industrializados. A escolha do sistema de produção, também deve estar alinhado com o objetivo, o planejamento e o layout de fabricação influenciando diretamente na eficiência e competitividade da operação, exigindo um planejamento cuidadoso para otimizar o fluxo de materiais e minimizar custos operacionais.

2.5 LOGÍSTICA DE SUPRIMENTOS

2.5.1 Gestão da cadeia de suprimentos

A gestão da cadeia de suprimentos (*Supply Chain Management*) é definida como a administração dos relacionamentos e fluxos entre operações e processos que geram valor por meio de produtos e serviços destinados ao consumidor final (Slack; Brandon-Jones; Johnston, 2018). Essa abordagem holística, conforme Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018), integra empresas e processos ao longo de toda a cadeia produtiva. Com a crescente terceirização de atividades, torna-se cada vez mais essencial gerenciar eficientemente os suprimentos e a distribuição, especialmente em setores como a construção modular, onde o sucesso está diretamente relacionado a uma gestão bem estruturada, tanto no nível dos fornecedores quanto dos clientes.

O objetivo da produção desempenha um papel fundamental na logística, orientando as decisões estratégicas na cadeia de suprimentos. Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018) destaca que, quando uma operação compete com base em custos reduzidos, os objetivos relacionados ao custo passam a influenciar diretamente os processos logísticos. Por isso, o alinhamento entre os objetivos de produção e os processos logísticos é essencial para otimizar o desempenho e a cadeia de valor.

Oviedo Haito (2015) apresenta um esquema ilustrativo adaptado de Brandenburger; Nalebuff (1996), que descreve, a rede de valor logístico, Figura 24. Nesse modelo, a empresa é posicionada no centro de um sistema que equilibra parceiros complementares (como fornecedores e aliados estratégicos) e concorrentes substitutos. A estratégia de abastecimento, incluindo o momento e a forma de recebimento de suprimentos, bem como o relacionamento com fornecedores, emerge como um aspecto crítico para o sucesso empresarial.

Figura 24 - Rede de valor logístico

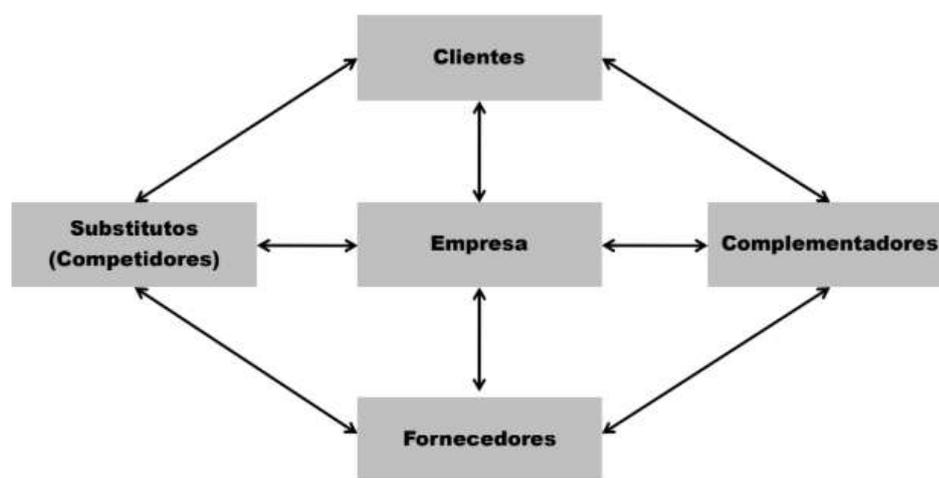


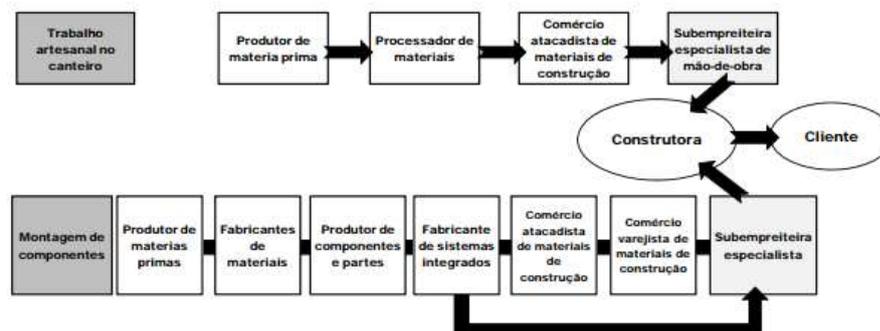
Figura 2.3: Rede de valor (adaptado de BRANDENBURGER e NALEBUFF, 1996)

Fonte: Adaptado por Oviedo Haito (2015) de Brandenburger; Nalebuff (1996)

Além disso, Oviedo Haito (2015), com base em Pryke (2007), ilustra a cadeia de fornecedores na construção civil, diferenciando duas cadeias produtivas: o trabalho artesanal em canteiro de obras e a montagem de componentes *off-site*. A Figura 25 destaca que a montagem de componentes, uma característica marcante da construção pré-fabricada, exige

especialização em cada etapa da cadeia, diferentemente do trabalho artesanal, que adota uma abordagem generalista. Também é evidenciada a importância do fluxo de materiais, que, na montagem de componentes, requer um planejamento rigoroso e sincronizado, com entregas específicas alinhadas à sequência de montagem.

Figura 25 - Exemplo de cadeia de fornecedores para um empreendimento de construção



Fonte: Adaptado por Oviedo Haito (2015) de Pryke (2007)

2.5.2 Estratégia de abastecimento de suprimentos

Na construção civil, especialmente no contexto da construção modular, onde os prazos são reduzidos e a coordenação entre as etapas é crucial, adotar uma estratégia eficiente de abastecimento de suprimentos é essencial para garantir o sucesso dos empreendimentos. Gerenciar o abastecimento implica decidir sobre o momento e o modo de fornecimento dos insumos, considerando fatores como custo, flexibilidade e mitigação de riscos. Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018) enfatizam que, ao optar pela aquisição externa de produtos ou serviços, os gestores devem estabelecer estratégias claras de aquisição, selecionar fornecedores adequados, assegurar um fluxo contínuo de suprimentos e promover o desenvolvimento das capacidades dos fornecedores ao longo do tempo.

Sobre o momento de recebimento dos insumos, Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018) apresentam três estratégias principais. A primeira, o *Just-in-Time* (JIT), busca minimizar os estoques ao alinhar a entrega de materiais à demanda imediata de produção. Essa abordagem reduz custos de armazenagem e desperdícios, mas exige alta coordenação com fornecedores e está sujeita a riscos de atrasos. Estudos como os de Hitomi (1996) e Miltenburg (2005) destacam que o JIT está diretamente associado à filosofia de melhoria contínua, sincronizando a produção com a demanda e eliminando desperdícios. Por outro lado, o sistema Kanban, desenvolvido pela Toyota na década de 1950, utiliza cartões como sinalizadores para indicar a necessidade de reabastecimento, criando um fluxo puxado de materiais que garante maior eficiência operacional (Huang; Kusiak, 1996). Por fim, a manutenção de estoques de segurança age como um buffer contra incertezas, assegurando a continuidade da produção. No entanto, Rosso (1980) alerta que essa abordagem implica custos elevados, tanto pelo investimento no produto quanto pela infraestrutura necessária para armazená-lo.

Além de determinar o momento ideal para o abastecimento, é indispensável analisar como o fornecimento é estruturado. Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018) classificam as estratégias de fornecimento em quatro categorias principais:

a) **Fornecimento Múltiplo**: Envolve o uso de diversos fornecedores para um mesmo produto ou serviço, aumentando a competitividade e a flexibilidade, mas dificultando a construção de parcerias estratégicas.

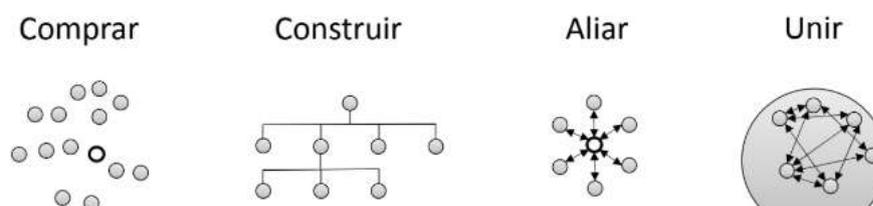
b) **Fornecimento Único**: Favorece a consolidação de relações de longo prazo e a redução de custos transacionais, embora aumente a vulnerabilidade a interrupções, devido à dependência de um único fornecedor.

c) **Fornecimento Delegado**: Transfere para fornecedores principais a responsabilidade por gerenciar conjuntos completos de produtos ou serviços, simplificando a administração, mas concentrando poder em poucos agentes.

d) **Fornecimento Paralelo**: Combina elementos das abordagens anteriores, utilizando fornecedores exclusivos para diferentes modelos de um mesmo produto. Essa estratégia oferece flexibilidade e competitividade, mas requer uma gestão mais complexa.

Oviedo Haito (2015), com base em Raab e Kenis (2009), complementa essa discussão ao tratar da governança em redes de empresas, que pode variar desde transações pontuais no mercado até a integração vertical completa. No extremo menos coordenado, as interações de mercado são transações pontuais baseadas em preço e condições de pagamento. Quando maior coordenação é necessária, contratos formais definem prazos e padrões de qualidade. Em situações que exigem confiança, contratos relacionais promovem colaborações de longo prazo. Alianças estratégicas aprofundam essa colaboração ao compartilhar recursos e riscos para objetivos comuns. Por fim, a integração vertical representa o nível máximo de coordenação, no qual a empresa controla todas as etapas do processo produtivo. Essa evolução na coordenação está ilustrada na Figura 26, que apresenta as distintas formas da governança.

Figura 26 - Formas distintas de governança



Fonte: Adaptado por Oviedo Haito (2015) de Raab e Kenis (2009)

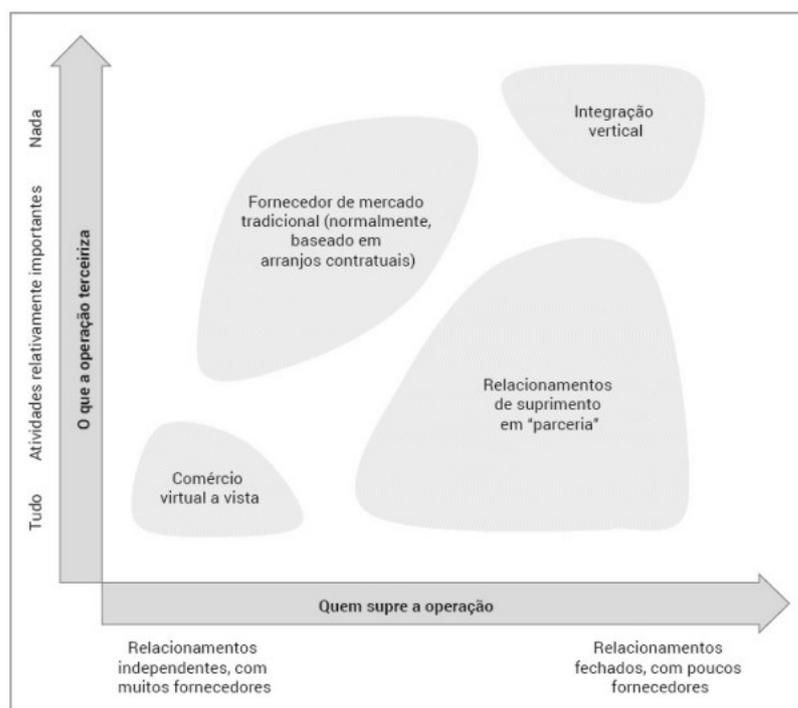
Portanto, alinhar as estratégias de abastecimento às demandas de cada empreendimento é essencial na construção modular. Estratégias que definam o “quando” e “como” os insumos são fornecidos são fundamentais para atender prazos e manter a qualidade da produção.

2.5.3 Estratégia de relacionamento com fornecedores

No setor de construção modular, o relacionamento com fornecedores desempenha um papel estratégico essencial, indo além das transações comerciais. Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018) argumentam que construir parcerias de confiança, baseadas em comunicação clara, alinhamento de objetivos e colaboração, é fundamental para garantir a qualidade dos módulos, cumprir prazos e otimizar custos. A terceirização de componentes exige um relacionamento próximo, com o compartilhamento de informações técnicas e monitoramento constante de prazos e qualidade. Assim, a escolha dos fornecedores e o tipo de relacionamento estabelecido impactam diretamente o desempenho e a viabilidade do projeto.

Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018) apresentam dois eixos que orientam as estratégias de relacionamento com fornecedores: o número de fornecedores envolvidos e o nível de proximidade no relacionamento. O fornecimento pode variar de relações transacionais com muitos fornecedores a parcerias fechadas e estratégicas com poucos. Esse mapeamento é crucial para decidir o que terceirizar e como gerir a relação com os fornecedores, conforme ilustrado na Figura 27 que associam as dimensões de terceirização e do tipo de relacionamento. Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018) ressaltam, “*Dois dimensões são particularmente importantes – o que a empresa opta em terceirizar e quem escolhe para fazer isso*”.

Figura 27 - Orientação das estratégias de relacionamento com fornecedor



Fonte: Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018)

Além disso, Cox e Thompson (1997) classificam as relações com fornecedores em cinco categorias, destacando a importância de alinhar a governança e o tempo de contrato à estratégia de fornecimento, como apresentado no Quadro 9.

Quadro 9 - Classificação das relações com fornecedores a partir de Cox e Thompson 1997

CATEGORIA	RELACIONAMENTO ADVERSARIAL	ALIANÇAS ESTRATÉGICAS	FORNECEDOR PREFERENCIAL	FONTE ÚNICA (SINGLE SOURCING)	FONTE EM REDE (NETWORKING SOURCING)
DESCRIÇÃO	Caracterizado por negociações agressivas e foco em maximizar os próprios interesses, com pouca colaboração.	Parcerias de longo prazo que envolvem colaboração estreita e objetivos comuns entre empresa e fornecedores.	Seleção de fornecedores considerados os melhores em termos de qualidade e confiabilidade, com contratos de longo prazo.	Escolha de um único fornecedor para um determinado produto ou serviço, criando uma relação colaborativa.	Utilização de uma rede de fornecedores para garantir flexibilidade e resiliência na cadeia de suprimentos.

Fonte: A autora

No Brasil, Coyado Petrella (2016) observa que a cadeia de suprimentos na construção *off-site* é fragmentada e marcada por relações adversariais, o que dificulta a criação de padrões de mercado e o fortalecimento da modularidade. A fragmentação resulta da predominância de pequenos fornecedores, que carecem de capacidade técnica ou volume suficiente para atender às demandas do setor. Nesse contexto, as empresas que adotam a modularidade frequentemente investem em parcerias de longo prazo para superar esses desafios, garantindo eficiência e qualidade. Coyado Petrella (2016) também observa que a mentalidade de projetos únicos, predominante no setor, contrasta com as práticas colaborativas observadas em mercados internacionais, reforçando a necessidade de uma mudança para estratégias mais integradas.

Parcerias colaborativas, como descrito por Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018), envolvem maior interação, compartilhamento de informações e resolução conjunta de problemas. Essas práticas são essenciais para empresas que terceirizam componentes específicos. No entanto, em situações de ampla concorrência e governança baseada em contratos de mercado, as parcerias estratégicas tendem a ser menos frequentes.

No contexto brasileiro, Coyado Petrella (2016) destaca que a escolha entre produção interna e terceirização é muitas vezes influenciada pela maturidade do mercado fornecedor, que ainda carece de capacidade técnica ou volume suficiente para atender às demandas da construção modular. Isso enfatiza a importância de estratégias de governança bem definidas e de colaboração estreita com fornecedores para superar as limitações do mercado e otimizar as operações modulares.

Portanto, o tipo de relacionamento com fornecedores, aliado à decisão de terceirizar ou internalizar a produção, é um fator crítico para o sucesso das operações na construção modular. Para simplificar a caracterização das organizações, neste trabalho foca-se nas decisões de produzir internamente ou terceirizar, e, no caso de terceirização, como se dá o relacionamento com fornecedores. Isso permite analisar a cadeia de suprimentos e os modelos de governança, essenciais para o sucesso da construção modular. Coyado Petrella (2016) destaca que a escolha

depende da maturidade do mercado fornecedor, que muitas vezes não possui capacidade ou volume suficientes, o que torna necessária uma governança clara e colaboração com fornecedores para garantir eficiência nas operações.

2.6 TRANSPORTE, MONTAGEM E INSTALAÇÃO IN LOCO

2.6.1 Modo de Transporte de Módulos

Segundo Baú (2021), as dimensões dos módulos desempenham um papel crucial no projeto, pois estão limitadas pela capacidade de transporte. A viabilidade logística, em especial o transporte rodoviário dos módulos até o canteiro de obras, deve ser considerada desde as fases iniciais do planejamento. Esse planejamento precoce é fundamental para garantir que todos os aspectos do projeto sejam atendidos de maneira eficiente e segura, sendo este um limitante físico e econômico.

Ferreira (2024) destaca que, em relação ao transporte dos módulos, os profissionais da área enfatizam a necessidade de um planejamento detalhado para garantir a segurança, a integridade dos módulos e a otimização dos custos. A escolha do modal de transporte e a viabilidade de acesso ao canteiro dependem principalmente das dimensões e do peso dos módulos. Além disso, os entrevistados por Ferreira ressaltam a importância de uma visita prévia ao canteiro para identificar rotas, obstáculos e restrições de acesso. A altura, o comprimento e a largura dos módulos devem ser compatíveis com as vias por onde serão transportados, incluindo pontes, túneis e ruas urbanas. O peso dos módulos, por sua vez, está condicionado à capacidade dos veículos de transporte e dos equipamentos de içamento disponíveis.

Baú (2021) reforça essas considerações, abordando a relevância do planejamento logístico e das restrições dimensionais no transporte, içamento e posicionamento dos módulos, com o intuito de garantir a eficiência e segurança dessas etapas. A autora também menciona que, em alguns casos, ajustes dimensionais podem ser necessários durante a instalação, a fim de corrigir pequenas variações nas medidas ou imperfeições nas estruturas de apoio.

Adicionalmente, a escolha do modo de transporte pode variar conforme as necessidades específicas de cada projeto. Baú (2021) explica que, uma vez finalizadas as atividades na fábrica, o módulo está pronto para ser transportado até o canteiro de obras. O transporte pode ser realizado de forma rodoviária, utilizando caminhões adequados, ou, quando necessário, por meio de transporte hidroviário.

A previsão de pontos de içamento adequados nos módulos é outro aspecto que requer atenção. De acordo com Baú (2021), é fundamental garantir que os pontos de içamento sejam projetados de maneira a assegurar a segurança e eficiência das operações de transporte e instalação. O projeto deve considerar a capacidade dos equipamentos de içamento e as características do local da obra, buscando otimizar o processo e evitar problemas durante a execução, falhas nos pontos de ancoragem podem gerar deformações nos módulos e componentes.

2.6.2 Montagem e Instalação

A montagem é o ponto de convergência entre a linha de componentes e a linha de produto. De acordo com Oviedo Haito (2015), conforme ilustrado na Figura 28, adaptada de Gray e Flanagan (1989), a "integração de componentes no canteiro de obras" é uma atividade de suporte que depende de um conjunto de etapas anteriores bem estruturadas. Essas etapas são fundamentais para determinar o sucesso da montagem e instalação no local. A eficiência na execução da obra é assegurada por um planejamento detalhado.

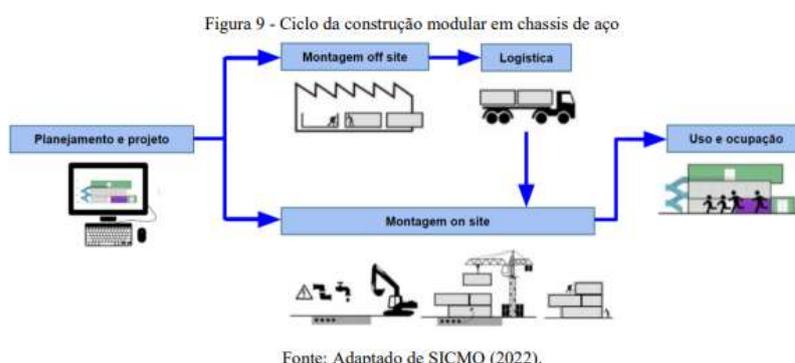
Figura 28 - Atividades de suporte para a integração dos componentes no canteiro de obras



Fonte: Adaptado por Oviedo Haito (2015) de Gray e Flanagan (1989)

Baú (2021) descreve a etapa de "Montagem" no processo executivo das edificações modulares, incluindo a fixação dos módulos à fundação e entre si, sendo parte integrante do processo de instalação e montagem in loco dos módulos. A imagem adaptada de SICMO (2022) por Folador (2022), Figura 29 ilustra o ciclo de vida da construção modular, destacando a etapa de montagem *on-site*, que inclui atividades preliminares no canteiro, como fundação, montagem e instalação, realizadas simultaneamente à produção na fábrica.

Figura 29 - Ciclo da construção modular



Fonte: Adaptado por Folador (2022), de SICMO (2022)

A literatura sugere uma relação entre o nível de terminalidade do produto e o local de integração. Baú (2021), ao descrever a etapa de "Instalação", que sucede à montagem, menciona que atividades de finalização não executadas na fábrica, como vedações e

acabamentos finais, são realizadas no local. Isso indica que a montagem pode ocorrer com diferentes níveis de acabamento do produto, dependendo da estratégia de produção adotada.

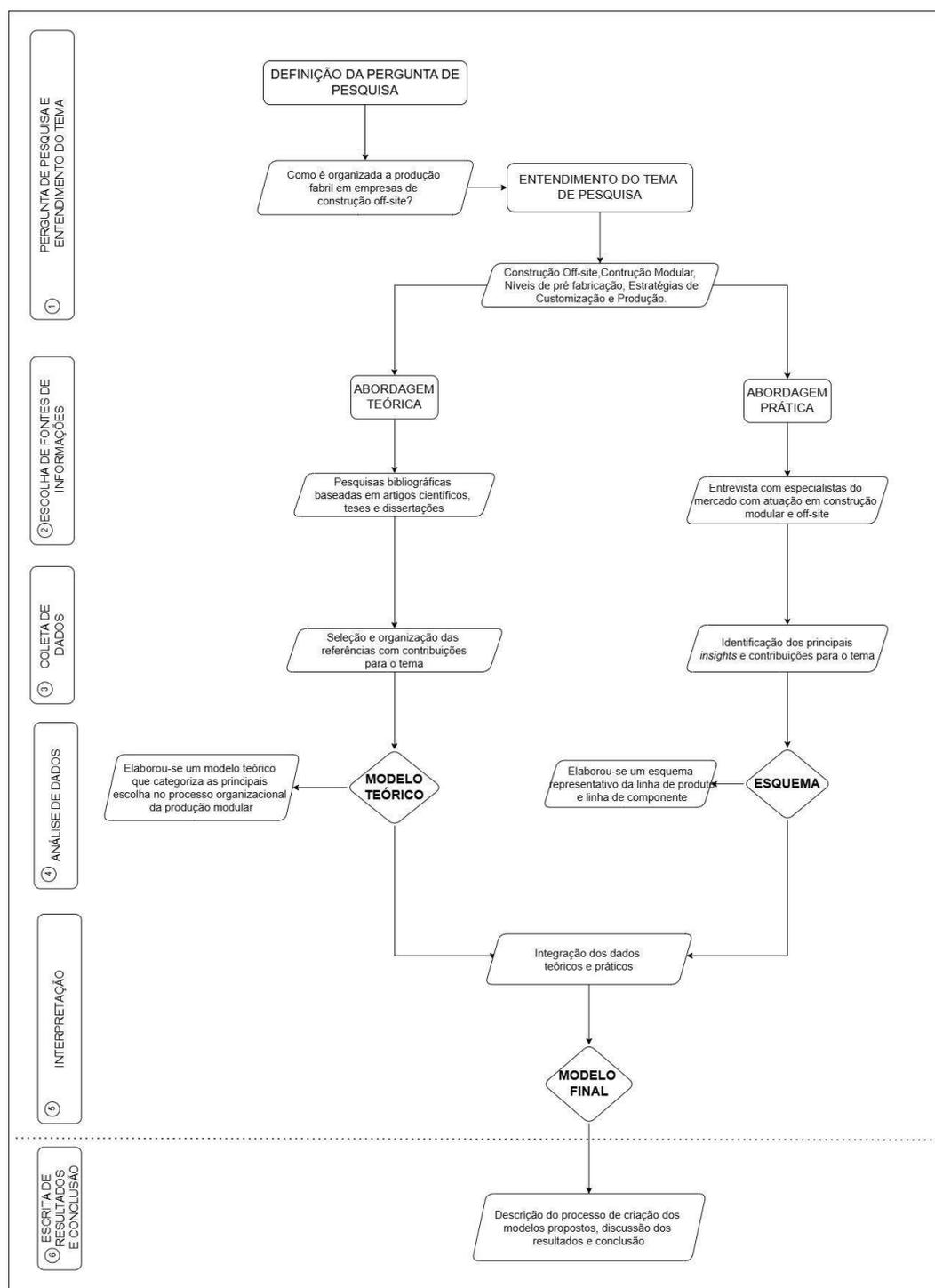
Ferreira (2024) discute os sistemas de produção, como a "linha de fluxo" e a produção "em lotes", podem influenciar o nível de terminalidade do produto na etapa de montagem. No entanto, a autora não faz uma relação direta entre esses sistemas e o local de montagem, deixando claro que a escolha do sistema pode impactar o prazo e o nível de finalização necessário para o produto modular.

Em resumo, a escolha entre terceirizar ou produzir internamente os componentes é crucial na logística de suprimentos. Essa decisão deve ser cuidadosamente avaliada, considerando fatores como a rede de fornecimento, estratégias de abastecimento e o relacionamento com fornecedores. Optar pela terceirização, exige um estudo aprofundado do fornecimento que atenda as especificidades do produto e necessidades do cliente. Por outro lado, a fabricação própria também apresenta desafios significativos na fabricação, tornando a definição dos níveis de pré-fabricação dos componentes fundamental para a eficácia do processo. Além disso, é vital prever, ainda na fase de projeto, as barreiras relacionadas ao transporte, garantindo que os módulos cheguem ao local da obra de maneira satisfatória e que a conexão entre eles seja eficiente.

3. METODOLOGIA

Este trabalho adota uma abordagem qualitativa, com foco na construção do conhecimento por meio da análise teórica e prática. A pesquisa seguiu as diretrizes metodológicas de Bryman (2008). O processo metodológico é ilustrado na Figura 30 abaixo:

Figura 30 - Metodologia



Fonte: A Autora

3.1 PERGUNTA DE PESQUISA E ENTENDIMENTO DO TEMA

A pergunta central desta pesquisa é: "Como é organizada a produção fabril em empresas de construção off-site, considerando diferentes níveis de pré-fabricação e o uso de sistemas modulares?". Essa questão visa investigar as escolhas estratégicas e operacionais que caracterizam a organização da produção. O entendimento do tema está baseado nos principais conceitos que caracterizam a organização da produção *off-site* e modular, como a pré-fabricação e estratégias de customização e produção.

3.2 ESCOLHA DAS FONTES DE INFORMAÇÃO

A coleta de dados teóricos foi realizada por meio de uma revisão bibliográfica abrangente e indicações feitas pelo professor orientador. Foram analisados artigos científicos, teses, dissertações, livros e outras fontes acadêmicas relacionadas à construção modular, industrialização da construção e estratégias de produção *off-site*. Utilizou-se as seguintes palavras-chave nas buscas por artigos acadêmicos: "*Industrialized building*", "*Modular construction*", "*Construction industrialization*", "*Offsite construction*", "*Prefabrication level*", "*Prefabricated components*", "*Customization*", e "*Decision-making*". O objetivo dessa revisão foi entender quais são as principais escolhas que orientam a produção modular e *off-site*.

As fontes práticas foram selecionadas a partir de entrevistas com profissionais especialistas que atuam no mercado de construção modular e *off-site* indicados pelo professor orientador. No Quadro 10 a seguir apresenta-se algumas informações sobre os entrevistados com relação a função, atuação da empresa e tempo de experiência em construções.

Quadro 10 - Entrevistados

ENTREVISTADO	FUNÇÃO	ATUAÇÃO	TEMPO DE EXPERIÊNCIA
Entrevistado A	Engenheiro Civil, Fundador e Diretor Geral	Empresa de Serviços de Engenharia para Construção Industrializada	12 anos
Entrevistado B	Engenheiro Civil e CEO	Empresa de Construção Modular	30 anos
Entrevistado C	Engenheiro Civil, CEO e Diretor Técnico	Empresa de Construção Modular	24 anos
Entrevistado D	Engenheiro Civil e Diretor Geral	Serviços de Patologia com experiência em Coordenação Modular	11 anos

Fonte: A Autora

3.3 COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi realizada de forma sistemática, envolvendo fontes teóricas e práticas. O processo de coleta foi dividido em duas vertentes principais: teórica e prática.

3.3.1 Teórica

A coleta de dados teóricos envolveu a seleção e organização das principais fontes bibliográficas relevantes para o tema da pesquisa. As fontes foram registradas em planilhas de Excel e organizadas em mapa mental, permitindo uma visão clara da evolução do conhecimento na área. As principais contribuições teóricas foram analisadas e utilizadas para embasar o desenvolvimento do modelo teórico proposto, bem como para estabelecer as bases das questões investigadas nas entrevistas com os profissionais do mercado.

3.3.2 Prática

A coleta de dados práticos foi realizada por meio de entrevistas com profissionais do mercado, conduzidas por videoconferências e ligações telefônicas. As entrevistas permitiram uma validação empírica do estudo teórico que havia sido feito, contribuindo para o entendimento do assunto no contexto prático levando questões como os desafios enfrentados pelas empresas, as estratégias de customização, os níveis de pré-fabricação, a logística envolvida e as dificuldades logísticas, fiscais e de fornecimento. Essas contribuições ajudaram a refinar o entendimento sobre o processo de produção modular e a adaptação do modelo proposto para um cenário mais abrangente de atuação em diferentes níveis de pré-fabricação modular, não apenas o contexto de produção modular volumétrica 3D.

3.4 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

A análise dos dados foi conduzida em duas fases complementares, integrando as informações teóricas e práticas para construir e refinar o modelo proposto. Inicialmente, os dados teóricos foram analisados para fundamentar o desenvolvimento de um modelo teórico de organização da produção modular. Este modelo foi elaborado com base nas principais perguntas a serem respondidas para caracterizar a produção e a literatura especializada no assunto, conforme será detalhado no Capítulo 4.1. Modelo Teórico.

Na sequência, os dados práticos obtidos nas entrevistas com profissionais do mercado foram examinados qualitativamente, com o objetivo de identificar padrões, *insights* e contribuições significativas. A análise se concentrou nas estratégias de produção, customização e logística, além de considerações específicas sobre a relação entre linha de produto e linha de componente. Essas análises permitiram compreender as interações entre diferentes níveis de pré-fabricação e os desafios enfrentados pelas empresas em seus contextos operacionais.

A partir das análises formulou-se um modelo ampliado, que integra a interação entre linhas de produto e componentes dentro de um contexto de fabricação *off-site*. Esse modelo considera algumas especificidades do mercado brasileiro tratadas nas entrevistas com profissionais e destaca as escolhas estratégicas necessárias para a organização eficiente da produção modular, conforme será apresentado no Capítulo 4.3. Proposta de Modelo Final.

3.5 ESCRITA DE RESULTADOS E CONCLUSÕES

A escrita dos resultados e conclusões envolveu a integração dos dados teóricos e práticos, a partir da elaboração do modelo final. Esse modelo foi estruturado para categorizar as etapas da produção modular, considerando os diferentes níveis de pré-fabricação e as estratégias de customização adotadas pelas empresas. As conclusões foram baseadas na comparação entre a teoria e as contribuições dos profissionais do mercado, proporcionando uma análise crítica dos desafios e das oportunidades para a adoção da construção modular no Brasil. Além disso, foram discutidas as implicações do modelo para as empresas do setor *off-site*, com foco na melhoria das estratégias de produção, logística e relacionamento com fornecedores.

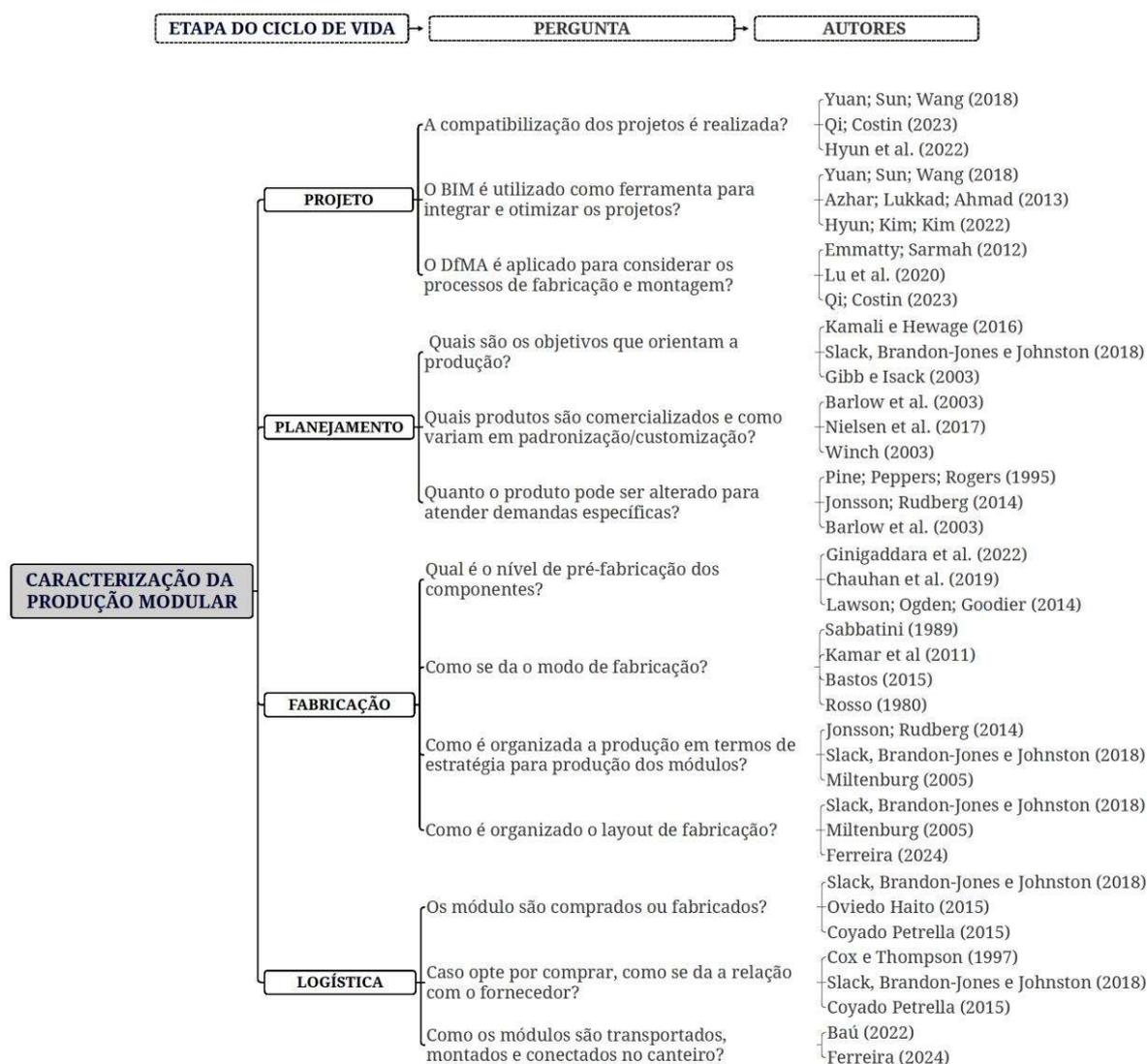
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os principais resultados da pesquisa, divididos em três partes: **1)** modelo teórico elaborado a partir das escolhas no processo organizacional da produção modular; **2)** entrevista com especialistas do mercado; **3)** modelo final para caracterizar a produção modular em ambientes fabris.

4.1 MODELO TEÓRICO

Para identificar as principais escolhas no processo organizacional da produção modular, foram levantadas questões a partir das etapas do ciclo de vida da construção modular abordadas neste trabalho: projeto, planejamento, fabricação e logística. Essas perguntas, representadas na Figura 31, fornecem um direcionamento inicial para a compreensão da organização da produção modular.

Figura 31 - Etapas e perguntas relacionadas ao ciclo de vida da construção modular



Fonte: A Autora

Com base na revisão de literatura, foram identificados autores relevantes que fundamentam as respostas a essas perguntas, fornecendo subsídios para a elaboração do primeiro modelo teórico. Esse modelo busca oferecer opções para caracterizar a organização de uma empresa modular ou de elementos modulares, conforme ilustrado na Figura 32.

Figura 32 - Modelo Teórico proposto para caracterização da produção modular.

ASPECTOS DO NEGÓCIO	
CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA	A. Aulora <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div>HOSPITALAR</div> <div>FRANQUIAS</div> <div>COMERCIAL</div> <div>RESIDENCIAL</div> <div>GOVERNAMENTAL</div> <div>HABITAÇÃO DE INTERESSE POPULAR</div> </div>
VOLUME DE PRODUÇÃO	Ferreira (2024) <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div>BAIXO (1 módulo por dia)</div> <div>MÉDIO (Entre 2 e 3 módulos por dia)</div> <div>ALTO (Mais de 4 módulos por dia)</div> </div>
CICLO DE VIDA	Falader (2022) <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div>PLANEJAMENTO</div> <div>PROJETO</div> <div>FABRICAÇÃO</div> <div>LOGÍSTICA</div> <div>MONTAGEM IN LOCO</div> <div>MANUTENÇÃO E PÓS ENTREGA</div> </div>
PROJETO	
COMPATIBILIZAÇÃO BIM E DTM	Yuan, Sun, Wang (2019) <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div>COMPATIBILIZAÇÃO DOS PROJETOS</div> <div>BIM</div> <div>DTM</div> </div>
PLANEJAMENTO	
OBJETIVO DE PRODUÇÃO DOS MÓDULOS	A. Aulora <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div>EFICIÊNCIA E PRODUTIVIDADE</div> <div>DESEMPENHO E QUALIDADE</div> <div>FLEXIBILIDADE E INOVAÇÃO</div> <div>CUSTO</div> <div>SUSTENTABILIDADE</div> <div>ESCALA DE PRODUÇÃO</div> </div>
CATÁLOGO DE MÓDULOS COMERCIALIZADOS	A. Aulora <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div>MÓDULO 1 A B C</div> <div>MÓDULO 2 A B C</div> <div>MÓDULO 3 A B C</div> </div>
GRANDE PADRONIZAÇÃO DOS ELEMENTOS DOS MÓDULOS	A. Aulora <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div>DIMENSÕES PADRONIZADAS</div> <div>ESTRUTURA PADRONIZADA</div> <div>INSTALAÇÕES PADRONIZADA</div> <div>ENVELOPE PADRONIZADO</div> <div>REVESTIMENTO PADRONIZADA</div> </div>
ESTRATÉGIA DE PADRONIZAÇÃO DOS MÓDULOS	Barrow et al. (2003) <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div>PADRONIZAÇÃO PURA</div> <div>PADRONIZAÇÃO SEGMENTADA</div> <div>PADRONIZAÇÃO CUSTOMIZADA</div> <div>PADRONIZAÇÃO SOB MEDIDA</div> <div>CUSTOMIZAÇÃO PURA</div> </div>
ESTRATÉGIA DE FUNÇÃO DA COOP	Winkel (2003) <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div>CONCEPT TO ORDER</div> <div>DESIGN TO ORDER</div> <div>MAKE TO ORDER</div> <div>MAKE TO FORECAST</div> </div>
FABRICAÇÃO	
NÍVEL DE PRE FABRICAÇÃO DOS SUBSISTEMAS CONSTRUTIVOS	A. Aulora <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div>ESTRUTURA 0 1 2 3 4 5</div> <div>SISTEMA HIDROSSANITÁRIO 0 1 2 3 4 5</div> <div>SISTEMA ELÉTRICO 0 1 2 3 4 5</div> <div>VEDAÇÕES INTERNAS 0 1 2 3 4 5</div> <div>VEDAÇÕES EXTERNAS/FACHADA 0 1 2 3 4 5</div> </div>
MODO DE FABRICAÇÃO	Sabbatini (1989), Kaim et al. (2011) <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div>TRADICIONAL</div> <div>RACIONALIZADO</div> <div>INDUSTRIALIZADO CLÁSSICO AUTOMATIZADO ROBOTIZADO AUTÔNOMO</div> </div>
ESTRATÉGIA DE PRODUÇÃO DOS MÓDULOS	Jonsson, Rudberg (2014) <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div>JOBING</div> <div>LINHA DE FLUXO</div> <div>FLUXO CONTÍNUO</div> <div>FLEXÍVEL DE MANUFATURA</div> <div>LOTES</div> </div>
LAYOUT DE FABRICAÇÃO DOS MÓDULOS	Siek, Bjarngard-Jorgensen, Johnson (2016) <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div>POSICIONAL</div> <div>FUNCIONAL</div> <div>CELULAR</div> <div>EM LINHA</div> </div>
LOGÍSTICA	
ESTRATÉGIA DE ABASTECIMENTO DOS MÓDULOS E/OU SUAS PARTES	A. Aulora <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div>TERCERIZAÇÃO DA PRODUÇÃO</div> <div>HÍBRIDO</div> <div>PRODUÇÃO PRÓPRIA</div> </div>
ESTRATÉGIA DE RELACIONAMENTO COM FORNECEDOR	Cox e Thompson (1997) <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div>RELACIONAMENTO ADVERSARIAL</div> <div>ALIANÇAS ESTRATÉGICAS</div> <div>FORNECEDOR PREFERENCIAL</div> <div>FONTE ÚNICA</div> <div>FONTE EM REDE</div> </div>
MODO DE TRANSPORTE DOS MÓDULOS	Ebau (2022) <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div>TRANSPORTE RODOVIÁRIO HIDROVIÁRIO</div> <div>ICAMENTO E POSICIONAMENTO GRUA CAMINHA MUNCK GUINDASTE</div> </div>

Fonte: A autora

O modelo é estruturado em cinco etapas principais: **1) Aspectos do Negócio; 2) Projeto; 3) Planejamento; 4) Fabricação; e 5) Logística.** Cada etapa é composta por tópicos centrais que categorizam a organização da produção, detalhados a seguir:

- **Aspectos do Negócio:** Esta etapa avalia a segmentação da empresa quanto ao nicho de atuação, volume de produção e abrangência no ciclo de vida. Etapas do ciclo de vida que não são realizadas pela empresa desativam colunas correspondentes, como no caso de uma empresa que terceiriza a fabricação de módulos, desativam-se as colunas referentes a essa etapa. O volume de produção é classificado em três níveis — baixo, médio e alto — conforme classificado por Ferreira (2024) no Quadro 11.

Quadro 11 - Parâmetros para identificação do volume de produção.

Produtividade	Sistema de produção	Volume de produção
1 módulo por dia - 1 a 250 módulos por ano	<i>jobbing</i>	baixo
Entre 2 e 3 módulos por dia – 251 a 1000 módulos por ano	em lotes	médio
Mais de 4 módulos por dia – mais de 1001 módulos por ano	linha de fluxo	alto

Fonte: Ferreira 2024

- **Projeto:** Essa etapa investiga a compatibilização dos projetos, o uso de ferramentas como BIM e DfMA. Devido às limitações desta pesquisa, essa etapa é explorada de forma sucinta, sem aprofundamento nos aspectos técnicos.
- **Planejamento:** Abrange decisões estratégicas relacionadas ao objetivo de produção e à definição dos produtos oferecidos. Essa etapa caracteriza os produtos comercializados e as padronizações/customizações em resposta às demandas do mercado. As estratégias de padronização e produção estão alinhadas à CODP (*Customer Order Decoupling Point*), como descrito na revisão de literatura.
- **Fabricação:** Esta etapa abrange o processo de fabricação, classificando os subsistemas construtivos — Estrutura, Sistema Hidrossanitário, Sistema Elétrico, Vedações Internas, Vedações Externas e Fachadas — em seis níveis de pré-fabricação, apresentados no Quadro 12. Esses níveis variam desde o material bruto (nível zero) até módulos volumétricos (nível cinco). O nível seis, por sua vez, não se aplica a subsistemas isolados, pois refere-se à conexão entre diferentes subsistemas para formar a edificação completa.

Quadro 12 - Classificação dos níveis de pré-fabricação.

NÍVEIS DE PRÉ-FABRICAÇÃO							
	NÍVEL 0	NÍVEL 1	NÍVEL 2	NÍVEL 3	NÍVEL 4	NÍVEL 5	NÍVEL 6
	MATERIAL BRUTO	COMPONENTES LINEARES	COMPONENTES 2D	ELEMENTOS 3D	PAINELIZADOS (2D)	MÓDULOS VOLUMÉTRICOS (3D)	EDIFICAÇÕES MODULARES
EXEMPLO	Madeira em toras, barras de aço, cimento, areia, brita.	Perfis metálicos, cabos elétricos, tubos de PVC, elementos individuais para instalações hidráulicas.	Painéis com isolamento térmico, kits de instalação de portas, placas de drywall com acabamento.	Chassi metálico para estruturas, chassi com sistemas de vedação integrados, caixas d'água moldadas.	Fachadas completas, lajes de cobertura pré-moldadas, painéis de piso com acabamento integrado.	Banheiros modulares pré-fabricados com tubulações, louças e acabamentos.	Casas ou edificações modulares prontas para instalação.

Fonte: A Autora

Além disso, avalia-se o modo de fabricação, que pode ser tradicional, racionalizado ou industrializado. O modo industrializado é subdividido em quatro categorias tecnológicas: Mecanizado, Automatizado, Robotizado e Autônomo. As três primeiras categorias são descritas por Kamar et al. (2011) com base em Richard (2005), enquanto a última está associada às tecnologias emergentes da Construção 4.0, como sistemas autônomos inteligentes que utilizam sensores e Internet das Coisas (Zimmermann, 2022).

Por fim, essa etapa também inclui a análise das estratégias de produção e dos layouts de fabricação, classificações que compõem o modelo.

- **Logística:** Analisa a decisão entre terceirização ou produção interna dos módulos e/ou seus componentes. No caso da terceirização, aspectos como relacionamento com fornecedores e governança são fundamentais, conforme explorado na literatura (Oviedo Haito, 2015). Para simplificar, a análise neste trabalho concentra-se na escolha entre produção própria e terceirizada e no tipo de relacionamento estabelecido com os fornecedores. Por fim, a etapa logística também aborda o transporte e a conexão dos módulos no local da obra, destacando a importância de estratégias bem estruturadas para garantir a eficiência e a integração da cadeia de suprimentos, como enfatizado por Coyado Petrella (2016).

Este modelo teórico contribui para esclarecer a complexidade das decisões envolvidas na organização da produção modular e *off-site*, abrangendo desde a segmentação de mercado e compatibilização de projetos até a definição das estratégias de produção, o nível de pré-fabricação e a gestão logística, que requerem a integração de múltiplos fatores técnicos, operacionais e estratégicos.

4.2 ENTREVISTA COM ESPECIALISTAS DO MERCADO

Dado o caráter teórico do modelo proposto e sua forte aplicação prática, julgou-se necessário entrevistar profissionais atuantes no mercado. O objetivo foi enriquecer os conhecimentos teóricos adquiridos, compreender o tema sob a perspectiva prática e aproximar os conceitos acadêmicos da realidade vivenciada no setor. Foram entrevistados três profissionais, como descrito no Capítulo 3 (Metodologia). A seguir, apresentam-se os principais comentários e contribuições dos entrevistados.

4.2.1 Entrevistado A

O Entrevistado A destacou a relevância do modelo de categorização da organização da produção como ferramenta para mapear os objetivos específicos de diferentes abordagens de atuação. Segundo ele, as estratégias variam conforme o nicho de mercado em que a empresa opera, e não há uma solução universal aplicável a todos os contextos.

Um ponto enfatizado foi a diferenciação entre as linhas de produto e de componentes. O entrevistado explicou que a linha de produção converge para o produto final, exemplificando com linhas separadas para paredes e painéis de lajes que se integram em uma linha final de módulos. Essas linhas, segundo ele, são abastecidas por células autônomas que entregam produtos semiacabados diretamente na linha principal, onde ocorre apenas a fixação final. Ele também ressaltou que o ponto de desacoplamento pode variar entre a linha de componentes e a linha de produtos, dependendo das características específicas de cada linha e do fluxo produtivo. Essa diferenciação é importante para alinhar a flexibilidade da produção às demandas do cliente.

O conceito de células, no modelo, é associado ao layout de fabricação, mas o entrevistado ampliou essa visão, associando-as a atividades especializadas que abastecem a linha principal, funcionando como a “espinha dorsal” da produção. Ele acrescentou que, em sua operação fabril, a linha principal é gerida por um sistema de *takt time*, que retroalimenta as ordens de produção das estações preparatórias. Para otimizar o fluxo de materiais, são adotadas estratégias de abastecimento, garantindo o abastecimento eficiente das linhas.

Outro ponto relevante foi a observação sobre o conceito de *setup múltiplo*, onde uma empresa pode utilizar diferentes layouts de fabricação em um mesmo arranjo produtivo. Ele exemplificou: “*Se uma empresa não adquire chicotes elétricos ou hidráulicos prontos e os produz internamente, pode operar com uma célula de produção específica para esses itens. Essa célula pode abastecer uma linha de produção de paredes, que, por sua vez, converge para módulos em um arranjo posicional.*” Apesar de incomum no Brasil, o entrevistado afirmou ter presenciado cenários como este em algumas situações.

Com relação ao conceito de industrialização, o entrevistado criticou a associação direta ao nível de automação. Ele argumentou que a industrialização está mais relacionada à eficiência dos processos do que à automação propriamente dita, afirmando que “*dependendo do tipo de operação, a automação pode não ser viável, mas isso não significa que o processo seja menos industrializado*”.

Sobre a logística de transporte, o entrevistado destacou que a distância é um fator determinante no nível de finalização dos módulos ao saírem da fábrica, devido a barreiras como a altura de meio-fio ou obstáculos no trajeto. Ele apontou que, em muitos casos, opta-se por dividir os módulos em partes menores para facilitar o transporte e o encaixe posterior no canteiro. O entrevistado também ressaltou a importância de considerar estratégias de transporte multimodal em vez de um modal único, como o hidroviário, que pode ser mais viável apenas em longas distâncias e muitas vezes utilizado em conjunto com o rodoviário, modal mais comum.

O volume de produção e a escalabilidade foram identificados como fatores determinantes. O entrevistado destacou que empresas de menor porte e com baixa demanda

conseguem abarcar maior escopo em instalações menores, enquanto empresas com alta demanda precisam de parques fabris robustos para internalizar os processos necessários. Ele apontou a painelização como uma solução eficiente para produção em larga escala, permitindo canteiros de obras mais enxutos e, em alguns casos, viabilizando linhas de produção no próprio canteiro, especialmente em locais de difícil acesso onde o transporte de módulos volumosos seria inviável.

Por fim, o entrevistado abordou os desafios da terceirização, destacando que a compatibilização do projeto com fornecedores externos pode ser extremamente complexa, especialmente em sistemas construtivos proprietários. Ele relatou uma experiência em que, devido às especificidades do projeto, a terceirização de chicotes elétricos não foi viável. *“As empresas que forneciam esses componentes não atendiam às nossas exigências. Diante disso, optamos por verticalizar a produção internamente, com base no princípio do DFMA (Design for Manufacturing and Assembly), eliminando o número de partes e montagens em campo”*. Essa decisão permitiu maior controle produtivo e superou os gargalos impostos pela terceirização.

Além disso, o entrevistado destacou que a aplicação prática do modelo proposto pode ser uma ferramenta para identificar padrões organizacionais e produtivos no setor. Ele argumentou que a identificação de padrões, por meio da aplicação do modelo, pode revelar estratégias eficientes e gargalos produtivos, contribuindo para o desenvolvimento do setor *off-site* e modular.

De modo geral, o Entrevistado A reforçou a importância de alinhar estratégias de produção às demandas específicas de cada operação, destacando a flexibilidade do modelo proposto para contemplar diferentes configurações produtivas.

A entrevista com o Profissional A esclareceu conceitos como a diferença entre linha de produto e linha de componentes, além de destacar a flexibilidade nos arranjos produtivos, incluindo o *setup múltiplo*. A crítica ao conceito de industrialização e os desafios da terceirização reforçaram a importância de alinhar processos e estratégias à realidade prática, contribuindo para refinar o modelo teórico proposto.

4.2.2 Entrevistado B

O Entrevistado B ressaltou a importância de segmentar o modelo por nichos de atuação, destacando que as demandas, processos e níveis de industrialização variam consideravelmente entre os diferentes segmentos de mercado. Ele concorda que essa segmentação é crucial para contextualizar e estruturar os dados e insights do modelo de construção modular. No caso de sua operação, focada no nicho residencial, ele atualmente adota a terceirização da produção de módulos volumétricos. Segundo o entrevistado, essa escolha é justificada pela viabilidade financeira, pelo fluxo de caixa e pelas limitações de espaço fabril.

O entrevistado observou também o crescente movimento de incorporação de elementos industrializados por construtoras tradicionais no Brasil. Ele citou, como exemplo, a utilização de módulos de banheiros, kits elétricos e sistemas de vedação externa, práticas que contribuem para a industrialização da construção no canteiro de obras e que podem reduzir o tempo de execução. Ele ainda afirmou que, embora os sistemas de produção de algumas dessas empresas

ainda não sejam totalmente avançados, a adoção de componentes pré-fabricados já representa um diferencial competitivo.

O Entrevistado B também comentou sobre a consideração de módulos 2D, como painéis, que poderiam ser classificados como módulos, desde que apresentem um alto grau de terminalidade. Ou seja, se esses elementos forem produzidos quase integralmente fora do canteiro de obras e transportados para a obra com alto nível de finalização, eles podem ser considerados como módulos 2D, conforme discutido alguns autores na revisão de literatura do trabalho.

O Entrevistado B argumentou sobre a importância da segmentação do cliente, enfatizando que a forma de industrialização varia significativamente dependendo do tipo de cliente (governo ou construtora). Por exemplo, para clientes públicos (como o governo), pode ser necessário um modelo de industrialização fechado, com processos mais centralizados, enquanto no caso de clientes privados, como as construtoras, a abordagem pode ser mais aberta e exigir uma coordenação maior entre os diferentes produtos industrializados. Isso afeta diretamente as estratégias de produção, incluindo a logística e a forma de abordagem do processo.

Sobre a evolução da industrialização, o Entrevistado B propôs uma abordagem gradual, dividida em três etapas: (1) padronização dos processos, (2) escalabilidade da produção e (3) automação seguida de robotização. Ele destacou que a adoção de tecnologias como automação e robotização só é viável quando o volume de produção justifique o investimento. Segundo ele, "*ninguém inicia uma operação modular já automatizada ou robotizada*", o que reforça a necessidade de amadurecimento operacional antes de implementar tecnologias mais avançadas.

O Entrevistado B reforçou a importância da segmentação por nicho e a adoção gradual da industrialização na construção, apontando que a robotização e automação são etapas posteriores ao aumento da escala produtiva. Também destacou a integração de elementos pré-fabricados em construtoras tradicionais como um passo relevante para o avanço da industrialização no setor.

4.2.3 Entrevistado C

O Entrevistado C atua na venda de chassis metálicos e terceiriza a fabricação em empresas especializadas em metalurgia. Ele abordou as dificuldades para viabilizar a produção modular no Brasil, destacando as barreiras significativas para a fabricação de módulos volumétricos 3D. Ele aponta que o mercado brasileiro enfrenta obstáculos, como a logística de transporte, custos elevados e questões fiscais e políticas que dificultam a implementação da construção modular de forma integral.

O entrevistado também observou um aumento substancial na demanda por construção modular após a pandemia, especialmente impulsionado pela necessidade emergencial de hospitais. Esse "boom" no setor resultou em um período de altos investimentos em soluções modulares. No entanto, ele destaca que esses investimentos não se mantiveram, e o setor

enfrentou uma retração após o pico da pandemia, o que gerou um impacto negativo na continuidade do crescimento da construção modular no país.

O entrevistado C atualmente atua com a venda de chassis metálicos terceirizando a fabricação em empresas especializadas em metalurgia. O entrevistado aborda os desafios para fabricação modular no contexto brasileiro e afirmou que há uma confusão de conceitos quando a definição de módulo.

Ele também argumenta quanto a falta de uniformidade na definição do conceito de "módulo" no Brasil. Criticou a tendência de confundir o conceito de módulos volumétricos 3D com a ideia de componentes ou sistemas pré-fabricados, um ponto que se alinha com a definição adotada por alguns especialistas internacionais, como Ginigaddara *et al.* (2022), e em sua experiência no Japão.

O Entrevistado C destacou as barreiras para a produção de módulos volumétricos 3D no Brasil, como questões logísticas e fiscais, além da queda no setor após o "boom" impulsionado pela pandemia. Ele também criticou a falta de clareza na definição de módulos no país e enfatizou a diferença entre os módulos volumétricos 3D e outros componentes pré-fabricados. Além disso, corroborou a visão do Entrevistado B sobre a tendência de industrialização na construção tradicional, com a crescente adoção de partes pré-fabricadas.

4.2.4. Entrevistado D

O Entrevistado D, destacou o valor do modelo proposto como uma ferramenta essencial para a análise de negócios e novos empreendimentos. Segundo ele, o trabalho ajuda a resumir os principais aspectos organizacionais e permite uma visão inicial clara do sistema modular, facilitando o entendimento para novos entrantes na área.

Em relação à logística, o entrevistado ressaltou as barreiras enfrentadas, como a dependência das rodovias, limitações em altura de viadutos, perdas de espaço em decorrência da recapagem do asfalto e os custos elevados com transporte especializado, incluindo automóveis rebaixados. A distância foi apontada como um fator determinante, sendo fundamental considerar o raio de atuação da fábrica na etapa de viabilidade do projeto. Quando o transporte excede o raio logístico, pode ser necessário reposicionar a fábrica ou adequar vias para viabilizar o deslocamento dos módulos, o que impacta diretamente nos custos e no prazo de entrega. O entrevistado também mencionou a possibilidade de uso do transporte hidroviário, eficiente em alguns contextos, mas limitado pela disponibilidade de infraestrutura adequada. Sendo uma crítica ao modelo a ausência da verificação quando ao raio de atuação no transporte logístico.

O Entrevistado D chamou atenção para os processos de qualidade e montagem. Ele enfatizou a importância da pré-montagem dos módulos na fábrica para identificar e mitigar inconsistências antes da entrega, propondo a execução de unidades-piloto como parte da gestão da qualidade. Além disso, ressaltou que a industrialização deve evitar replicar os erros da construção tradicional, uma vez que seu propósito central é a otimização dos processos e a melhoria da eficiência da produção. O entrevistado ainda destacou que, em obras de maior escala e complexidade, o volume de etapas executadas no canteiro tende a aumentar,

equilibrando a proporção entre produção fabril e montagem in loco, o que diminui o percentual de *off-site* no processo.

Sobre padronização e customização, o entrevistado apontou que a cultura brasileira de valorização do cliente sobre a customização é uma barreira significativa para a implementação de produtos padronizados ou "de prateleira". Ele afirmou que a falta de demanda por produtos padronizados impede o avanço de uma maior escala de produção, afetando a competitividade e a industrialização do setor.

Por fim, o entrevistado fez uma observação relevante sobre a sustentabilidade no uso de sistemas modulares, questionando o descarte de materiais como drywall e gesso, que possuem um elevado custo de destinação devido ao seu potencial poluente. Esse ponto deve ser considerado como uma recomendação para estudos futuros, com foco em investigar alternativas para a destinação adequada desses materiais e estratégias para reduzir os impactos ambientais associados ao sistema.

4.2.5 Principais Contribuições

As entrevistas realizadas com os especialistas proporcionaram importantes contribuições para o entendimento da organização da produção modular, além de enriquecer a análise teórica desenvolvida ao longo deste trabalho. A seguir, são apresentadas as principais contribuições identificadas nas entrevistas:

- **Definição de linha de produto e linha de componentes:** Os entrevistados destacaram a necessidade de diferenciar a linha de produto e a linha de componentes, pois essas podem ter características de layout produtivo e estratégia de produção distintas, dependendo das necessidades específicas de cada tipo de módulo e de sua aplicação (Entrevistado A).
- **Conceito de industrialização:** A industrialização foi discutida como um processo gradual e contínuo, em que a automação e robotização não são pontos de partida, mas sim estágios avançados que dependem da escala de produção. Tanto o Entrevistado A quanto o Entrevistado B concordaram que a industrialização deve ser vista como um processo em evolução, com etapas de padronização, escala e, eventualmente, a implementação de tecnologias mais avançadas. O Entrevistado D complementou essa visão, ressaltando a importância da gestão da qualidade durante o processo fabril, enfatizando que replicar os erros da construção tradicional contraria os princípios da industrialização.
- **Definição de módulo:** Não existe um consenso entre os entrevistados sobre a definição de módulo no contexto da construção modular. O Entrevistado B defende que módulos 2D podem ser considerados módulos desde que apresentem alto grau de terminalidade, destacando sua viabilidade para integração no canteiro devido às barreiras logísticas. O Entrevistado A complementa, mencionando que limitações logísticas, como altura de viadutos e recapagem de asfalto, frequentemente levam

empresas a optar pelo transporte de módulos 2D, que são montados no canteiro como solução intermediária. Em contrapartida, o Entrevistado C argumenta que apenas módulos volumétricos 3D devem ser classificados como tais, devido ao maior nível de industrialização e beneficiamento ao sair da fábrica.

- **Logística e transporte:** Os entrevistados identificaram a logística como uma das principais barreiras para a expansão da construção modular no Brasil. O Entrevistado D destacou a dependência de rodovias e as barreiras relacionadas ao transporte especializado, que variam conforme a distância, como desafios significativos. Ele também apontou que limitações logísticas, como o peso e as vibrações durante o transporte, podem causar patologias nos módulos, comprometendo sua integridade estrutural. O Entrevistado A ressaltou a necessidade de um planejamento logístico detalhado, enquanto o Entrevistado C enfatizou a importância de posicionar fábricas próximas aos canteiros de obras para reduzir os desafios logísticos e os custos financeiros associados.
- **Adoção de componentes pré-fabricados na indústria da construção:** Todos os entrevistados concordaram com a crescente adoção de componentes pré-fabricados, mesmo por construtoras tradicionais, como forma de incorporar elementos modulares em canteiros de obras e acelerar os processos de construção. Isso reflete uma mudança nas práticas da construção tradicional, alinhada com a tendência de industrialização do setor (Entrevistado A, B, C e D).
- **Padronização e customização:** O Entrevistado D destacou a dificuldade das empresas brasileiras em implementar produtos padronizados devido à cultura do consumidor, que valoriza a customização e resiste a produtos “de prateleira”. Essa resistência impacta diretamente a escalabilidade e os ganhos de eficiência associados à padronização.
- **Barreiras à implementação da produção modular volumétrica 3D:** Todos os entrevistados identificaram barreiras significativas para a implementação da produção modular volumétrica 3D no Brasil, especialmente em relação ao fornecimento especializado, transporte, logística, além de questões burocráticas, financeiras e políticas que dificultam o avanço dessa tecnologia no país. O Entrevistado D também apontou que a proporção de etapas realizadas no canteiro aumenta em projetos de maior escala, diminuindo a eficácia do sistema *off-site*. (Entrevistados A, B e C).

Essas contribuições reforçam a complexidade do setor da construção *off-site* e modular no Brasil, destacando as diferenças entre os tipos de produção e os desafios que precisam ser enfrentados para ampliar a aplicação dessa tecnologia de forma eficiente e viável.

4.3 PROPOSTA DE MODELO FINAL

A partir das entrevistas realizadas e da análise comparativa com o modelo teórico inicialmente proposto, identificou-se a necessidade de diferenciar as linhas de produto e linhas de componentes no processo de fabricação modular. Além disso, ficou evidente que o modelo não deveria se restringir apenas à produção de módulos volumétricos 3D, mas também abranger

outros tipos de produção off-site, como painéis, fachadas panelizadas e chassis metálicos. Essa ampliação torna o modelo aplicável a uma diversidade maior de empresas do setor da construção off-site, conforme ilustrado na Figura 33.

Figura 33 – Esquema que ilustra Linha de Produto e Linha de Componentes.



Fonte: A Autora

A Figura 33 destaca como as linhas de componentes operam de maneira independente, porém integradas à linha de produto. Essa integração pode ocorrer em dois contextos: no ambiente fabril, por meio da montagem dos componentes, ou no local da obra, dependendo das barreiras logísticas e de transporte. Adicionalmente, é importante destacar que, no nível de linhas de produto e de componente, o ponto de desacoplamento pode ser diferente. Isso ocorre devido às especificidades da linha de componente e produto, onde o ponto de desacoplamento se alinha com a necessidade de customização ou padronização de cada um. Essa distinção permite compreender as diferentes abordagens e estratégias adotadas pelas empresas para atender às necessidades específicas de seus projetos.

Com base nessas observações, foi desenvolvido um modelo final para categorizar a organização da produção, considerando as decisões estratégicas associadas a cada etapa do ciclo de vida: projeto, planejamento, fabricação e logística. Este modelo visa estruturar e caracterizar as operações de empresas de construção modular e off-site, oferecendo uma ferramenta prática para entrevistas e análises organizacionais. Para facilitar sua compreensão, o modelo se apresenta por etapas, com a versão completa disponibilizada no Apêndice A.

4.3.1 Apresentação por Etapas do Modelo

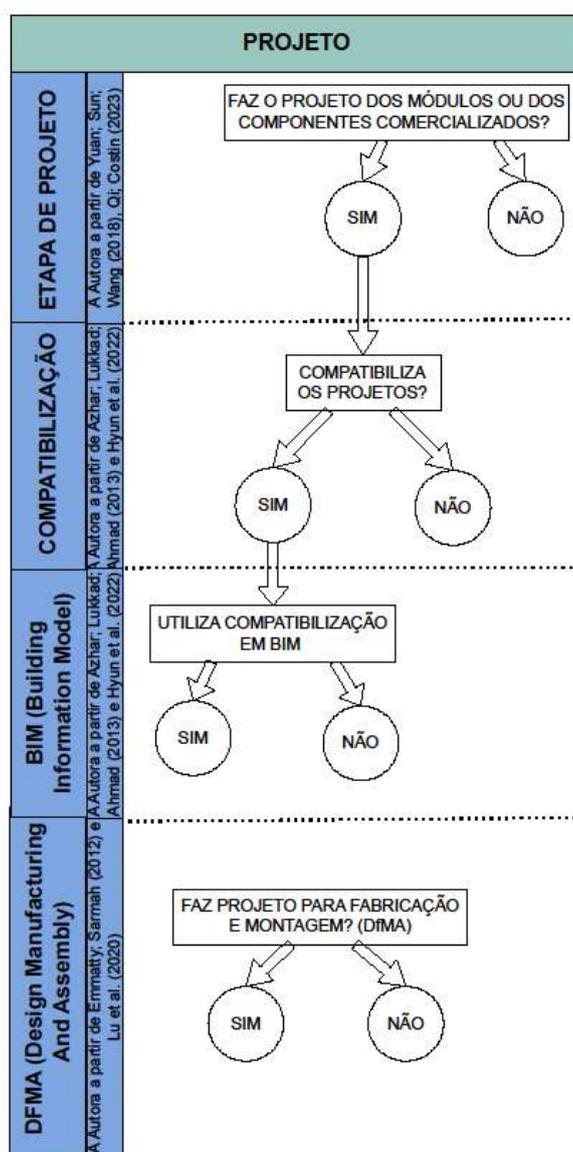
O modelo é dividido em quatro partes dadas em colunas, cada uma correspondendo a uma etapa do ciclo de vida. Cada etapa é organizada em linhas que representam categorias de

análise, e as perguntas associadas são acompanhadas por opções de resposta fechadas ou tabelas comparativas, permitindo uma caracterização objetiva e padronizada da produção.

4.3.1.1 Projeto

A etapa de projeto foca na análise inicial, avaliando a compatibilização dos projetos, o uso de tecnologias como BIM e o DfMA. As perguntas direcionadoras são respondidas de forma objetiva, com opções como "sim" ou "não", facilitando o mapeamento das práticas adotadas pela empresa. A Figura 34 ilustra essa etapa.

Figura 34 - Etapa de Projeto



Fonte: A Autora

4.3.1.2 Planejamento

A etapa de planejamento do modelo, apresentada na Figura 35 , inicia com a definição do nicho de utilização do produto (hospitalar, residencial, etc.) e os objetivos de produção (como eficiência, custo ou escala). Em seguida, a linha de produto é classificada em seis níveis de pré-fabricação, que vão de componentes básicos (nível 1) a edificações modulares completas (nível 6).

Se a empresa possuir um catálogo de produtos, ou seja, opções pré-definidas dos produtos a serem fabricados, são identificados os tipos comercializados e avaliadas as opções de padronização e customização das partes que compõem o produto, divididas em categorias como estrutura, instalações, vedações e acabamentos. A partir dessas informações, é definida uma trilha estratégica que orienta a escolha da estratégia de padronização e produção em função da CODP.

No entanto, é importante destacar que as estratégias de padronização e produção, em função do CODP, devem ser aplicadas tanto a nível de produto quanto a nível de componente. Para cada linha de componente, as decisões estratégicas devem ser analisadas de forma específica, ou seja, traçando uma trilha estratégica para cada linha, uma vez que diferentes componentes podem exigir abordagens distintas.

Fonte: A Autora

4.3.1.3 Fabricação

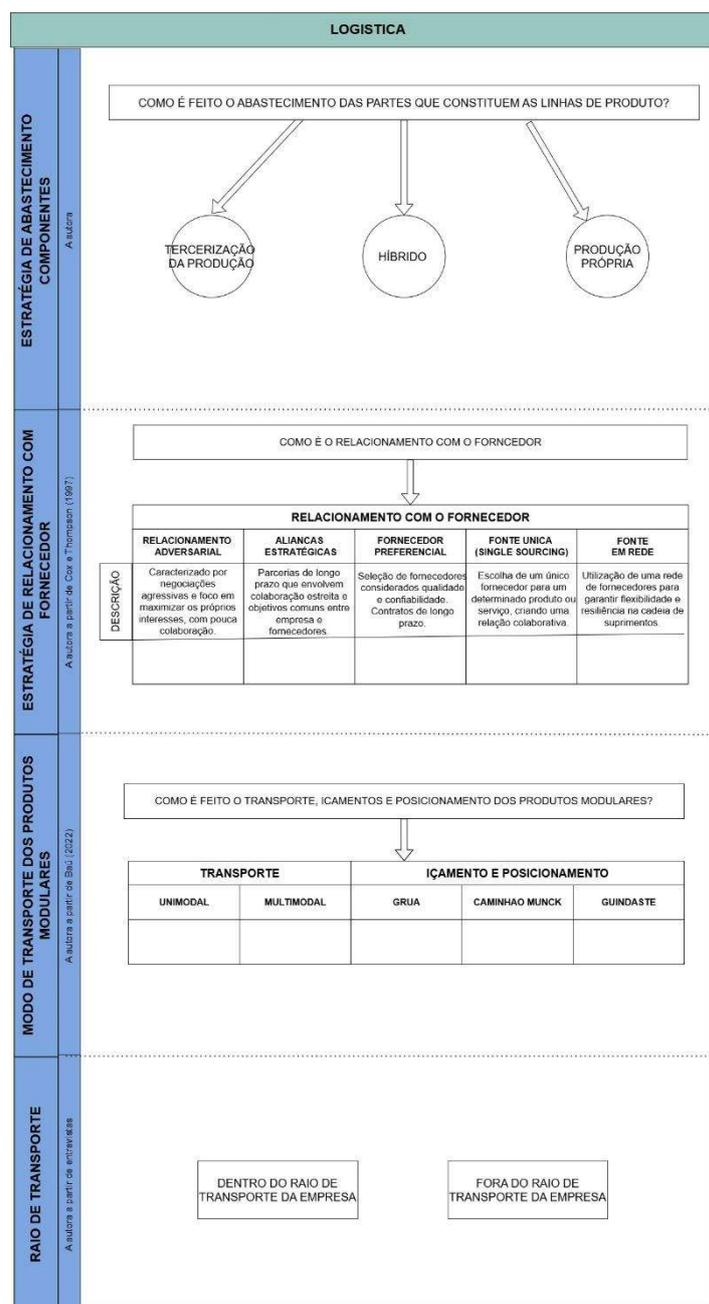
A etapa de fabricação, representada na Figura 36, aborda aspectos como o volume de produção, o nível de pré-fabricação dos componentes, e o modo de fabricação, categorizado em termos de tecnologia de fabricação e mão de obra. Essa etapa também inclui uma análise das estratégias de fabricação e do layout de produção para as linhas de produto e componentes, permitindo mapear diferentes abordagens dentro de uma mesma organização.

Conforme destacado pelo entrevistado A, é comum que empresas apresentem diferentes layouts de produção, impactando diretamente as estratégias fabris. Por tanto, este tópico investiga as estratégias adotadas na fabricação a nível de linha de produto e de componente, embora se limite aos critérios mencionados.

4.3.1.4 Logística

A última etapa, ilustrada na Figura 37, trata das decisões sobre terceirização ou produção própria. No caso de terceirização, são avaliadas as estratégias de relacionamento com fornecedores, fundamentais para garantir o sucesso das operações. Além disso, são analisados aspectos logísticos, como transporte, içamento e posicionamento dos produtos, conforme descrito no modelo teórico antes das entrevistas. Uma nova consideração incluída ao modelo é a análise do raio de transporte, diferenciando as operações dentro ou fora desse limite. Essa avaliação leva em conta a distância da fábrica ao canteiro de obras, sendo que operações fora do raio de transporte podem exigir o posicionamento de fábricas mais próximas ou ajustes significativos no planejamento logístico, como a adequação das vias e o uso de transporte especializado.

Figura 37 - Etapa de Logística



Fonte: A Autora

4.4. DISCUSSÕES

A análise dos resultados obtidos revela contribuições para o entendimento e organização da produção modular e *off-site*, destacando a complexidade e a adaptabilidade necessárias para atender às demandas do setor. O modelo final proposto categoriza a organização da produção em quatro etapas principais: projeto, planejamento, fabricação e logística, integrando teoria e prática para atender às particularidades e escolhas no processo organizacional de diferentes contextos produtivos.

O modelo propõe uma estrutura flexível que abrange desde a produção de módulos volumétricos 3D até componentes, chassis metálicos e kits pré-fabricados, abordando níveis distintos de pré-fabricação. Esse enfoque permite a caracterização de estratégias de padronização e customização de maneira flexível no modelo. O alinhamento das etapas produtivas ao ciclo de vida da construção modular e a integração das linhas de produto e componentes ampliam o escopo do modelo, tornando-o aplicável a diferentes tipos de empresas no setor da construção off-site.

As entrevistas realizadas com especialistas reforçam a validade e relevância do modelo proposto, trazendo insights práticos que complementam as bases teóricas. A diferenciação entre linha de produto e linha de componentes, apontada pelo Entrevistado A, destacou a necessidade de layouts flexíveis e estratégias específicas para diferentes configurações produtivas. Já o Entrevistado B enfatizou que a industrialização é um processo gradual, onde a automação e a robotização devem ser implementadas de forma escalonada, alinhadas ao amadurecimento operacional e ao volume de produção. O Entrevistado C, por sua vez, apontou barreiras logísticas, fiscais e políticas como desafios significativos para a adoção de módulos volumétricos no Brasil, ao mesmo tempo em que corroborou a crescente adoção de componentes pré-fabricados no mercado tradicional.

Em relação aos trabalhos existentes, este estudo traz avanços ao propor um modelo adaptável que considera diferentes contextos produtivos. Baú (2021) mapeou o processo executivo de construções modulares em chassi de aço, evidenciando a uniformidade das etapas, mas com variação nos insumos utilizados por diferentes empresas. Por outro lado, Ferreira (2024) explorou a relação entre características da produção e estratégias de customização, com foco em empresas do Reino Unido que produzem módulos volumétricos 3D, destacando a predominância da customização em massa como estratégia central.

Este estudo avança em relação a pesquisas anteriores, como as de Baú (2021) e Ferreira (2024), ao propor um modelo que não se limita a um tipo de produto modular, mas abrange diferentes níveis de pré-fabricação e estratégias de produção. Diferentemente de Ferreira (2024), que concentrou sua análise em empresas do Reino Unido e na predominância da customização em massa, este trabalho amplia o foco ao abordar também as especificidades do mercado brasileiro, como as limitações de escala produtiva e os desafios logísticos. Além disso, este estudo critica a aplicação direta de conceitos da manufatura na construção modular, destacando que, na construção, a variabilidade de projetos e a natureza do produto final tornam inviável uma abordagem puramente manufatureira. Ao explorar a coexistência de padronização e customização, o modelo proposto fornece uma base prática para que empresas possam alinhar suas operações às demandas específicas de seus clientes e mercados. Dessa forma, este estudo oferece uma contribuição ampliada ao integrar diferentes níveis de pré-fabricação e estratégias produtivas, apresentando um panorama mais flexível e adaptado às demandas e desafios do setor da construção modular e *off-site*.

Por fim, embora apresente avanços importantes, o estudo possui limitações, como a ausência de aplicação prática do modelo em empresas e o número restrito de entrevistas realizadas. Ainda assim, o modelo final contribui de forma significativa para o avanço da industrialização e do entendimento sobre a organização produtiva na construção modular, promovendo maior eficiência e competitividade no setor

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo investigar e caracterizar a organização da produção fabril em empresas de construção off-site, com foco em empresas que operam na construção modular. Para isso, utilizou-se uma abordagem qualitativa que combinou a construção de um modelo teórico, com base na literatura, e a troca de informações com profissionais especialistas no setor por meio de entrevistas. O principal resultado foi o desenvolvimento de um modelo final estruturado em quatro etapas: projeto, planejamento, fabricação e logística.

O modelo proposto categoriza as principais decisões estratégicas e operacionais ao longo do ciclo de vida da produção, integrando as linhas de produto e componentes. Ele abrange desde a compatibilização de projetos e uso de tecnologias como BIM e DfMA na etapa de projeto, até a segmentação do mercado e estratégias de customização e padronização no planejamento. Na fabricação, considera o nível de pré-fabricação, estratégias de produção e layout, enquanto a etapa de logística aborda a relação em produção própria e terceirizada, relacionamento com fornecedores e transporte.

As contribuições deste estudo incluem a proposição de um modelo prático e adaptável que organiza a produção *off-site* de forma sistemática. O trabalho avança ao integrar linhas de produto e componentes, ampliando sua aplicação para empresas que produzem não apenas módulos volumétricos 3D, mas também painéis, chassis metálicos e kits pré-fabricados. Uma contribuição significativa do modelo é sua capacidade de identificar padrões e tendências organizacionais e de produção, auxiliando no desenvolvimento de estratégias eficientes e na tomada de decisão.

Apesar disso, apresenta limitações, como o número restrito de entrevistas e a aplicação direta do modelo em empresas. Pesquisas futuras podem explorar a aplicação do modelo em contextos variados, ampliando sua validação e aprofundando a análise sobre processos produtivos, customização e logística.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este estudo abre caminho para futuras investigações que podem expandir o entendimento sobre a organização da produção modular e off-site na construção civil. As principais direções de pesquisa incluem:

1. **Aplicação Prática do Modelo:** Validar o modelo proposto em empresas de diferentes portes e setores, tanto no Brasil quanto internacionalmente, para avaliar sua eficácia em contextos variados, além de proporcionar dados comparativos relevantes para o mercado.
2. **Barreiras Logísticas e Integração da Cadeia de Suprimento:** Explorar soluções para superar os desafios logísticos e aprimorar a integração da cadeia de suprimentos, com foco em estratégias que promovam relações colaborativas entre fornecedores e fabricantes.

3. **Customização e Escalabilidade:** Investigar como equilibrar customização e escalabilidade, utilizando tecnologias como BIM e DfMA para otimizar processos produtivos e atender à demanda de personalização sem comprometer a eficiência.
4. **Políticas Públicas e Incentivos:** Estudar o impacto de políticas públicas e incentivos fiscais no estímulo à adoção da construção modular, identificando medidas que possam facilitar a industrialização do setor no Brasil.
5. **Classificação dos Modos de Produção Industrializada:** Desenvolver critérios mais abrangentes e detalhados para classificar os modos de produção industrializada. Essa análise pode ajudar a identificar lacunas e promover avanços nos processos produtivos.

Essas sugestões visam não apenas aprofundar as discussões apresentadas neste trabalho, mas também oferecer novas perspectivas para o desenvolvimento do setor de construção modular e *off-site*.

REFERÊNCIAS

ABDUL NABI, M.; EL-ADAWAY, I. H. Modular Construction: Determining Decision-Making Factors and Future Research Needs. **Journal of Management in Engineering**, v. 36, n. 6, p. 04020085, 1 nov. 2020.

ABMI. **País precisará de 30,7 milhões de novas moradias até 2030, revela estudo**. Disponível em: <<https://abmi.org.br/pais-precisara-de-307-milhoes-de-novas-moradias-ate-2030-revela-estudo/>>. Acesso em: 5 dez. 2024.

ABRAMAT. **Perfil da cadeia da construção e da indústria de materiais e equipamentos Ed. 2022**. Disponível em: <https://abramat.org.br/wp-content/uploads/2023/03/Perfil-da-Cadeia-resumo-2022_c-serie-5-anos-v2.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2023.

AZHAR, S.; LUKKAD, M. Y.; AHMAD, I. An Investigation of Critical Factors and Constraints for Selecting Modular Construction over Conventional Stick-Built Technique. **International Journal of Construction Education and Research**, v. 9, n. 3, p. 203–225, 1 jul. 2013.

BALAGUER, C. et al. FutureHome: An integrated construction automation approach. **IEEE Robotics Automation Magazine**, v. 9, n. 1, p. 55–66, mar. 2002.

BALDWIN, C. Y.; CLARK, K. B. Managing in an Age of Modularity. **Harvard Business Review**, 1 set. 1997.

BARBOSA, F. et al. **Reinventing construction: A route to higher productivity**. [s.l.] McKinsey Global Institute, 2017. Disponível em: <<https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/reinventing-construction-through-a-productivity-revolution>>. Acesso em: 8 jul. 2020.

BARLOW, J. et al. Choice and delivery in housebuilding: lessons from Japan for UK housebuilders. **Building Research & Information**, v. 31, n. 2, p. 134–145, 1 jan. 2003.

BASTOS, R. DE C. S. C. [UNESP. Da coordenação modular à construção modular: estudos de caso. **Aleph**, p. 88 f., 8 dez. 2015.

BAÚ, G. **Construções modulares: Mapeamento do processo executivo de edificações em chassi de aço**. TCC (graduação)—Florianópolis, Brasil: Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Engenharia Civil, 7 maio 2021.

BRANDENBURGER, A. M.; NALEBUFF, B. J. **Co-Opetition**. 1 edition ed. New York: Currency Doubleday, 1996.

BRYMAN, A. **Social Research Methods**. Third ed. [s.l.] Oxford University Press, 2008.

CARDOSO, F. **Stratégies d'entreprises et nouvelles formes de rationalisation de la production dans le bâtiment au Brésil et en France**. phdthesis—[s.l.] Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 29 jan. 1996.

CBIC. **CBIC revisa projeção de crescimento e construção deve crescer 1,5% em 2023**. **CBIC – Câmara Brasileira da Indústria da Construção**, 31 jul. 2023. Disponível em:

<<https://cbic.org.br/cbic-revisa-projecao-de-crescimento-e-construcao-deve-crescer-15-em-2023/>>. Acesso em: 23 nov. 2023

CHAUHAN, K. et al. **Deciding Between Prefabrication and On-Site Construction: A Choosing-by-Advantage Approach**. Em: 27TH ANNUAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION (IGLC). Dublin, Ireland: 2019. Disponível em: <<https://iglc.net/Papers/Details/1686>>. Acesso em: 28 fev. 2021

CHAUHAN, K. et al. The Monetary and Non-Monetary Impacts of Prefabrication on Construction: The Effects of Product Modularity. **Buildings**, v. 12, n. 4, p. 459, abr. 2022.

COREYNEN, W.; MATTHYSSENS, P.; GEBAUER, H. Are You Ready for Servitization? A Tool to Measure Servitization Capacity. Em: KOHTAMÄKI, M. et al. (Eds.). **Practices and Tools for Servitization: Managing Service Transition**. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 25–39.

COX, A.; THOMPSON, I. ‘Fit for purpose’ contractual relations: determining a theoretical framework for construction projects. **European Journal of Purchasing & Supply Management**, v. 3, n. 3, p. 127–135, 1 set. 1997.

COYADO PETRELLA, D. Barriers to modularity in the Brazilian construction industry and the relationship between modularity and supply chain integration. 21 dez. 2016.

DENG, P. et al. Lateral behavior of panelized CLT walls: A pushover analysis based on minimal resistance assumption. **Engineering Structures**, v. 191, p. 469–478, 15 jul. 2019.

DORAN, D.; GIANNAKIS, M. An examination of a modular supply chain: a construction sector perspective. **Supply Chain Management: An International Journal**, v. 16, n. 4, p. 260–270, 1 jan. 2011.

DURAY, R. Mass customization origins: mass or custom manufacturing? **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 3, p. 314–328, 1 jan. 2002.

EMMATY, F. J.; SARMAH, S. P. Modular product development through platform-based design and DFMA. **Journal of Engineering Design**, v. 23, n. 9, p. 696–714, 1 set. 2012.

FERREIRA, T. C. Produção e customização na construção volumétrica offsite: estudos de caso no Reino Unido. 1 abr. 2024.

FOLADOR, B. M. **Potenciais aplicações de tecnologias da Construção 4.0 em sistemas construtivos modulares em estrutura de aço**. TCC (graduação)—Florianópolis, Brasil: Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Engenharia Civil, 16 set. 2022.

GERSHENSON, J. K.; PRASAD, G. J.; ZHANG, Y. Product modularity: Definitions and benefits. **Journal of Engineering Design**, v. 14, n. 3, p. 295–313, 1 set. 2003.

GIBB, A. G. F. **Off-site Fabrication: Prefabrication, Pre-assembly and Modularisation**. [s.l.] John Wiley & Sons, 1999.

GIBB, A. G. F. Standardization and pre-assembly- distinguishing myth from reality using case study research. **Construction Management and Economics**, v. 19, n. 3, p. 307–315, 1 abr. 2001.

GIBB, A. G. F. et al. **Towards adaptable buildings: pre-configuration and re-configuration - two case studies**. [s.l.] © CIRIA, 2007.

GIBB, A.; ISACK, F. Re-engineering through pre-assembly: client expectations and drivers. **Building Research & Information**, v. 31, n. 2, p. 146–160, 1 jan. 2003.

GIBB, A.; PENDLEBURY, M. **Buildoffsite Glossary of terms**. 2nd Edition ed. London: Construction Industry Research & Information Association (CIRIA), 2006.

GINIGADDARA, B. et al. Development of an Offsite Construction Typology: A Delphi Study. **Buildings**, v. 12, n. 1, p. 20, jan. 2022.

GINIGADDARA, B.; PERERA, P. S. Typologies of offsite construction. **Proceedings of the 8th World Construction Symposium, Colombo, Sri Lanka**, 1 jan. 2019.

GOSLING, J. et al. Defining and Categorizing Modules in Building Projects: An International Perspective. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 142, n. 11, p. 04016062, 1 nov. 2016.

GRAY, C.; FLANAGAN, R. **The changing role of specialist and trade contractors**. United Kingdom: Ascot: Chartered Institute of Building (CIOB), 1989.

HASSAN, M. A. et al. Improving structural performance of timber wall panels by inexpensive FRP retrofitting techniques. **Journal of Building Engineering**, v. 27, p. 101004, 1 jan. 2020.

HITOMI, K. **Manufacturing Systems Engineering: A Unified Approach to Manufacturing Technology, Production Management and Industrial Economics**. 2. ed. London: Routledge, 1996.

HOSSAIN, A.; NADEEM, A. **Towards digitizing the construction industry: state of the art of construction 4.0**. Proc. of the International Structural Engineering and Construction. **Anais...ISEC Press**, 2019. Disponível em: <https://www.isec-society.org/ISEC_PRESS/ISEC_10/html/CON-13.xml>. Acesso em: 23 dez. 2022

HUANG, C.-C.; KUSIAK, A. Overview of Kanban systems. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 9, n. 3, p. 169–189, 1 jan. 1996.

HYUN, H. et al. Integrated Design Process for Modular Construction Projects to Reduce Rework. **Sustainability**, v. 12, n. 2, p. 530, jan. 2020.

HYUN, H.; KIM, H.-G.; KIM, J.-S. Integrated Off-Site Construction Design Process including DfMA Considerations. **Sustainability**, v. 14, n. 7, p. 4084, jan. 2022.

JENSEN, P.; LIDELÖW, H.; OLOFSSON, T. Product configuration in construction. **International Journal of Mass Customisation**, v. 5, n. 1, p. 73–92, 1 jan. 2015.

JONSSON, H.; RUDBERG, M. Classification of production systems for industrialized building: a production strategy perspective. **Construction Management and Economics**, v. 32, n. 1–2, p. 53–69, fev. 2014.

KAMALI, M.; HEWAGE, K. Life cycle performance of modular buildings: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 62, p. 1171–1183, 1 set. 2016.

KAMALI, M.; HEWAGE, K.; MILANI, A. S. Life cycle sustainability performance assessment framework for residential modular buildings: Aggregated sustainability indices. **Building and Environment**, v. 138, p. 21–41, 15 jun. 2018.

KAMAR, K. A. M. et al. Industrialized Building System (IBS): Revisiting Issues of Definition and Classification. **International journal of emerging sciences**, v. 1, n. 2, p. 120–132, 2011.

KEMPTON, J.; SYMS, P. Modern methods of construction: Implications for housing asset management in the RSL sector. **Structural Survey**, v. 27, n. 1, p. 36–45, 3 abr. 2009.

LABARAN, Y. H. et al. Carbon footprint management: A review of construction industry. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 9, p. 100531, 1 ago. 2022.

LAWSON, M.; OGDEN, R.; GOODIER, C. **Design in Modular Construction**. London: CRC Press, 2014.

LAWSON, R. M.; OGDEN, R. G.; BERGIN, R. Application of Modular Construction in High-Rise Buildings. **Journal of Architectural Engineering**, v. 18, n. 2, p. 148–154, 1 jun. 2012.

LI, X. et al. Integrating Building Information Modeling and Prefabrication Housing Production. **Automation in Construction**, v. 100, p. 46–60, 1 abr. 2019.

LOPEZ, D.; FROESE, T. M. Analysis of Costs and Benefits of Panelized and Modular Prefabricated Homes. **Procedia Engineering**, ICSDEC 2016 – Integrating Data Science, Construction and Sustainability. v. 145, p. 1291–1297, 1 jan. 2016.

LU, Q. et al. Semi-automatic geometric digital twinning for existing buildings based on images and CAD drawings. **Automation in Construction**, v. 115, p. 103183, 1 jul. 2020.

MACCARTHY, B. L.; FERNANDES, F. C. F. A multi-dimensional classification of production systems for the design and selection of production planning and control systems. **Production Planning & Control**, v. 11, n. 5, p. 481–496, 1 jan. 2000.

MILLER, T. D.; PEDERSEN, P. E. E. **Defining Modules, Modularity and Modularization: 13th Integrated Productions Systems Research Seminar (IPS'98)**. Lyngby: IKS, 1998.

MILTENBURG, J. **Manufacturing strategy : how to formulate and implement a winning plan**. [s.l.] Portland, Or. : Productivity Press, 2005.

MINTZBERG, H. The Fall and Rise of Strategic Planning. **Harvard Business Review**, n. January–February 1994, 1 jan. 1994.

MORELLI, M.; BRANDT, E. A Performance Assessment of Prefabricated Bathrooms Installed in the 1990s. Em: DELGADO, J. M. P. Q. (Ed.). **Recent Developments in Building Diagnosis Techniques**. Singapore: Springer, 2016. p. 105–126.

NIELSEN, K. et al. **Utilization of Mass Customization in Construction and Building Industry**. (J. Bellemare et al., Eds.) *Managing Complexity*. Anais...Cham: Springer International Publishing, 2017.

OVIEDO HAITO, Ricardo Juan Jose. **Estratégias para desenvolver empresas de execução especializada de serviços de obra**. Tese (doutorado)—São Paulo: Universidade de São Paulo, 16 jun. 2015.

PAN, W.; ARIF, M. **Manufactured construction: Revisiting the construction-manufacturing relations**. Procs 27th Annual ARCOM Conference. Anais...Bristol, UK: Association of Researchers in Construction Management - ARCOM, 2011. Disponível em: <http://www.arcom.ac.uk/-docs/proceedings/ar2011-0105-0114_Pan_Arif.pdf>. Acesso em: 13 maio. 2016

PAN, W.; GIBB, A. G. F.; DAINTY, A. R. J. Leading UK housebuilders' utilization of offsite construction methods. **Building Research & Information**, v. 36, n. 1, p. 56–67, 1 jan. 2008.

PINE, B. J. **Mass customization : the new frontier in business competition**. [s.l.] Boston, Mass. : Harvard Business School Press, 1993.

PINE, B. J.; PEPPERS, D.; ROGERS, M. **Do You Want to Keep Your Customers Forever?** [s.l.] Harvard Business Press, 1995.

PRYKE, S. D. An analytical Anglo-French comparative study of construction procurement and management strategies. **RICS Research paper series**, v. 7, n. 5, 2007.

QI, B.; COSTIN, A. BIM and Ontology-Based DfMA Framework for Prefabricated Component. **Buildings**, v. 13, n. 2, p. 394, fev. 2023.

RAAB, J.; KENIS, P. Heading Toward a Society of Networks Empirical Developments and Theoretical Challenges. **Journal of Management Inquiry**, v. 18, n. 3, p. 198–210, 9 jan. 2009.

RICHARD, R.-B. Industrialised building systems: reproduction before automation and robotics. **Automation in Construction**, 20th International Symposium on Automation and Robotics in Construction: The Future Site. v. 14, n. 4, p. 442–451, ago. 2005.

ROCHA, C. G. DA. A conceptual framework for defining customisation strategies in the house-building sector. 2011.

ROSSO, T. **Racionalização Da Construção**. 1a. Edição ed. [s.l.] Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo, 1980.

RUDBERG, M.; WIKNER, J. Mass customization in terms of the customer order decoupling point. **Production Planning & Control**, v. 15, n. 4, p. 445–458, 1 jun. 2004.

SABBATINI, F. H. **Desenvolvimento de métodos, processos e sistemas construtivos: formulação e aplicação de uma metodologia.** Tese (doutorado)—São Paulo: Universidade de São Paulo, 18 ago. 1989.

SALAMA, T. et al. Near optimum selection of module configuration for efficient modular construction. **Automation in Construction**, v. 83, p. 316–329, 1 nov. 2017.

SICMO. **SICMO – Sistema Industrializado de Construcción Modular.** Disponível em: <<http://www.sicmosystem.com/>>. Acesso em: 5 dez. 2024.

SLACK, N.; BRANDON-JONES, A.; JOHNSTON, R. **Administração da produção.** Tradução: Daniel Vieira. 8 ed. ed. São Paulo: Atlas, 2018.

SMITH, R. E.; QUALE, J. D. **Offsite Architecture: Constructing the future.** [s.l.] Taylor & Francis, 2017.

SOARES, G. S. **Desafios para a adoção da Indústria 4.0 na Construção: Uma Revisão Sistemática de literatura e Análise PESTEL.** TCC (graduação)—Florianópolis, Brasil: Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Engenharia Civil, 19 jun. 2024.

TATUM, C. B. Improving Constructibility during Conceptual Planning. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 113, n. 2, p. 191–207, 1 jun. 1987.

ULRICH, K. T.; EPPINGER, S. D. **Product design and development.** [s.l.] McGraw-Hill, 2016.

WARSAWSKI, A. **Industrialized and Automated Building Systems: A Managerial Approach.** 2. ed. London: Routledge, 1999.

WASIM, M.; VAZ SERRA, P.; NGO, T. D. Design for manufacturing and assembly for sustainable, quick and cost-effective prefabricated construction – a review. **International Journal of Construction Management**, v. 22, n. 15, p. 3014–3022, 28 nov. 2022.

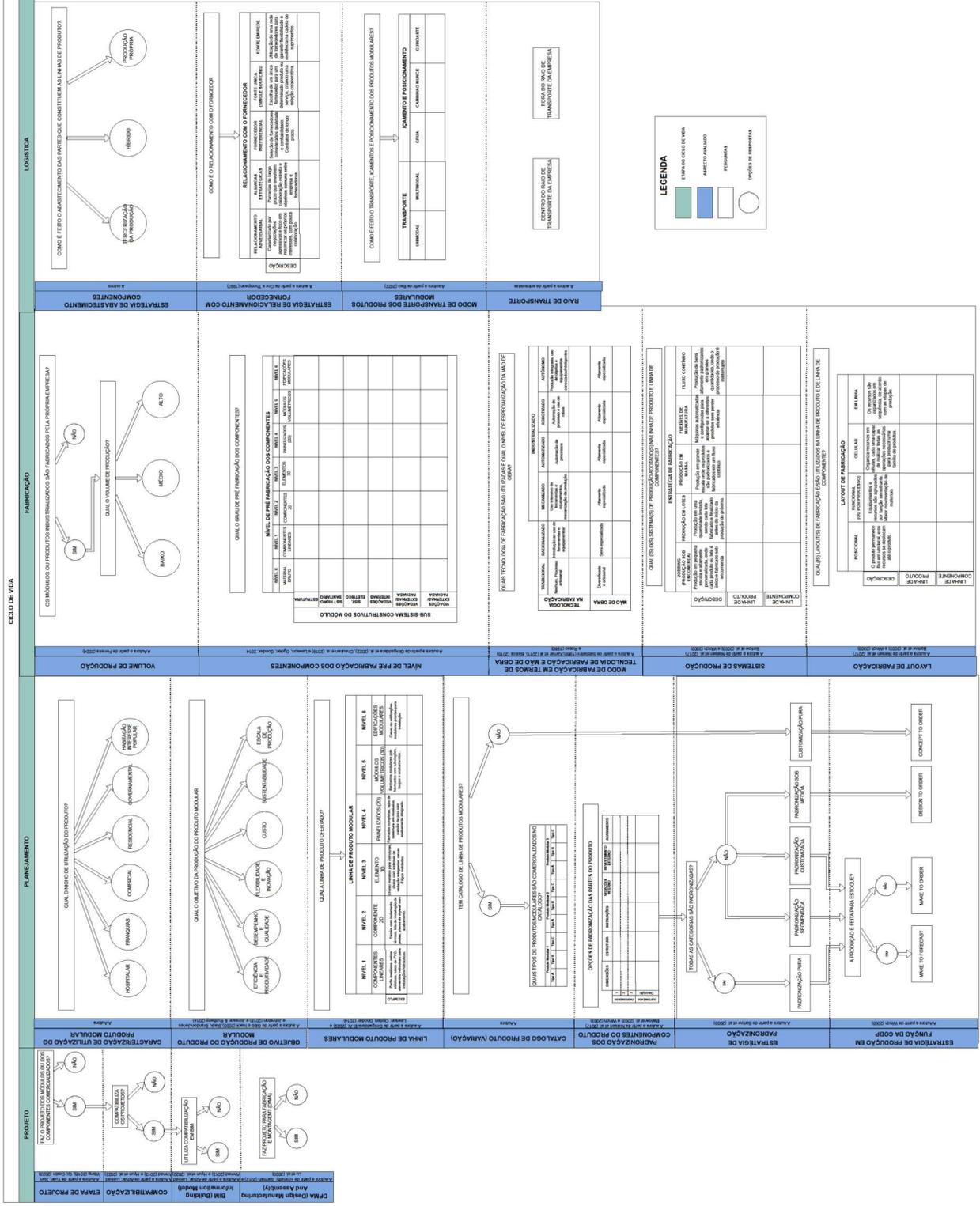
WENG, Y. et al. Comparative economic, environmental and productivity assessment of a concrete bathroom unit fabricated through 3D printing and a precast approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 261, p. 121245, 10 jul. 2020.

WINCH, G. Models of manufacturing and the construction process: the genesis of re-engineering construction. **Building Research & Information**, v. 31, n. 2, p. 107–118, jan. 2003.

YUAN, Z.; SUN, C.; WANG, Y. Design for Manufacture and Assembly-oriented parametric design of prefabricated buildings. **Automation in Construction**, v. 88, p. 13–22, 1 abr. 2018.

ZIMMERMANN, J. **Caracterização das fontes de vantagem competitiva vinculadas com a Construção 4.0.** TCC (graduação)—Florianópolis, Brasil: Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Engenharia Civil, 16 dez. 2022.

APÊNDICE A – Modelo final de caracterização da organização da produção Off-site



Fonte: A. Autora