



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Luís Filipe Oliveira Soares

***Roadmap* de implantação de um sistema de produção para a indústria da construção modular**



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Luís Filipe Oliveira Soares

***Roadmap* de implantação de um sistema de
produção para a indústria da construção
modular**

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia e Gestão Industrial

Trabalho efetuado sob a orientação do

Professor Doutor Rui Manuel de Sá Pereira de Lima

e coorientação do

Professor Doutor Cristiano de Jesus

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição

CC BY

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

AGRADECIMENTOS

A finalização desta dissertação representa o alcance de mais um marco importante na minha vida, marcado sempre, pela presença de pessoas que me deram força e animo para terminar este desafio.

Agradeço assim em primeiro lugar, às pessoas mais importantes na minha vida.

À minha família por me proporcionar os meios e condições necessários para o desenvolvimento pessoal e intelectual. Agradeço pelo esforço e sacrifício que fazem para garantir que nada me falta.

À pessoa que mais me incentivou e forças me deu para que hoje possa estar a escrever esta dissertação.

À pessoa que sempre, nos momentos mais em baixo, garantiu que nunca desistisse. Obrigado, Bárbara!

Agradeço também aos orientadores, Professor Doutor Rui Lima e Professor Doutor Cristiano Jesus, pelo apoio e dedicação demonstrado e pela partilha de conhecimento.

Agradeço ao Engenheiro Ricardo Portela e Engenheiro Flávio Cardoso pela oportunidade de estágio, pela confiança concedida e pela dedicação demonstrada.

Aos meus colegas de trabalho e equipa de desenvolvimento inserida no projeto pelo conhecimento partilhado e colaboração no dia-a-dia.

Por último, a todos os meus amigos pela paciência, pelas experiências partilhadas e pelos momentos especiais.

Obrigado!

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

RESUMO

Os sucessivos aumentos dos preços dos imóveis que se registaram nos últimos anos têm-se vindo a tornar incomportáveis para a maioria da população mundial. A somar a este facto a diminuição da mão de obra especializada tem vindo afetar cada vez mais empresas do setor da construção civil que, deparadas com o aumento da procura, têm perdido o poder de resposta face às necessidades do mercado. Aliado a estes factos, a meta da neutralidade carbónica até 2050 é cada vez mais uma realidade e preocupação da maioria das empresas.

Posto isto, a presente dissertação realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia e Gestão Industrial tem como objetivo o desenvolvimento de um *Roadmap* para a implantação de um sistema de produção para a indústria da construção modular. O mote desta dissertação parte então da vontade da empresa Bysteel *fs*, inserida no DST Group, desenvolver um sistema de produção dedicado às novas técnicas construtivas *off-site*, nomeadamente a construção modular, para assim, fazer face às restrições e necessidades do mercado da construção.

Nesta dissertação são abordadas temáticas como a tipologia, configurações estruturais e componentes base dos módulos pré-fabricados. É igualmente abordada a história da construção modular, fazendo referência aos primeiros projetos realizados com este tipo de técnica construtiva. Analisou-se o mercado da construção modular a nível nacional e internacionalmente e mencionam-se projetos de sucesso com este tipo de construção.

Relativamente ao sistema produtivo, durante a dissertação é definido o modulo tipo para produção, são indicadas as perspetivas da procura anual, caracteriza-se o sistema produtivo e são instanciadas as células de produção necessárias, definindo os fluxos intracelulares e intercelulares.

Por fim, com o recurso à heurística CORELAP, é definido um *layout* para o sistema de produção.

PALAVRAS-CHAVE

Layout, Construção Modular, Células de Produção, Construção *Off-Site*

ABSTRACT

The successive increases in property prices that have been registered in recent years have become unaffordable for the majority of the world's population. In addition to this fact, the decrease in skilled labor has increasingly affected companies in the civil construction sector, which, faced with the increase in demand, have lost the power to respond to market needs. Allied to these facts, the goal of carbon neutrality by 2050 is increasingly a reality and concern of most companies.

That said, the present dissertation carried out under the Integrated Master's Degree in Industrial Engineering and Management aims to develop a Roadmap for the implementation of a production system for the modular construction industry. The motto of this dissertation is based on the desire of the company Bysteel fs, part of the DST Group, to develop a production system dedicated to new off-site construction techniques, namely modular construction, to meet the restrictions and needs of the construction market. In this dissertation topics such as typology, structural configurations and base components of prefabricated modules are referred. The history of modular construction is also described, referring to the first projects carried out with this type of constructive technique. The modular construction market was analyzed nationally and internationally and successful projects with this type of construction were mentioned.

Regarding the production system, during the dissertation the type of module for production is defined, the annual demand perspectives are indicated, the production system is characterized, and the necessary production cells are instantiated, defining the intracellular and intercellular flows.

Finally, using the CORELAP heuristic, a layout for the production system is defined.

KEYWORDS

Layout, Modular Construction, Production Cells, Off-Site Construction

ÍNDICE

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Índice.....	vii
Índice de Figuras.....	x
Índice de Tabelas	xii
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos	xiii
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Motivação e Objetivos.....	3
1.3 Metodologia de Investigação.....	4
1.4 Estrutura da Dissertação	5
2. Enquadramento concetual	7
2.1 Filosofia <i>Lean</i>	7
2.1.1 Os cinco princípios <i>Lean</i>	7
2.1.2 Os oito desperdícios	8
2.1.3 Casa TPS	9
2.2 Técnicas e Ferramentas <i>Lean</i>	11
2.2.1 Kaizen.....	11
2.2.2 Poka-Yoke.....	12
2.2.3 5S.....	12
2.2.4 Value Stream Mapping (VSM).....	13
2.2.5 Fluxograma	13
2.2.6 Gestão Visual.....	13
2.2.7 Mizumashi	14
2.3 Sistema de Produção	14
2.3.1 Classificação dos sistemas de produção.....	16
2.3.2 Classificação dos sistemas de produção para o setor da construção civil	17

2.4	Configurações Genéricas de Sistemas de Produção	19
2.4.1	Sistemas de Produção Orientados à Função (SPOF)	19
2.4.2	Sistemas de Produção Orientados ao Produto (SPOP)	21
2.5	Configurações Conceptuais de SPOP	22
2.5.1	Configurações conceptuais básicas	23
2.5.2	Configurações conceptuais não básicas	23
2.6	Layouts de Sistemas de Produção	24
2.6.1	<i>Layout</i> por produto – Linha de produção	26
2.6.2	<i>Layout</i> por produto - Células de produção	27
2.6.3	<i>Layout</i> por processo – Oficina de produção	27
3.	Construção modular	29
3.1	Conceito	30
3.2	Tipologias, Configurações Estruturais e Componentes Base	32
3.2.1	4 sided modules	33
3.2.2	Open sided	33
3.2.3	Partially open-sided modules	34
3.2.4	Mixed modules	35
3.2.5	Módulos suportados por uma estrutura primária	35
3.2.6	Construções em Madeira	36
3.2.7	Construções em Aço Galvanizado	37
3.2.8	Construções em Betão Pré-fabricado	38
3.3	Vantagens da adoção da Construção Modular	39
3.3.1	Custos	40
3.3.2	Tempo	41
3.3.3	Qualidade	41
3.3.4	Impactos ambientais	42
3.3.6	Flexibilidade	43
3.4	História e Evolução da Construção Modular	44
3.5	Mercado	46

4.	Caso de estudo.....	51
4.1	Definição de Requisitos	53
4.2	Módulo Tipo e Materiais Necessários.....	54
4.2.1	Características estruturais.....	55
4.2.2	Componentes materiais.....	56
4.3	Máquinas e Equipamentos Industriais.....	60
4.3.1	Equipamentos transformadores	61
4.3.2	Equipamentos de movimentação e armazenamento.....	62
4.3.3	Equipamentos de elevação	65
4.4	Processo Produtivo.....	66
4.4.1	Formação de famílias de produtos	71
4.4.2	Instanciação de células concetuais	74
4.4.3	Instanciação de postos de trabalho	79
4.4.4	Organização intracelular e controlo	82
4.4.5	Arranjo integrado das células para formação do SPOP	84
5.	Implantação de layout.....	86
5.1	Desenvolvimento do <i>Layout</i> com recurso ao método CORELAP	87
6.	Conclusões.....	90
6.1	Considerações Finais	90
6.2	Limitações	91
6.3	Trabalho Futuro	92
	Referências Bibliográficas	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Fases da metodologia Action-Research	5
Figura 2 - Casa TPS – adaptado de (Liker e Morgan 2006, p7).....	10
Figura 3 - Modelo genérico do Sistema de Produção adaptado de (Montgomery 2009, p13)	15
Figura 4 - Relação customização/complexidade	16
Figura 5 - Classificação dos sistemas produtivos para a construção civil adaptado de (Jonsson & Rudberg 2014, p56).....	18
Figura 6 - Configuração genérica Sistema de Produção Orientado à Função adaptado de.....	20
Figura 7 - Configuração genérica Sistema de Produção Orientado ao Produto adaptado de	22
Figura 8 – Representação de Células Conceptuais Básicas adaptado de.....	23
Figura 9 - Representação de células partilhadas e células híbridas adaptado de.....	24
Figura 10 – Gráfico Família de Produtos/Quantidade Produzida	25
Figura 11 - Representação gráfica de um modulo 4 sided	33
Figura 12 - Exemplar de um módulo Open Sided	34
Figura 13 - Exemplar de um módulo Partially open-sided	34
Figura 14 - Representação gráfica de uma construção híbrida	35
Figura 15 – Representação gráfica de uma construção modular com estrutura primária.....	36
Figura 16 – Exemplo de um módulo com estrutura em madeira.....	37
Figura 17 – Exemplo de um painel fabricado em CLT	37
Figura 18 – Exemplo de um módulo com estrutura em LSF	38
Figura 19 - Exemplo de um módulo fabricado em Betão.....	39
Figura 20 - Modelo Triangular de requisitos da construção habitacional	40
Figura 21 - Cronograma da Construção Modular vs Construção Convencional	41
Figura 22 - "Manning Portabel Cottage"	45
Figura 23 - "Nagakin Capsule Tower".....	46
Figura 24 - AC Hotel New York NoMad.....	47
Figura 25 - Módulo utilizado na edificação do hotel AC Hotel New York NoMad.....	47
Figura 26 - Complexo residencial Barbizon.....	48
Figura 27 - "Eco-House" Hotel Pedras Salgadas Spa & Nature Park.....	49
Figura 28 - "Elegance V3" moradia T3	50
Figura 29 - Roadmap para o desenvolvimento do sistema produtivo	52

Figura 30 – Módulo de Madeira	55
Figura 31 - Corte vertical da estrutura primária modelado em AutoCad.....	55
Figura 32 - Elementos constituintes do painel lateral exterior	57
Figura 33 - Lista de Materiais e respectivas Quantidades.....	58
Figura 34 - Mesa de trabalho e movimentação de painéis	63
Figura 35 - Mesa do tipo borboleta.....	63
Figura 36 - Carrinho para transporte e distribuição dos painéis entre postos de trabalho.....	64
Figura 37 - Sistema de movimentação dos módulos na linha de montagem	64
Figura 38 - Trilhos para acabamento e armazenamento de painéis.....	65
Figura 39 - Depósito de painéis acabados	65
Figura 40 - Equipamento de elevação para módulos acabados	66
Figura 41 - Fluxo de Trabalho da montagem de Módulos com estrutura de madeira	69
Figura 42 – Etapas para formação de células de produção – adaptado de (Alves 2007, p147)	71
Figura 43 - Diagrama de Precedências do Processo Produtivo	74
Figura 44 - Células de produção para famílias FP1, FP2, FP3 e FP4.....	78
Figura 45 - Implantação intercelular do SPOP	85
Figura 46 - Solução de implantação dos diferentes departamentos	89

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Lista de principais equipamentos transformadores.....	62
Tabela 2 – Etapas para a produção dos painéis e módulos	72
Tabela 3 - Planos sequenciais das famílias de produtos.....	75
Tabela 4 - Cálculo das necessidades de máquinas para a FP1	76
Tabela 5 - Cálculo das necessidades de máquinas para a FP2	76
Tabela 6 - Cálculo das necessidades de máquinas para a FP3	77
Tabela 7 – Tempos operatórios da gama de operações da família de produtos FP4.....	80
Tabela 8 - N° de postos de trabalho para CNBFP1	80
Tabela 9 - N° de postos de trabalho para CNBFP2	81
Tabela 10 - N° de postos de trabalho para CNBFP3	81
Tabela 11 - N° de postos de trabalho para CBFP4.....	81
Tabela 12 - Tabela resumo da Configuração operacional, Arranjo intracelular e Modo operatório	83
Tabela 13 - Grau de Relacionamento (GR) e Valores do Grau de Relacionamento (VGR)	87
Tabela 14 - Tabela de relacionamentos entre departamentos	88
Tabela 15 - Ordem de colocação dos departamentos	88

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

CLT – *Cross Laminated Timber*

CNC – Controlo Numérico Computorizado

DLT – *Dowel Laminated Timber*

GLT – *Glue Laminated Timber*

JIT – *Just-in-Time*

LSF – *Light Steel Frame*

M² – Metros quadrados

MDF – *Medium Density Fiberboard*

NLT – *Nail Laminated Timber*

OSB – *Oriented Strand Board*

PDCA – *Plan-Do-Check-Act*

SPOF – Sistemas de Produção Orientados à Função

SPOP – Sistemas de Produção Orientados ao Produto

TC – Tempo de Ciclo

TPS – *Toyota Production System*

TT – *Takt Time*

WIP – *Work-in-Progress*

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A aquisição de um imóvel ou a construção da “casa de sonho”, representa um marco importante para a maioria da população. A somar a este facto, a procura por habitações temporárias, quer seja para estudantes ou para profissionais que se deslocam em trabalho tem aumentado, contudo, a oferta não acompanha o ritmo da procura. Aliado a esta realidade, o preço dos imóveis tem vindo a sofrer sucessivos aumentos, motivados em parte pelo aumento da procura, mas também pelo aumento do valor da mão-de-obra e pela escassez qualificada da mesma. Segundo dados do Instituto Nacional de Estatística (INE, 2020), o preço dos imóveis em Portugal aumentou 10,1% no terceiro trimestre de 2020 face a igual período de 2019 não refletindo a recessão económica causada pela crise pandémica que atravessamos atualmente.

Os baixos níveis de produtividade na construção civil é um dos fatores que mais contribui para o aumento dos custos de produção neste setor. Importa lembrar que, a produtividade de um dado sistema de produção reflete a relação direta entre a quantidade produzida de um certo produto, num determinado período, e a quantidade de recursos consumidos. Assim sendo, o grande desafio para o aumento dos parâmetros da produtividade centra-se em extrair a máxima capacidade dos recursos disponíveis sem nunca pôr em causa a qualidade final dos produtos. Para que este desafio seja superado, é necessário conhecer à priori, os fatores que contribuem para os reduzidos níveis de produtividade na construção civil. A fragmentação da indústria, contratos complexos, padrões de construção cada vez mais exigentes e o descaramento no investimento na modernização do setor são exemplos de fatores que contribuem para os reduzidos níveis de produtividade (Razkeari et al, 2020).

Tendo em consideração todos estes princípios, é essencial que o setor da construção civil evolua a fim de adaptar-se às novas realidades e exigências do mercado, desenvolvendo novas soluções que visem diminuir o tempo e custo de construção sem nunca esquecer os impactos ambientais. Parte da solução passa por migrar os métodos de construção convencionais para métodos inovadores que visam diminuir os problemas como o planeamento, os custos de produção entre outros, tornando o setor mais competitivo, maximizando os lucros para as empresas e aumentando o valor intrínseco do produto final. A construção modular poderá ser uma resposta eficaz para a maioria dos problemas que a construção convencional enfrenta. Este método de construção é caracterizado por ser mais ecológico, mais eficiente e mais rápido comparado com os padrões atuais. A sua versatilidade é um dos seus pontos mais fortes

uma vez que todas as tipologias de habitações podem ser construídas com este método adequando-se assim, a diversos grupo-alvo. Apesar de não ser um conceito recente, existe ainda, porém, diversos entraves à adoção massiva deste método de construção tais como a dificuldade no acesso ao crédito habitação e à contratação de seguros, a dificuldade em personalizar totalmente a habitação e a dificuldade de revenda do imóvel. Por este motivo e pela má reputação adjacente à construção pré-fabricada, que durante longos anos esteve associada a construções frágeis e de má qualidade, existe ainda uma grande resistência à introdução deste tipo de construção em novos projetos habitacionais. A somar a esta falta de conhecimento e desconfiança, existe ainda a preocupação de como a construção modular poderá influenciar o futuro da construção convencional.

De forma sucinta, a construção modular é um tipo de construção onde várias secções, os módulos, são agrupados para formar um edifício. Os módulos são fabricados *off-site* em fábricas especializadas e posteriormente, são enviados para o local de construção para juntos formarem um edifício robusto e de grande qualidade. Apesar de partilharem o mesmo conceito, é importante não confundir construção modular com construção pré-fabricada. Esta difere da construção modular uma vez que grande parte da montagem é efetuada *on-site*.

Sob o ponto de vista da inovação e da sustentabilidade ambiental, a construção modular apresenta um enorme potencial para desenvolver novas tecnologias e introduzir diversos *inputs* no setor da construção. A nível ambiental, a construção modular permite reduzir, substancialmente, os desperdícios produzidos pelas atividades adjacentes à construção convencional, como a poluição sonora e do ar, uma vez que, é necessário muito menos material de construção e, materiais como a madeira permitem construções mais leves e ao mesmo tempo com boas propriedades de isolamento, gerando menos emissões de nitrogénio. Em relação à inovação, a construção modular poderá desempenhar um papel fundamental no que concerne à revolução do pensamento atual introduzindo novas tecnologias, metodologias de trabalho e novos modelos de negócio (Goulding & Arif, 2013).

Sendo a construção modular um processo maioritariamente desenvolvido em ambiente fabril, é importante implementar neste tipo de indústria o que melhor existe nas indústrias mais avançadas como é o caso da indústria automóvel. A filosofia *Lean* e as suas ferramentas são, atualmente, imprescindíveis para o desenvolvimento e correta monitorização de qualquer tipo de sistema produtivo uma vez que visam diminuir os desperdícios e todas as atividades que não acrescentem valor ao produto final. Como tal, é necessário garantir que todas as dificuldades existentes à sua introdução são atenuadas (Shafai, 2012).

Na base desta filosofia estão cinco princípios elementares para o sucesso e o alcance da melhoria contínua da organização. Tais princípios são o valor, a cadeia de valor, o fluxo contínuo, o sistema *pull* e a busca pela perfeição (Womack & Jones, 1997), que em conjunto buscam a redução ou eliminação dos sete desperdícios considerados na filosofia *Lean*: transporte desnecessário, inventário excessivo, deslocamentos, esperas, sobreprodução, sobreprocessamento e defeitos. A identificação e a redução destes desperdícios só é possível com o auxílio de ferramentas *Lean*, como por exemplo: *Poka-Yoke*, *Kaizen*, 5S, *Value Stream Mapping (VSM)*, *Kanban* entre outros.

1.2 Motivação e Objetivos

Tendo em conta a rápida evolução da economia mundial e por conseguinte, a inevitabilidade da diminuição do tempo de resposta das empresas face às necessidades dos clientes, cada vez mais exigentes com o produto final e com a personalização do mesmo, advém a necessidade de desenvolver novos paradigmas de produção. A construção modular surge então, para dar resposta aos novos paradigmas da sociedade, mais concretamente, para dar resposta às necessidades de novas infraestruturas.

Para garantir o sucesso da construção modular é necessário assegurar, à partida, que os objetivos deste tipo de construção, nomeadamente o aumento da eficiência de produção, a diminuição do tempo de construção, a diminuição dos custos de produção e a integração eficaz com o meio ambiente, reduzindo os impactos ambientais causados pela construção convencional, são cumpridos.

Para que tal aconteça, é necessário ter em consideração que, ao contrário da maioria dos produtos produzidos em ambiente fabril, onde existe um determinado número de tarefas repetitivas e um número limite de produtos distintos, concebidos particularmente para serem produzidos em grande volume, tradicionalmente associados às economias de escala, na construção modular existem determinadas tarefas passíveis de grande variabilidade devido à elevada customização. Dado este facto, a indústria da construção modular não poderá retirar partido de certas ferramentas concebidas para tarefas repetitivas (Shafai, 2012).

Assim sendo, torna-se vital desenvolver um sistema produtivo tendo por base conceitos como Produção Flexível, Produção *Lean* e Produção Ágil. É necessário desenvolver um sistema produtivo capaz de assegurar respostas eficazes a uma Economia *Pull*, caracterizada pela flexibilidade dos sistemas de produção, pelos produtos por medida, pela incorporação de serviços especializados de alto conteúdo tecnológico, pela incorporação de eco-tecnologias entre outros (Alves, Silva & Lima, 2003).

O principal objetivo deste trabalho de investigação consiste em desenvolver um *roadmap* de implementação de um sistema de produção dedicado à manufatura de componentes e montagem de módulos para a construção modular. Entende-se como *roadmap* uma ferramenta de gestão de processos, com forte componente visual, que visa definir e acompanhar a estratégia para o desenvolvimento e alcance de metas definidas. Como parte integrante deste objetivo está a especificação das linhas de montagem, os processos de trabalho, a definição e *design* de *layouts*, os fluxos de produção e a capacidade de produção.

Por último, e como complementação do objetivo principal, é essencial analisar e perceber quais os fatores críticos a ter em consideração para garantir a máxima eficiência de um sistema de produção para a construção modular.

1.3 Metodologia de Investigação

Por forma a garantir o alcance dos objetivos propostos e maximizar o processo de aprendizagem e desenvolvimento profissional das entidades envolvidas na proposta de dissertação de mestrado, o processo de investigação deverá ser suportado por uma metodologia de investigação que aborda temáticas como a filosofia, a abordagem, o método, o horizonte e a estratégia de investigação.

A filosofia de investigação que mais se adequa ao trabalho proposto é o Positivismo

A abordagem de investigação que melhor se enquadra ao processo de investigação é a abordagem indutiva, caracterizada pela recolha e análise de dados.

O método de investigação utilizado é misto, conjuga ao mesmo tempo métodos quantitativos, com a análise de factos e a relação entre si, e métodos qualitativos, caracterizados pela recolha de informação por meio da análise direta dos processos, sendo um método altamente interpretativo e descritivo.

O horizonte temporal da investigação é definido pelos estudos transversais. Estes, são caracterizados pela recolha instantânea de dados localizados num determinado período de tempo.

Por último, a estratégia de investigação adotada é a investigação-ação. Esta estratégia pode ser descrita como um processo participativo e democrático que procura o desenvolvimento do conhecimento prático dos intervenientes e das suas comunidades, contribuindo para a resolução de problemas identificados, conjugando ações e reflexões, teoria e prática num processo de aprendizagem mútuo (Reason & Bradbury,2001).

Nesta metodologia de investigação, existe um processo iterativo incremental que parte de um pressuposto inicial da necessidade ou melhoria de uma realidade, seguindo-se uma sequência de fases de planificação, ação, observação e reflexão. No final de cada ciclo toda a matéria anteriormente

desenvolvida é alvo de um diagnóstico e se necessário é incorporada para um ciclo de novas fases. Segundo Susman & Evered (1978), a estratégia investigação-ação está dividida em 5 fases: Diagnóstico, Plano de Ações, Implementação das Ações, Avaliação e Aprendizagem.

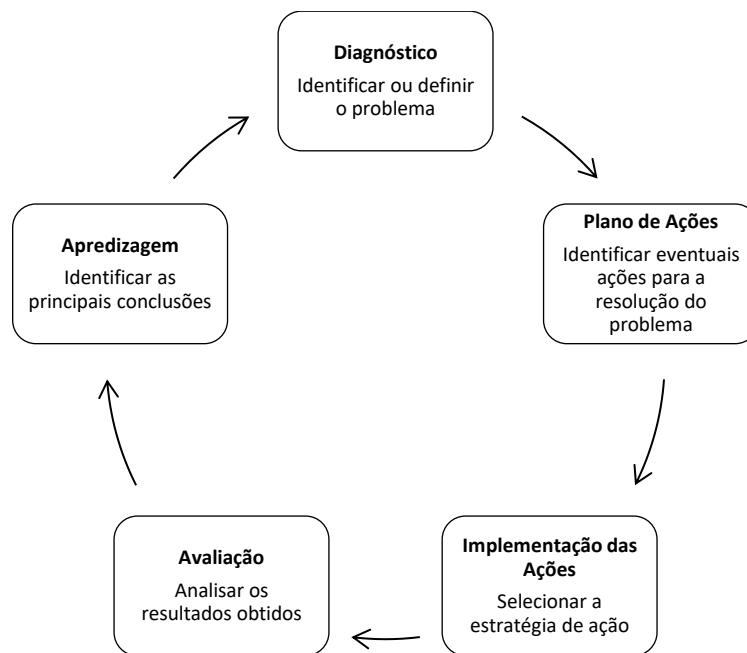


Figura 1 - Fases da metodologia *Action-Research* (Susman & Evered, 1978, p99)

Para a correta utilização desta metodologia e para o avanço eficaz do plano de trabalhos, é exigido, de certa forma, a adoção de ações de carácter colaborativo entre o investigador e as pessoas envolvidas da instituição, para juntos trabalharem para um objetivo comum.

No final de cada ciclo de trabalhos é realizada uma análise do cumprimento dos objetivos propostos e, caso sejam identificados problemas que não foram solucionados, inicia-se mais um ciclo de trabalhos. Este processo termina assim que os objetivos forem alcançados.

1.4 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está dividida em seis capítulos.

No presente capítulo é apresentada o enquadramento, motivação e objetivos que levam à elaboração deste projeto, a metodologia de investigação utilizada para a obtenção dos objetivos propostos e a estrutura da dissertação.

No segundo capítulo é apresentado o enquadramento concetual relevante para a elaboração do projeto destacando-se os conceitos de filosofia *lean*, a casa TPS e a classificação de sistemas de produção.

No terceiro capítulo aborda-se o tema da construção modular e suas vertentes, analisam-se as tipologias, configurações estruturais e componentes base e ainda a história e mercado da construção modular.

No quarto capítulo faz-se a descrição do caso de estudo e inicia-se a resolução do problema começando por enumerar os equipamentos e máquinas necessários e por fim o desenvolvimento do sistema produtivo.

No quinto capítulo desenvolve-se uma proposta de *layout*.

Por último, no sexto capítulo são apresentados os resultados obtidos e retiradas as respetivas conclusões do projeto. São também descritas as dificuldades sentidas e os trabalhos futuros a desenvolver.

2. ENQUADRAMENTO CONCEPTUAL

2.1 Filosofia *Lean*

A filosofia *Lean* surge do resultado de reestruturação da indústria automóvel japonesa após a segunda guerra mundial depois dos Estados Unidos da América bombardearem as cidades japonesas Hiroshima e Nagasaki resultando na sua destruição total.

Lean pode ser descrita como uma metodologia de gestão que tem como máximas a eliminação do desperdício e o aperfeiçoamento de todas as atividades de um processo produtivo, procurando criar valor para o cliente. As atividades que não acrescentam valor ao produto final são consideradas desperdícios que resultam no aumento direto dos custos produtivos (Womack et al, 1990).

A *Toyota Motor Company*, sob a direção de Eiji Toyoda e do engenheiro Taiichi Ohno, foi a empresa pioneira no desenvolvimento deste modelo de produção.

Depois da segunda guerra mundial, a empresa passou por um forte período de reestruturação. Devido à escassez de recursos e com a necessidade de reduzir os custos produtivos, a Toyota desenvolveu um processo produtivo capaz de retirar o máximo proveito dos recursos disponíveis, minimizando os desperdícios e consequentemente, diminuindo os custos de produção.

O modelo TPS (*Toyota Production System*), tem como principal objetivo satisfazer as necessidades do cliente entregando-lhes produtos com máximo valor. Para que tal seja possível, o TPS caracteriza-se por uma produção planeada, em menor tempo possível cingindo-se sempre ao necessário e indispensável, garantindo a máxima qualidade nos produtos produzidos (Ohno, 1988).

2.1.1 Os cinco princípios *Lean*

A filosofia *Lean* rege-se por cinco princípios-chave que constituem os fundamentos base para o alcance do sucesso e eficácia do seu propósito, garantindo que ao longo de todo o processo produtivo é acrescentado valor ao produto final, reduzindo as atividades consideradas desnecessárias, os desperdícios.

Segundo Womack & Jones (1997), os cinco princípios-chave são os seguintes:

- **Definir Valor:** se não o mais importante, a definição de valor é um dos princípios-chave mais importante da filosofia *Lean* uma vez que só é possível entregar produtos com valor para os clientes quando entendermos o significado de valor aos olhos dos clientes. Regra geral valor deve ser definido pelo cliente e, cabe à indústria disponibilizar produtos que os clientes desejam;

- **Identificar a Cadeia de Valor:** na sequência da definição de valor, a identificação das operações que agregam valor ao produto final, isto é, da cadeia de valor, é um princípio deveras importante. Identificar as operações necessárias para a produção de um dado produto, permite filtrar as operações que agregam valor das operações desnecessárias o que permite melhorar o fluxo de produção;
- **Criar Fluxo de Produção com Valor:** o processo produtivo deve fluir continuamente sem paragens desnecessárias, tornando o processo mais “limpo” e otimizado possível. Este resultado só é possível depois da eliminação de todas as etapas que não acrescentam valor, da diminuição de *stock*, da eliminação dos tempos de espera e do envolvimento de todos os colaboradores. Resulta desta criação de fluxo de produção com valor um fluxo contínuo que se compromete a entregar produtos ao cliente, quando necessários e segundo os requisitos do cliente;
- **Produção puxada (Pull):** sistemas de produção *Pull* baseiam-se na procura para a produção dos seus produtos, isto é, produzir apenas quando o mercado requer ou quando a operação a jusante do processo assim o necessita, evitando o acumular de *stocks* de produto inacabado ou produto final e permite reduzir os desperdícios de material;
- **Procurar a perfeição:** a procura pela perfeição de todas as atividades do sistema produtivo deve ser uma meta constante. Apesar de inalcançável, a procura por esta perfeição permite uma melhoria contínua do sistema produtivo. Deve ser promovido junto de todos os colaboradores a melhoria constante das suas atividades que, apesar de funcionarem corretamente existe sempre espaço para a melhoria da mesma.

2.1.2 Os oito desperdícios

Um dos princípios base da filosofia *Lean* centra-se na eliminação das atividades que representam desperdícios e que não acrescentam valor para o cliente. Assim sendo, é de extrema importância enunciar os diferentes tipos de desperdícios. Segundo Ohn (1988), existem sete tipos de desperdícios, sendo eles:

- **Transportes:** a movimentação desnecessária de matéria-prima, semiacabados, produtos acabados, colaboradores e informação representa um desperdício. Toda a movimentação que não agrega valor ao produto final deve ser eliminada a fim de diminuir desperdícios, mas também com o intuito de salvaguardar o produto acabado de potenciais estragos;
- **Movimentações:** em relação a este desperdício, este diz respeito às movimentações desnecessárias com equipamentos e colaboradores durante o processo produtivo;

- **Esperas:** tempos de inoperância de colaboradores, equipamento fabril e das restantes atividades do processo de produção representam um desperdício. Apesar das diferenças entre os vários tempos de processamento nos diferentes postos de trabalho, é importante gerir de forma eficaz a produção e a entregas dos diferentes produtos o local e tempo correto por forma a garantir um fluxo de produção contínuo;
- **Sobre processamento:** a execução de tarefas para além do plano de fabrico ou a execução de tarefas de forma deficiente são características deste desperdício. De modo atenuar este desperdício, é fundamental padronizar os processos de trabalho para que não sejam executadas tarefas desnecessárias;
- **Defeitos de qualidade:** a não conformidade com os requisitos de qualidade estipulados para um determinado produto implica o retrabalho do mesmo ou em último caso a perda total da peça, como tal, o controlo de qualidade deverá ser uma das etapas mais importantes do processo de produção;
- **Sobreprodução:** a produção antecipada ou em quantidades superiores ao necessário representa um desperdício agravado uma vez que origina a formação de outro tipo de desperdício, a formação de *stocks*;
- **Stock:** o acumular de matéria-prima, semiacabados e produto final representa uma forma de desperdícios. Este acumular de produtos traduz-se na dificuldade em detetar potenciais defeitos no processo produtivo e principalmente representa o acumular de capital “parado”;

Para além dos sete tipos de desperdícios considerados por Ohno, Womack & Jones (1997) categorizaram mais um tipo de desperdício, nomeadamente:

- **Não aproveitamento da capacidade humana:** por vezes a falta de conhecimento das capacidades dos colaboradores pode representar uma forma de desperdício visto que, o potencial de cada colaborador poderá não estar a ser devidamente aproveitado nem valorizado. Esta desvalorização ou falta de conhecimento poderá representar uma não otimização de parte do processo produtivo.

2.1.3 Casa TPS

O sistema de produção desenvolvido pela Toyota, o *Toyota Production System*, assente numa filosofia de zero desperdícios, vai mais para além da simples utilização de um conjunto de técnicas e ferramentas. Este sistema de produção foi desenvolvido sobre uma estrutura organizada e bem definida desde elementos de base até ao topo onde se encontram os objetivos. Assim sendo, a vontade de transmitir

esta filosofia de produção para os parceiros que trabalhavam com a *Toyota Motor Company*, mobilizou os engenheiros Taichi Ohno e Fujio Cho a desenvolverem uma ilustração simples, mas eficaz da estrutura que a compõe, a “Casa TPS” (Ohno, 1979).

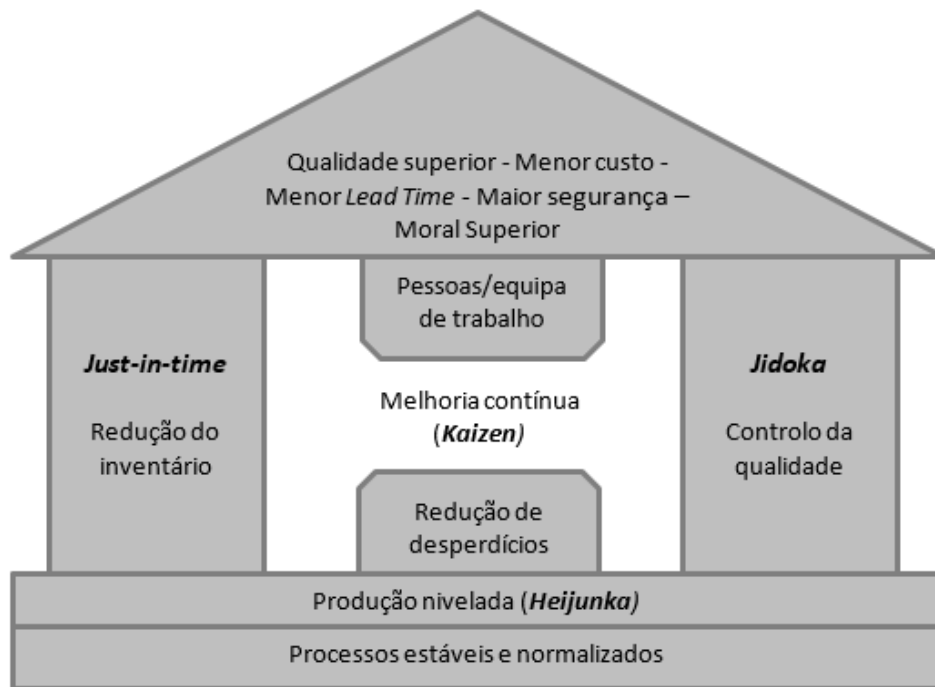


Figura 2 - Casa TPS – adaptado de (Liker e Morgan 2006, p7)

Tal qual como uma estrutura de uma casa convencional, a “Casa TPS” é composta por quatro partes: fundações, pilares, centro e telhado. Esta simples analogia pretende demonstrar que o sistema só é suficiente coeso se todas as partes que o constituem também o forem.

- **Fundações** - as fundações que sustentam a casa são consideradas como elementos principais da filosofia visto que, toda e qualquer estrutura requer um suporte inicial para poder conferir a estabilidade necessária para se iniciar qualquer tipo de alteração ao sistema. Na base encontram-se conceitos como a estabilidade e padronização de processos e o nivelamento da produção (*heijunka*).
- **Pilares** - *Just-in-Time* (JIT) e *Jidoka* são os pilares que constituem a casa TPS. O pilar JIT refere-se ao objetivo mais aclamado por toda a indústria, a produção com zero stock. Como o próprio nome o indica, *Just-in-Time*, diz respeito à obrigatoriedade de abastecimento de recursos necessários no exato momento e local do processo produtivo. O segundo pilar, *Jidoka*, significa “automação com intervenção humana”, ou seja, ao contrário da automatização dos processos,

em que os equipamentos apenas se limitam a desempenhar a função para o qual estão destinados, a automação de processos significa que os equipamentos introduzem correções ao seu funcionamento sem necessidade de intervenção humana contribuindo assim para a diminuição de falhas nos processos.

- **Centro** - no centro representam-se as pessoas/equipas de trabalho, a força motriz para a eliminação dos desperdícios e conseqüentemente a melhoria contínua do sistema (*Kaizen*).
- **Telhado** - no topo, situam-se os objetivos deste sistema produtivo e conseqüentemente da filosofia *Lean*, que apontam para o alcance da melhor qualidade possível, minimizando os custos de produção, fabricando no menor tempo possível com maior segurança o que resulta no “levantar” da moral de todos os intervenientes.

2.2 Técnicas e Ferramentas *Lean*

2.2.1 Kaizen

Kaizen, à semelhança das demais ferramentas e técnicas *Lean*, surgiu da cultura empresarial japonesa pós II Guerra Mundial e significa Melhoria Contínua. Dada a sua natureza em busca da perfeição tendo por base a melhoria contínua de processos e métodos, podemos afirmar que o *Kaizen* é uma das diretrizes principais da filosofia *Lean*, uma vez que, traduz na prática o conceito primordial desta mesma filosofia, a melhoria contínua das organizações e a eliminação dos desperdícios. Tendo por base o envolvimento de todos os colaboradores, o *Kaizen* promove a identificação sistemática de erros e desperdícios das organizações, dos seus processos e até colaboradores, permitindo assim, desenvolver ações corretivas que visem melhorar sistematicamente toda a organização. Servindo-se de outras ferramentas *Lean*, como o caso de ciclo PDCA (*Plan-Do-Check-Act*) e diagramas de causa-efeito, esta técnica fomenta o *Brainstorming* entre os demais colaboradores de uma organização que, em conjunto, tentam identificar eventuais problemas, determinar soluções, discutir planos de melhoria e perceber a evolução conseqüente das suas ações conjuntas ou individuais. Para o alcance do princípio base do *Kaizen* é necessário implementar estratégias para que a melhoria contínua seja uma realidade e uma prática recorrente dentro das organizações, e para que tal seja possível, é necessário criar hábitos e métodos para o alcance desse mesmo objetivo. É necessário sensibilizar os colaboradores para a importância da implementação do *Kaizen*, conferindo-lhes conhecimento e formação do porquê dessa necessidade. É igualmente importante, sensibilizar e motivar os colaboradores para o ato voluntário desta

técnica, uma vez que, a melhoria apenas acontece se for um ato espontâneo e não obrigatório (Garcia et al., 2014).

2.2.2 Poka-Yoke

O termo *Poka-Yoke*, traduzido do japonês como “à prova de erros”, foi desenvolvido por Shigeo Shingo a década de 60, e resumidamente, consiste em dispositivos que executam 100% da inspeção e controlo de qualidade nos processos produtivos, detetando e corrigindo falhas que ocorrem por via de má execução das atividades produtivas. Segundo Vinod et. al., 2015, os *Poka-Yoke* são dispositivos cujo seu principal objetivo é detetar defeitos, agindo numa fase prematura do processo produtivo. Estes permitem definir e eliminar as causas das falhas evitando que estas se tornem mais tarde, defeitos aos olhos dos clientes.

De todos os métodos de controlo de qualidade, os *Poka-Yoke* são os dispositivos corretivos mais poderosos, uma vez que, paralisam o sistema produtivo até que a causa da falha seja corrigida. São considerados métodos de controlo quando paralisam um sistema produtivo e métodos de advertência quando sinalizam por via de sinais sonoros ou luminosos, a existência de uma falha.

2.2.3 5S

Provavelmente uma das metodologias *Lean* mais utilizada por diversos setores de produção, serviços entre outros, a metodologia dos 5S deriva das iniciais japonesas *Seiri, Seiton, Seisō, Seiketsu* e *Shitsuke*. A implementação desta ferramenta traduz-se em inúmeras vantagens para as organizações tais como a diminuição do tempo sem valor agregado, o aumento da produtividade e a melhoria da qualidade de todas as atividades da organização (Omogbai et al, 2015). Mais do que uma metodologia, os 5S devem fazer parte da cultura de qualquer organização, devem ser conhecidos e adotados por todos os setores e colaboradores de uma organização.

Os cinco princípios da metodologia 5S são os seguintes:

- **Seiri (Separar)** – para o alcance de uma melhor gestão visual, é necessário separar e organizar os diferentes materiais por ordem para uma maior facilidade de armazenamento e rastreabilidade;
- **Seiton (Organizar)** – manter o local de trabalho sempre arrumado e organizado permite reduzir o tempo gasto nas deslocações à procura do material necessário para executar uma determinada tarefa;

- **Seisō (Limpar)** – a limpeza do local de trabalho deve ser encarada como uma atividade fundamental a realizar sistematicamente sem exceção;
- **Seiketsu (Padronizar)** – a padronização é um conceito transversal a toda a filosofia *Lean* e como tal, não poderia ser exceção na metodologia 5s. A padronização das tarefas do local de trabalho permite reduzir o tempo de execução das mesmas o que contribui para uma maior fluidez do processo produtivo;
- **Shitsuke (Manutenção)** – por último, para garantir uma constante e correta implementação das quatro anteriores atividades, é necessário garantir a manutenção dos hábitos criados.

2.2.4 Value Stream Mapping (VSM)

O VSM, ou em português, o mapeamento do fluxo de valor, é uma ferramenta que permite ilustrar, analisar e melhorar as etapas necessárias para a produção de um determinado artigo ou serviço. Esta ferramenta faz-se valer de símbolos próprios que permitem ilustrar e visualizar o fluxo de material e de informação de um sistema produtivo desde a entrada da matéria-prima até à expedição do produto final. Esta ferramenta tem como objetivo realizar diagnosticar de forma fácil e objetiva a cadeia de valor de um determinado processo produtivo por forma a identificar eventuais desperdícios e as suas causas.

A metodologia VSM é, segundo Rother & Shook (2003), constituída por quatro fases distintas: seleção de uma família de produtos; construção de um mapa da situação atual; construção de um mapa da situação futura e planejar e implementar o plano de ações.

2.2.5 Fluxograma

O fluxograma é uma ferramenta de representação gráfica de todas as atividades de um processo produtivo por forma a tornar a sua compreensão rápida e fácil aos olhos de todos os intervenientes. Tem como objetivo evidenciar as interações entre as diferentes fases do processo produtivo, as trocas de informação e materiais, possibilitando a deteção de possíveis atividades que não agregam valor ao produto final. Esta ferramenta utiliza uma simbologia própria para representar as diferentes etapas do processo produtivo (Montgomery, 2009).

2.2.6 Gestão Visual

A gestão visual é uma ferramenta de comunicação visual com o objetivo de transmitir, de forma rápida, objetiva e sucinta, informação, objetivos e indicadores relevantes de um determinado departamento de uma organização, com o intuito de promover e/ou gerir diferentes atividades de forma eficiente. Esta ferramenta utiliza símbolos, sinais, gráficos, cores, entre outros, para expressar ideias fundamentais

como marcações de pisos, locais perigosos, indicar fluxos, indicadores métricos como por exemplo ao nível da segurança e higiene no trabalho e até, indicar estados em que se encontram os diversos equipamentos utilizados no processo produtivo através de um código de cores (Tezel & Koskela, 2016).

2.2.7 Mizusumashi

Mizusumashi é um conceito da filosofia Lean que se traduz nas operações de abastecimento interno. Os operários responsáveis por esta atividade têm como objetivo executar todas as atividades de transferência de materiais entre o armazém e os postos de trabalho evitando situações de espera, amontoar de materiais nos postos de trabalho e promovem o fluxo da logística interna (Pinto, 2009).

Existem dois sistemas distintos de abastecimentos das linhas de produção, sendo eles: sistemas de abastecimento manuais e sistemas de abastecimento autónomos. No primeiro sistema, como o próprio nome indica, os operários responsáveis pelo abastecimento utilizam carrinhos para executar as tarefas de abastecimento dos postos de trabalho. Este sistema, apesar de rudimentar, adequasse aos sistemas de produção cujo seu leque de produtos é diversificado ou o seu layout poderá sofrer constantes mudanças em função da procura, o que permite definir novas rotas de abastecimento, tempo de rota entre outros. No lado oposto, os sistemas de abastecimento autónomos são caracterizados pela utilização de veículos guiados autónomos ou, *automated guided vehicles (AGVs)*. Estes sistemas utilizam tecnologia de ponta que por meio das necessidades de cada posto de trabalho calculam a melhor rota de abastecimento possível para entregar os materiais no local e hora certa (Patel & Patel, 2013).

Existem dois métodos de abastecimento utilizados pelos *Mizusumashis*, contínuo e periódico. No abastecimento contínuo, o momento de abastecimento ocorre em simultâneo com a verificação da necessidade e material, existe a troca de um contentor vazio por um cheio. Este método é tipicamente apelidado de sistema *Kanban*. No segundo método, o operador responsável pelo abastecimento verifica periodicamente o inventário na célula de produção do produto em produção e reabastece consoante o último consumo de materiais (Nomura & Takakuwa, 2006).

2.3 Sistema de Produção

Os sistemas de produção podem ser identificados como um conjunto de elementos que estabelecem relações causais entre si com um objetivo comum de obtenção de produtos. Os produtos obtidos podem ser classificados como produtos tangíveis ou intangíveis. Os produtos tangíveis ou físicos, são bens de consumo direto, caracterizados pela sua existência material, ou seja, passíveis de lhes ser atribuído características quantitativas. Para além destas características, os bens tangíveis apresentam uma vida

útil económica. Pelo contrário, os produtos intangíveis não apresentam características mensuráveis, mas sim características qualitativas que adicionam valor ao produto e que determinam a sua importância para o consumidor.

Genericamente, um sistema de produção é composto por elementos de entrada, que após a transformação através do processo de produção originam produtos, os elementos de saída, com maior valor do que os elementos de entrada como representado na Figura 3.

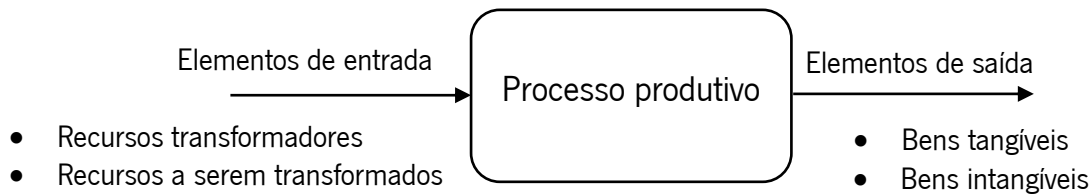


Figura 3 - Modelo genérico do Sistema de Produção adaptado de (Montgomery 2009, p13)

Os elementos de entrada do sistema de produção podem ser divididos em dois grupos distintos: os recursos a serem transformados e os recursos transformadores. Os recursos a serem transformados dizem respeito aos elementos que por meio do processo produtivo vão ser transformados a ser-lhes-á adicionada utilidade para obter um determinado produto. Fazem parte deste grupo a matéria-prima, informação de produção etc. Em relação aos recursos transformadores, estes podem ser identificados como todos os recursos capazes de transformar os recursos a serem transformados em produtos finais. São exemplos os equipamentos, máquinas, instalações industriais, funcionários etc (Lima, 2003).

O processo produtivo é a fase do sistema de produção em que os elementos de entrada são processados e convertidos nos produtos desejados. Pode-se distinguir diferentes tipos de processos produtivos tendo em conta o resultado final do seu processamento, isto é, processos produtivos que executam a transformação física ou da composição inicial dos elementos de entrada são apelidados de processos de conversão. Pelo contrário, processos produtivos que originam serviços como produto final são apelidados de processos de transferência uma vez que, existe a transferência de conhecimento para o consumidor final.

Por último, os elementos de saída, os produtos tangíveis e intangíveis, são o resultado da transformação dos elementos de entrada pelo processo produtivo (Carvalho, 2008).

Os sistemas de produção mais simples podem agrupar-se e formar um sistema de produção mais complexo e abrangente, possibilitando o desenvolvimento e a produção de novos produtos, utilizando uma sequência de processos produtivos e incorporando sucessivamente os *outputs* do processo precedente como *inputs* do processo seguinte (Lima, 2003).

2.3.1 Classificação dos sistemas de produção

Embora existam diferentes tipos de classificação dos sistemas produtivos, quer seja quanto à implantação, quantidade, destino dos produtos, natureza dos produtos e, ou até mesmo quanto à natureza dos fluxos de materiais, pode-se classificar diferentes sistemas de produção tendo em conta a natureza do processo. Assim sendo, pode-se classificar os sistemas de produção como produção por projeto, produção em oficina, produção em lotes, produção em massa e produção contínua (Shafai, 2012).

Na Figura 4, está representada a relação entre a complexidade dos produtos, isto é, o número de componentes que compõe o produto final, e a customização dos mesmos.

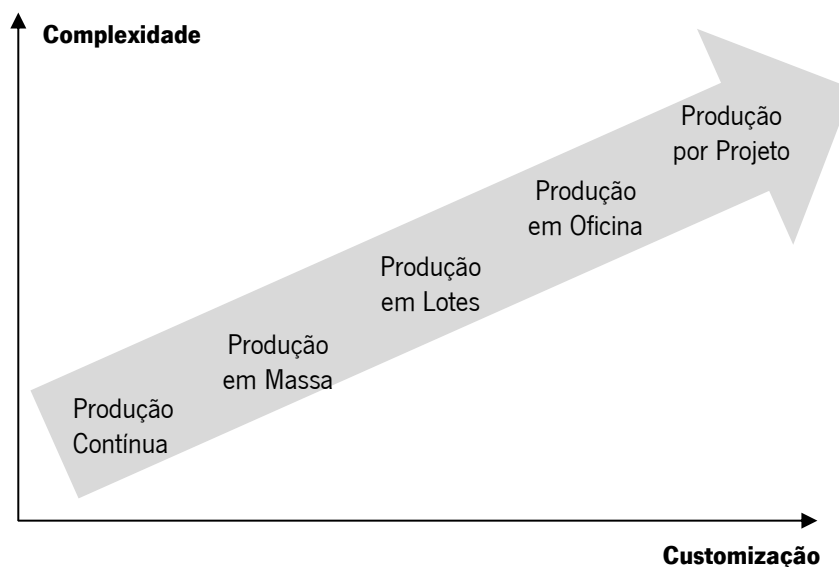


Figura 4 - Relação customização/complexidade
(Carvalho 2008, p3)

Como pode ser observado, nos extremos situam-se a produção por projeto e a produção contínua. A produção por projeto é aplicada em casos de elevada complexidade dos produtos e elevado grau de customização. É produzido apenas um produto consoante as especificações do cliente e é realizada uma sequência específica de tarefas para o desenvolvimento e produção do mesmo. É característico desta produção a existência de datas específicas para o começo e fim da produção bem como, especificações únicas de cada produto. No outro extremo situa-se a produção contínua em que, apesar de ser produzido um único produto, este é produzido continuamente num lote de tamanho infinito. Este processo de produção é caracterizado por um lado, pela elevada standardização e volumes de produção e por outro lado, pela presença de trabalho repetitivo (Carvalho, 2008).

A produção em massa é utilizada quando existe a necessidade de produzir uma gama de produtos reduzida, mas de elevado volume de produção. Tanto o nível de customização como de complexidade

são reduzidos o que permite utilizar este tipo de produção em economias de escala, uma vez que, possibilita redução dos custos de produção e o aumento da taxa de produção. A produção em lotes pode ser considerada o meio-termo da relação customização/complexidade uma vez que existe uma customização e complexidade intermédia dos produtos. Este tipo de produção teve origem como resultado da evolução económica e do mercado uma vez que, as exigências e necessidades dos clientes evoluíram para paradigmas onde as necessidades passaram a ser mais específicas e o tempo entre modas diminuiu, resultando na migração de alguns produtos da produção em massa para a produção em lotes (Carvalho, 2008).

Por último, a produção em oficina é caracterizada pela produção orientada a uma vasta gama de produtos, em pequenas quantidades. Pode-se afirmar que os padrões de customização e complexidade dos produtos são mais elevados relativamente à produção em massa.

Este tipo de classificação dos sistemas produtivos pode ser um pouco ambíguo uma vez que, não existe limites específicos para delimitar cada classe, pelo contrário, este tipo de classificação forma um espectro contínuo. As transições de uma classe para outra dão-se numa pequena gama de valores, podendo levar à confusão da classificação de um dado sistema produtivo quando este se situa numa posição intermédia entre duas classes.

2.3.2 Classificação dos sistemas de produção para o setor da construção civil

À semelhança com outros setores, na construção civil também podem ser identificados diferentes tipos de sistemas de produção tendo por base fatores que caracterizam e determinam as diferentes classificações. De modo a satisfazer os diferentes segmentos do mercado e as necessidades dos clientes, a fim de, garantir uma excelente posição no mercado e colocar à disposição do consumidor produtos a níveis planeados e desejados, é necessário ter em consideração fatores específicos deste tipo de setor tais como o nível de construção *off-site*, isto é, a capacidade de efetuar grande parte do processo de construção fora do respetivo local de construção, o nível de standardização, a variedade e o volume de produção.

Segundo Jonsson & Rudberg (2014), pode-se classificar os sistemas de produção para a construção civil em quatro classes distintas, sendo elas: construção convencional (*onsite*), pré-asmblagem não volumétrica, pré-asmblagem volumétrica e construção modular.

Na Figura 5 encontram-se representadas as quatro classes, estando estas ordenadas em função do grau de construção *offsite* e o grau de standardização e volume de produção.

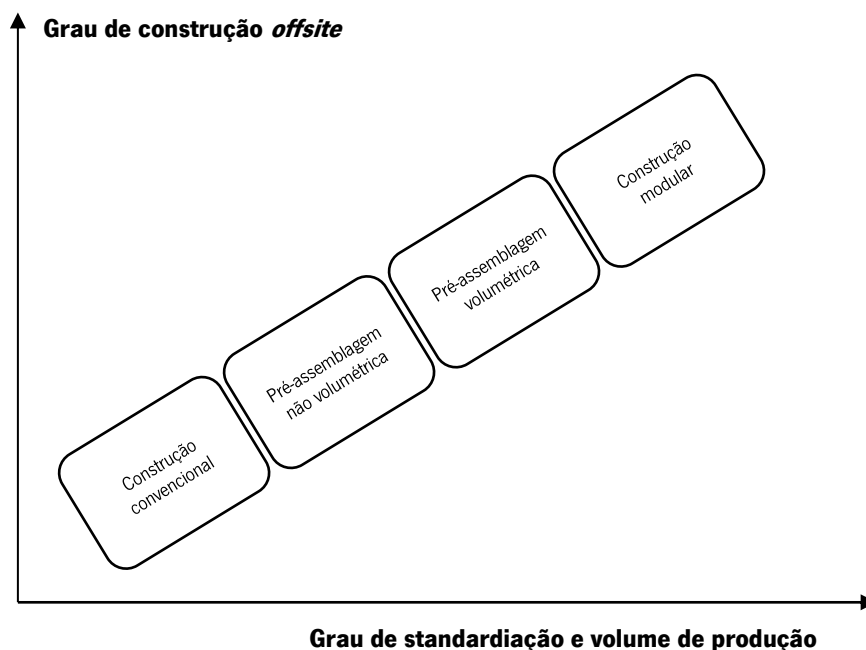


Figura 5 - Classificação dos sistemas produtivos para a construção civil adaptado de (Jonsson & Rudberg 2014, p56)

No extremo inferior da representação gráfica encontra-se a construção convencional. Este tipo de sistema de produção é caracterizado pelo baixo grau de construção *offsite*, isto é, a maior parte das atividades que acrescentam valor ao produto são realizadas no local de construção, e também pelo reduzido grau de standardização e volume de produção. Transpondo este tipo de sistema de produção para a classificação convencional, anteriormente mencionada, podemos afirmar que a construção convencional é um tipo de produção por projeto, uma vez que, existe a produção de vários tipos de produtos distintos, mas com um reduzido número de exemplares do mesmo tipo.

Imediatamente a seguir, encontram-se as classes da pré-asmblagem não volumétrica e pré-asmblagem volumétrica. Estas duas classes diferem uma da outra, uma vez que, na pré-asmblagem volumétrica são produzidos *offsite* partes específicas dos edifícios como por exemplo, casas de banho e duchas. Por outro lado, na pré-asmblagem não volumétrica os produtos são também produzidos *offsite*, mas estes apenas integram a estrutura dos edifícios, como por exemplo, paredes e sistemas de aquecimento. Apesar do volume de produção destes dois tipos de sistema de produção ser semelhante, a pré-asmblagem volumétrica apresenta níveis de standardização e construção *offsite* superiores à pré-asmblagem não volumétrica (Jonsson & Rudberg, 2014).

Por fim, na extremidade superior encontra-se representada a construção modular. Este tipo de sistema de produção pode ser caracterizado pelo seu elevado grau de construção *offsite*, uma vez que, a maior parte das atividades são realizadas em fábricas específicas que produzem os módulos. No local apenas

são realizadas as atividades de junção dos módulos e pequenos acabamentos. Uma das limitações apontadas a este tipo de sistema de produção é o facto de existir um limite de variedade de produtos, o que afasta os consumidores que pretendem personalizar integralmente a sua construção.

Segundo os mesmos autores, podemos associar a cada sistema produtivo pontos fortes e pontos fracos de acordo com os requisitos dos clientes em termos de tempo de entrega, custo, qualidade, execução, flexibilidade e inovação. Ao nível da execução, flexibilidade e inovação, os autores destacam a construção convencional e pré-asmblagem não volumétrica como os sistemas produtivos onde estas características representam os pontos mais fortes. Pelo contrário, o tempo de entrega, os custos e a qualidade representam os pontos mais fortes da pré-asmblagem volumétrica e da construção modular (Jonsson & Rudberg, 2014).

2.4 Configurações Genéricas de Sistemas de Produção

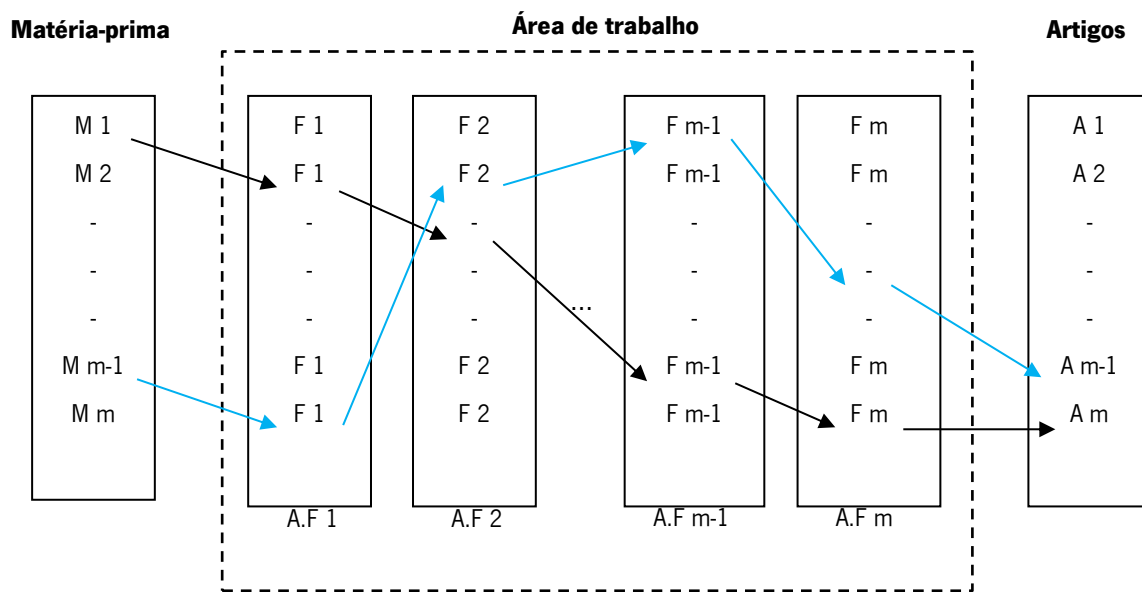
Na secção anterior fez-se a classificação dos sistemas de produção tendo em conta fatores como a complexidade, customização, grau de construção *offsite*, grau de standardização e grau de volume de produção, contudo, apesar das classificações acima mencionadas, podemos distinguir os sistemas de produção em duas classes genéricas: Sistemas de Produção Orientados à Função (SPOF) e Sistemas de Produção Orientados ao Produto (SPOP). Destas duas classes pode-se distinguir três subclasses tendo em conta a natureza da sua implantação: Linhas, oficinas e células de produção, sendo que, as células de produção podem tomar a configuração de linhas ou oficinas de produção ou, num outro caso, podem assumir um formato híbrido entre estas duas subclasses. As linhas e células de produção, em regra, são consideradas SPOP uma vez que, como mencionando anteriormente, é característico destas implantações a produção de uma variedade reduzida de artigos que partilham um processo semelhante, regendo-se pelos fluxos de materiais para dispor os equipamentos. As oficinas de produção, pelo contrário são consideradas SPOF uma vez que é característico deste tipo de implantação a produção de uma grande variedade de artigos. Nesta configuração genérica de sistemas de produção, os equipamentos estão agrupados por secções funcionais, ou seja, diversos equipamentos equivalentes estão dispostos numa mesma área funcional. Neste caso o fluxo de produção segue a disposição dos equipamentos (Alves, 2007).

2.4.1 Sistemas de Produção Orientados à Função (SPOF)

Setores de produção que exijam a necessidade de produzir um leque grande de artigos cujos seus roteiros de fabrico são parcialmente ou totalmente independentes uns dos outros, requer do sistema de

produção uma flexibilidade enorme para lidar com tal diversidade e complexidade operatória. Posto isto, para dar resposta a tal diversidade de artigos foram criados sistemas de produção que se encontram organizados por áreas funcionais, isto é, áreas específicas para a realização de uma determinada função fabril. Este tipo de sistemas de produção apresentam uma implantação funcional.

Na Figura 6 está representado o esquema de um SPOF. Pode-se constatar, diferentes produtos apresentam roteiros de fabrico distintos. Tipicamente a produção nestes sistemas de produção encontra-se organizada em lotes de reduzidas unidades ou até mesmo em lotes de unidades únicas.



A.F. i: Área Funcional i **A. i:** Artigo i **F. i:** Função i **M. i:** Matéria-prima i

Figura 6 - Configuração genérica Sistema de Produção Orientado à Função adaptado de (Alves 2007, p30)

Como consequência deste tipo de arranjo operacional, característico deste tipo de sistemas de produção, é frequente a existência de fluxos inversos motivados pela necessidade de execução de tarefas em diferentes áreas funcionais em sequências diferentes do arranjo operacional implantado. Apesar de, regra geral, a sequência de operações de fabrico de cada artigo estar organizada consoante o arranjo das áreas funcionais para diminuir a existência de fluxos inversos, existe porem, certas ocasionais onde tal sincronismo não é possível de garantir. A conjunção de todos estes fatores mencionados conduz à ineficiência deste tipo de sistemas produtivos levando muitas das vezes ao atraso das entregas ao cliente, longos tempos de atravessamento, elevados trabalhos em curso, dificuldade na previsão, controlo e identificação de matérias consumidas e tempos de produção imprevisíveis (Alves, 2007).

Tendo em consideração os paradigmas atuais de consumo, e consequentemente, os paradigmas atuais de produção, este modelo há muito que caiu em desuso por grande parte das empresas, uma vez que,

para garantir os mínimos de eficiência exigidos atualmente seria necessário manter *stock* de produto acabado tendo por base a previsão da procura, o que apenas seria possível para situações de procura repetitiva e de pequena variedade de artigos.

Apesar de todas as desvantagens agora mencionadas, os SPOF, teoricamente, apresentam uma vantagem em relação aos SPOP na medida em que podem produzir quaisquer artigos que partilhem as suas necessidades de fabrico com as áreas funcionais do sistema produtivo. Para garantir tal vantagem seria necessário planear o momento exato de utilização de cada área funcional para os diferentes artigos, uma vez que, se tal utilização ocorresse ao mesmo tempo, o sistema ficaria sobrecarregado, aumentaria os tempos de espera e criaria congestionamentos de fluxos produtivos. Posto isto, foram desenvolvidos arranjos que promovem a distribuição das diversas máquinas por áreas estratégicas da fábrica, não mais existindo a simbiose entre as áreas funcionais e as suas respetivas máquinas, criando assim a aptidão de formar fluxos contínuos de produção (Alves, 2007).

2.4.2 Sistemas de Produção Orientados ao Produto (SPOP)

Os sistemas de Produção Orientados ao Produto (SPOP) são caracterizados pela dedicação à produção de um ou um leque reduzido de artigos similares através da interligação de recursos de produção que atuam coordenadamente em todas as fases de produção. Tais recursos podem assumir configurações de célula ou linha de produção quando se trata de artigos simples ou processos de montagem final de artigos mais complexos. Por outro lado, quando equacionamos a produção de artigos mais complexos o sistema assume uma configuração interligada e coordenada de conjunto de células. Em comparação com os SPOF, os sistemas de Produção Orientados ao Produto demonstram uma clara vantagem ao nível do controlo e da complexidade dos fluxos produtivos, o que se traduz, numa maior eficácia e eficiência destes sistemas produtivos. Na Figura 7 encontra-se representado uma ilustração de um SPOP.

De acordo com a explicação anteriormente dado sobre a definição de SPOP, a Figura 7 demonstra na prática a configuração implantada deste tipo de sistemas de produção. Como podemos verificar o sistema de produção é constituído por vários subsistemas, cada um dos quais composto por diversos postos de trabalho responsáveis pela execução de todas as fases de fabrico de um produto ou um leque reduzido de produtos caracteristicamente idênticos. É possível verificar também que, por existirem subsistemas responsáveis pela produção de um produto ou um conjunto de produtos similares, denominado de células de produção, os fluxos de produção entre os postos de trabalho passam a ser contínuos não se verificando o cruzamento ou a transposição de fluxos de produção entre os diferentes subsistemas de produção.

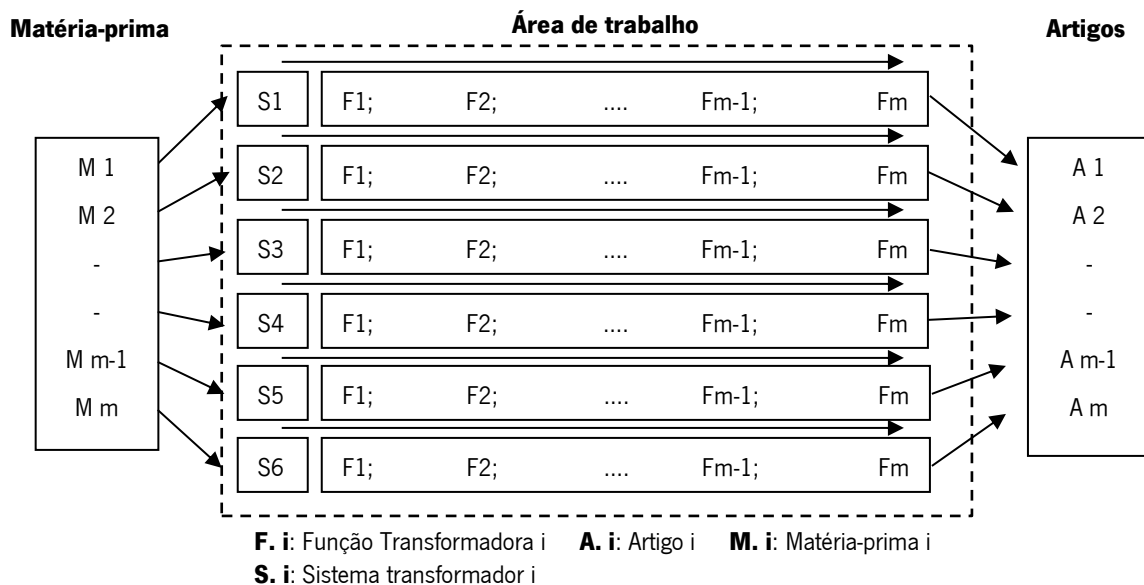


Figura 7 - Configuração genérica Sistema de Produção Orientado ao Produto adaptado de (Alves 2007, p33)

Uma vez que, por conta da globalização, a troca de recursos disponíveis entre sistemas de produção está mais facilitada, e para garantir que os SPOP conseguem acompanhar o ritmo de mudança de requisitos do mercado bem como da constante diminuição dos tempos de entrega, é essencial retirar partido de tal globalização alocando trabalho a todos os recursos disponíveis através da utilização de recursos disponíveis no mercado local ou até mesmo, global. A solução para a utilização dos recursos disponíveis localmente ou globalmente passa pela subcontratação de processos de fabrico o que permite por um lado a reconfiguração do sistema de produção virtualmente, uma vez que o sistema de produção passa incluir recursos que não estão nas instalações de fábrica, e por outro lado alarga o leque de produtos produzidos (Alves, A.C., Silva, S.C., Lima, R.M., 2003).

2.5 Configurações Conceptuais de SPOP

Segundo Alves, A. C. (2007), as diferentes orientações dos fluxos de produção, identificáveis dentro das células de produção que compõem os sistemas de produção orientados ao produto, permitem distinguir diferentes configurações conceptuais destes sistemas. Assim sendo podemos identificar dois tipos de configurações conceptuais sendo elas: configurações básicas e configurações não básicas.

As configurações básicas são caracterizadas pela sua independência no que concerne à produção integral de produtos por elas produzidos, ou seja, este tipo de configuração apresenta características de autonomia produtiva e independência no que toca à necessidade partilha de recursos transformadores.

Pelo contrário quando estamos perante células de produção que não apresentam tal autonomia nem capacidade para realizar todas as etapas necessárias para a produção dos produtos a elas alocadas sendo necessário a partilha de recursos com outras células de produção, podemos afirmar que estamos perante uma configuração conceptual não básica.

2.5.1 Configurações conceptuais básicas

Como referido anteriormente, os SPOP são constituídos por células de produção, sendo que, estas podem assumir configurações de linhas de produção quando os fluxos de produção são diretos, restringindo a ordem de acesso aos diferentes postos de trabalho. É obrigatório desta configuração a passagem por todos os postos de trabalho para o fabrico dos respetivos produtos. Este tipo de células de produção são designadas por células de fluxo direto (CFD). Pelo contrário quando existem fluxos inversos nas células de produção, o que permite uma ordem não restrita de acesso aos postos de trabalho, designamos as respetivas células de produção por células de fluxo inverso (CFI).

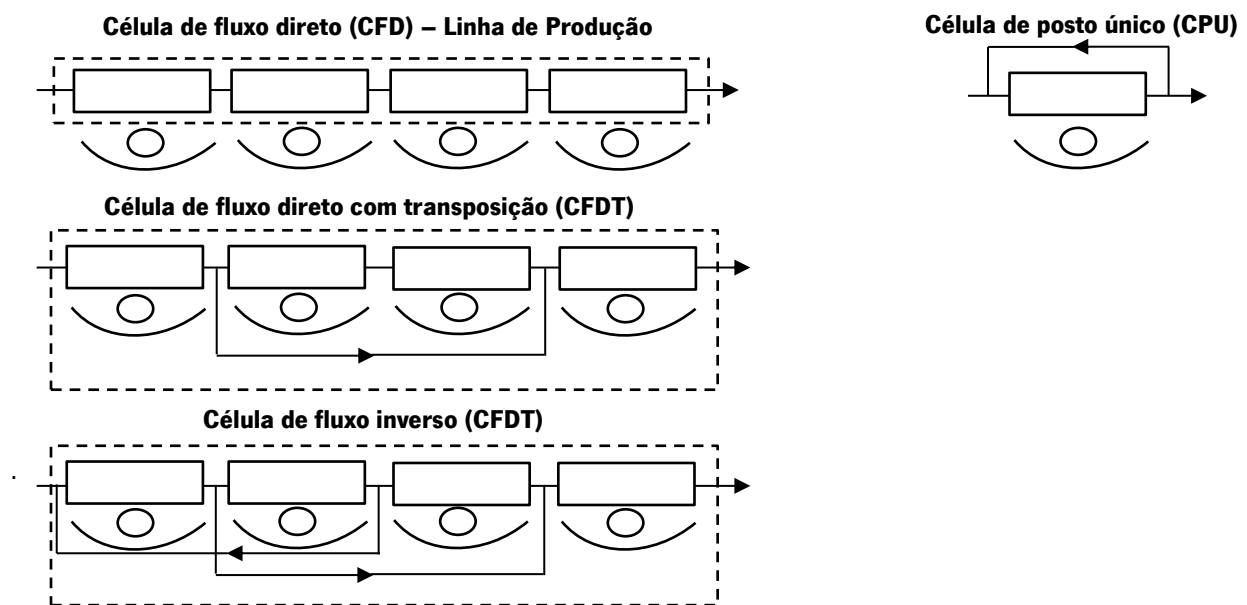


Figura 8 – Representação de Células Conceptuais Básicas adaptado de (Alves 2007, p51)

2.5.2 Configurações conceptuais não básicas

A independência total das células de produção nem sempre é possível uma vez que quando o processo produtivo é complexo e requer a utilização de máquinas por vezes demasiado dispendiosas é necessário recorrer à partilha de recursos entre células de produção e/ou começar ou acabar partes do processo produtivo em diferentes células de produção, o que se traduz na formação de ligações dependes entre

células de produção para possibilitar a conclusão do processo produtivo de um produto. Posto isto, podemos classificar estas duas situações de partilha de recursos como células híbridas, quando partilham um posto de trabalho, ou células partilhadas quando existe a necessidade de partilha de parte das células de produção.

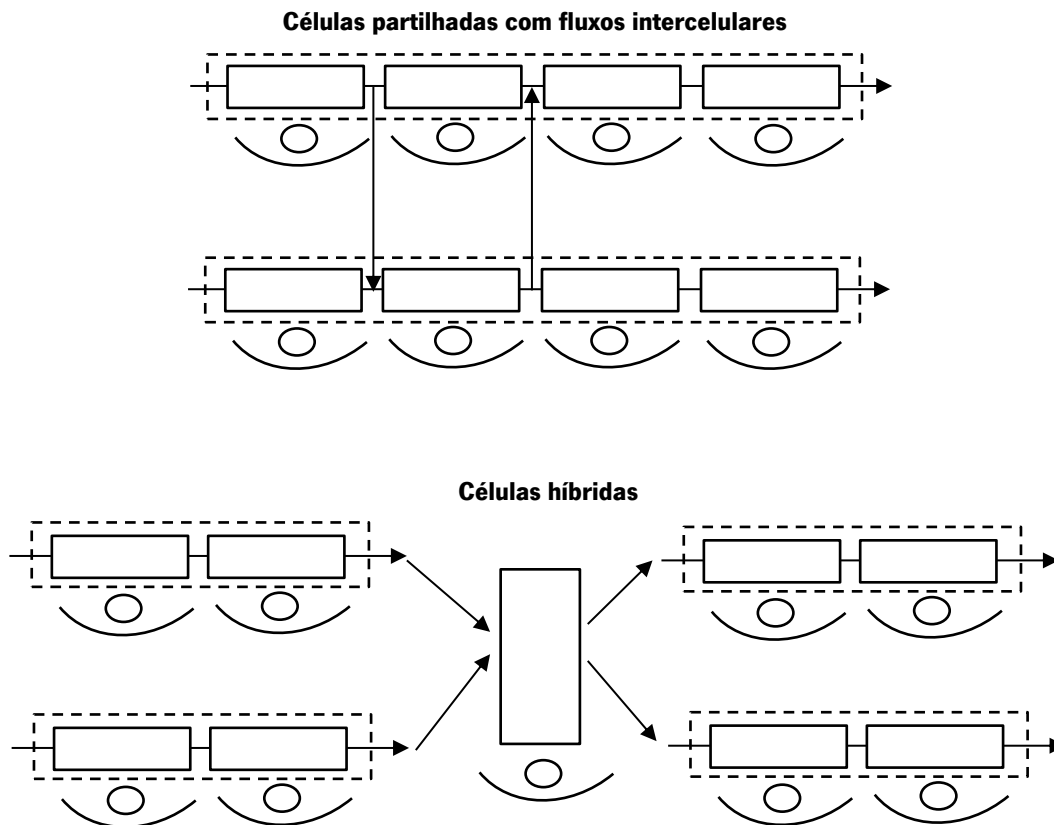


Figura 9 - Representação de células partilhadas e células híbridas adaptado de (Alves 2007, p52)

Da análise da representação das duas configurações conceptuais não básicas representadas na figura 9, é notória a clara diferença entre células híbridas e células partilhadas com fluxo intercelular. De notar que nas duas situações os arranjos conceptuais promovem a minimização dos custos de operação aumentando a eficiência das máquinas e dos fluxos de produção.

2.6 Layouts de Sistemas de Produção

O planeamento do chão de fábrica pode ser visto como uma etapa primordial do desenvolvimento de um sistema produtivo. Por meio deste processo estrutural são desenvolvidos *designs* orientados a sistemas de produção tendo em conta os bens ou serviços pretendidos. É de igual forma planeado toda a infraestrutura associada ao sistema produtivo para, de forma eficaz, entregar ao mercado produtos

altamente competitivos e de elevada qualidade. Durante este processo construtivo, o *design* do *layout* do chão de fábrica pode ser considerado um dos passos mais importantes de todo o processo de planeamento uma vez que, condiciona todas as etapas seguintes e em casos extremos, poderá ditar o sucesso ou insucesso de todo o negócio (Süße, M., & Putz, M., 2021).

Posto isto, o *layout* ou a implantação de um sistema produtivo é, de uma forma sucinta, a disposição dos espaços e equipamentos no chão de fábrica. A correta disposição dos elementos constituintes do sistema produtivo, isto é, máquinas, locais de cargas e descargas, armazéns, etc., é um fator determinante para o alcance de fluxos de produção contínuos, minimização de distâncias percorridas, maior flexibilidade do sistema produtivo entre outras, o que se traduz diretamente em elevadas taxas de produtividade.

Em 1979, Hitomi K. desenvolveu um gráfico que demonstra a relação entre número de diferentes produtos produzidos e a quantidade produzida, ordenando os produtos por ordem decrescente de quantidade. Por meio desta relação é possível identificar três tipologias de *layout*/implantação, sendo elas: implantação por produto, implantação por célula e implantação por oficina.

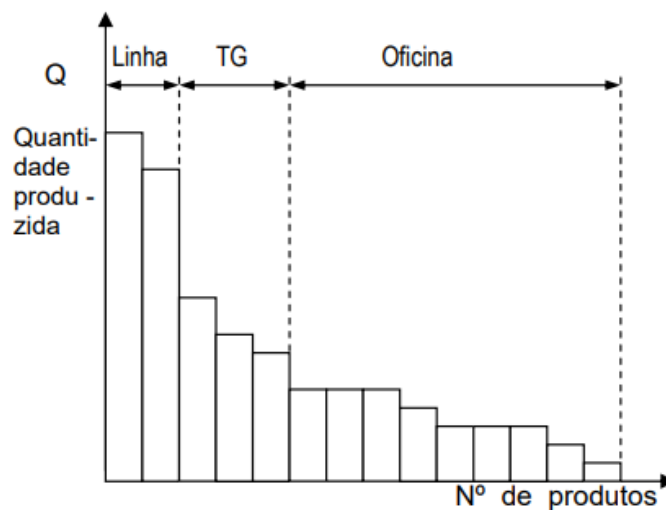


Figura 10 – Gráfico Família de Produtos/Quantidade Produzida (Carvalho 2008, p3)

À luz dos paradigmas de produção atuais, quando perante rácios elevados de Q/P , em que Q é quantidade e P é a gama de produtos, podemos afirmar que se justifica optar por um *layout* em linha, ou seja, as disposições dos elementos produtivos seguem o plano de fabrico dos produtos em causa evitando cruzamentos de fluxos, transposições de postos de trabalho e sobrecarga de postos de trabalho. No extremo oposto, quando perante pequenos rácios de Q/P , o autor afirma que deverá ser adotado

layouts em oficina, onde as máquinas do mesmo tipo estão dispostas no mesmo local no chão de fábrica, contudo, tendo em consideração os novos modelos de negócio, a evolução do mercado, o aumento da concorrência e a evolução das tecnologias, este tipo de *layout* caiu em desuso uma vez que características como flexibilidade e agilidade desaparecem neste tipo de *layout*. Assim sendo, podemos afirmar que, tendo em consideração os padrões de produção atuais e futuros, faz sentido distinguir duas tipologias de *layouts*: **layouts orientados ao produto** e **layouts orientados ao processo**. São designados *layouts* orientados ao produto as células e linhas de produção uma vez que, a decisão da disposição dos elementos transformadores é tomada em função das necessidades do produto. Designam-se *layouts* orientados ao processo, as oficinas de produção visto que, a disposição dos equipamentos dá-se em função do tipo de máquina, agrupando as mesmas tipologias de máquinas no mesmo local.

2.6.1 *Layout* por produto – Linha de produção

Esta tipologia de sistemas de produção é caracterizada pela utilização de equipamentos altamente especializados com a distribuição espacial destes mesmos equipamentos projetada com o objetivo de produzir um pequeno leque de produtos, ou até mesmo um único produto. Nesta tipologia de produção, o processo produtivo é dividido numa série de pequenos trabalhos que devem seguir, escrupulosamente uma sequência pré-definida.

A primeira abordagem e o desenvolvimento deste tipo de implantação foi realizada pelo engenheiro mecânico e fundador da famosa linha de produção do modelo T, Henry Ford, conhecido pela sua célebre frase: “Quanto ao meu automóvel, as pessoas podem tê-lo em qualquer cor, desde que seja preta!”. Da análise desta expressão concluímos que, este tipo de implantação apenas é favorável à produção de gamas únicas ou muito reduzidas de diferentes produtos.

É de salientar que, podemos identificar como vantagens desta tipologia o alcance de elevada produtividade e elevadas taxas de produção, contudo, é abdicada a flexibilidade de produção de outros produtos, o que se traduz numa desvantagem desta implantação.

Podemos indicar como exemplo atual deste tipo de *layout*, as linhas de produção de componentes automóveis. Para a produção deste tipo de produto, e uma vez que a ordem de grandeza de produção situa-se nos milhares, as linhas de produção são desenhadas e concebidas em exclusivo para um determinado produto, sendo desmanteladas ou reconfiguradas para a produção de outro tipo de produto. É característico deste tipo de *layout* a elevada automatização de processos, sendo por vezes apenas necessário a intervenção humana no início e fim do processo.

2.6.2 *Layout* por produto - Células de produção

As células de produção, que inicialmente eram conhecidas por Tecnologias de Grupo, representadas no gráfico da figura 10, são um tipo de implantação que poderão assumir configurações em linha, em U entre outras e, geralmente são caracterizadas pela produção de quantidades intermédias de um leque também intermédio de produtos. Os produtos com características similares e com requisitos tecnológicos idênticos são agrupados em famílias de produtos que posteriormente são processados por um grupo de máquinas dedicadas a essa família de produtos.

Este tipo de implantação retira partido das vantagens inerentes às linhas de produção como por exemplo a redução do WIP, redução dos tempos de processamento e de percurso sem, porém, comprometer a sua flexibilidade e rapidez na alteração de produtos.

Em comparação às oficinas de produção, as células de produção apesar de partilharem algumas características, distinguem-se destas pela positiva uma vez que a distância percorrida pelos produtos é encurtada, visto que apenas se deslocam dentro da célula de produção.

2.6.3 *Layout* por processo – Oficina de produção

Neste tipo de implantação, os equipamentos seguem um arranjo físico funcional, ou seja, cada área de trabalho está agrupada por funções e dispõem de recursos transformadores similares. Este tipo de implantação é, geralmente, utilizado em sistemas produtivos onde a gama de produtos diferentes é elevada e a quantidade produzida é pequena. Uma vez que as necessidades de recursos diferem de produto para produto e tendo em consideração o arranjo espacial deste tipo de implantação, as entidades devem fluir de setor para setor consoante as suas necessidades promovendo situações de fluxos cruzados de produção e baixas taxas de ocupação, conduzindo a baixas taxas de produção e baixa produtividade. É de salientar também que por norma, está associado a este arranjo espacial baixos níveis de automatização dos processos constituintes do sistema produtivo. Por outro lado, é característica positiva deste tipo de implantação a elevada flexibilidade e a boa formação e polivalência dos operadores. Dado o panorama atual da indústria e das necessidades do mercado e tendo em consideração que apesar da flexibilidade deste sistema, existem desvantagens como o excesso de trabalho em processamento (*work in progress*) e os elevados tempos de *setup*, este tipo de implantação está cada vez mais condenado ao abandono por parte das empresas.

3. CONSTRUÇÃO MODULAR

O setor da construção civil ocupa uma posição de relevo na nossa sociedade e economia mundial, de facto, tem a capacidade de moldar o nosso planeta.

Das nossas casas aos locais de trabalho, das infraestruturas hospitalares, escolares, públicas até às infraestruturas rodoviárias, dos restaurantes aos edifícios de lazer e convívio social, a indústria da construção tem um impacto fundamental no desenvolvimento da nossa sociedade (Liew et al., 2019).

Durante décadas, a forma como construímos permaneceu praticamente inalterável, por vezes estagnada em situações extremas. Continua-se a utilizar os mesmos materiais e processos. Continua-se a desenvolver e construir edifícios no local da sua construção. Mobiliza-se mão-de-obra, maquinaria e matéria-prima para o local de construção despendendo, por vezes, grandes quantias monetárias com atrasos e mão-de-obra parada aguardar material e em certos casos, desesperados com as condições climáticas instáveis e dependentes do meio envolvente ao local de construção. São diversos os fatores que podemos destacar que contribuem para a diminuição de *performance* do paradigma atual do setor da construção, tais como:

- Baixa produtividade;
- Previsões insignificativas;
- Fragmentação estrutural;
- Fragmentação dos órgãos de gestão;
- Baixas margens e fragilidade financeira;
- Financiamento disfuncional;
- Baixos níveis de mão-de-obra;
- Falta de colaboração e melhoria da cultura empresarial;
- Ausência de investimento na inovação e na pesquisa e desenvolvimento;
- Má imagem do setor da construção.

Contudo, os primeiros passos para a industrialização do setor da construção civil há muito foram dados, e graças aos pioneiros que desenvolveram o conceito de fabricação de estruturas ou parte delas fora dos seus locais finais de construção, permitiram que se instalasse a mudança na cultura empresarial do setor da construção civil. Esta mudança permitirá acomodar as necessidades de uma sociedade em rápida expansão, ciente dos seus objetivos e cada vez mais, preocupadas com o desenvolvimento de indústrias mais sustentáveis e amigas do ambiente.

Mas poderão de facto estes novos conceitos introduzir melhorias significativas no setor de forma a transformar por completo a maneira de construir? Sim, são diversos os benéficos que estes novos conceitos e metodologias de construção entregam ao setor tais como a melhoria da qualidade final, a diminuição do tempo de construção, diminuição dos gastos de fabrico, aumento da produtividade e paralelamente, contribuem também para a resolução dos problemas com falta de qualificação apropriada e controlo das crises do mercado imobiliário.

O principal objetivo da construção modular e de todas as suas variantes centra-se em aproximar, sempre que possível, os processos de desenvolvimento e construção a pensamentos e metodologias *offsite*, permitindo controlar e eliminar os desafios associados à construção *onsite* e migrar os processos de construção para condições de trabalho previsíveis e controladas.

Por via destas novas correntes de pensamento é possível desenvolver economias de escala através de linhas de produção que adotam sistemas autónomos de produção e elementos standardizados. A utilização de equipas dedicadas à produção repetitiva de elementos pré-fabricados, sempre sobre as mesmas condições de trabalho, permite aumentar a produtividade, melhorar a qualidade e reduzir substancialmente o tempo de entrega.

3.1 Conceito

A construção modular é um método de construção que utiliza módulos tridimensionais pré-fabricados para construção de edifícios. Estes, quando assemblados no local de construção, refletem o *design* e as especificações pretendidas de igual modo aos projetos desenvolvido *on-site*. Os módulos são fabricados *off-site*, em fábricas altamente dedicadas e tecnologicamente avançadas, sempre sobre as mesmas condições de fabrico e seguindo os padrões convencionais de construção com a particularidade da redução do tempo de construção.

Assente sobre princípios base como a standardização, padronização de métodos, perfeição, redução de desperdícios, eficácia, aumento da produtividade e qualidade, entre outros, a construção modular tem como principais objetivos a redução do tempo de entrega e dos custos de construção, a diminuição dos riscos associados à obra e o aumento da sustentabilidade do setor, sem nunca descorar princípios básicos como qualidade e as necessidades do cliente.

Tal como abordado no capítulo 2 desta dissertação, a indústria da construção modular ou também apelidada de construção *off-site*, assume diversas configurações para além da construção com base em módulos. Segundo C.Goodier & A.Gibb (2007), pode-se identificar 4 tipologias de construção *off-site*:

Fabrico de componentes e subasseblagem

Nesta configuração, o processo de construção *off-site* dá-se através da produção de componentes e equipamentos estruturais de pequenas dimensões, em relação ao projeto final, em fábricas especializadas e posteriormente são enviados para o local de construção apenas e sempre que necessário. *Kits* de chaminés pré-moldadas, treliças de telhados, caixilharia em geral ou até mesmo pavimentos são alguns dos exemplos mais utilizados nesta tipologia uma vez que funcionam perfeitamente em paralelo com os métodos convencionais C.Goodier & A.Gibb (2007).

Pré-asseblagem não volumétrica

Este sistema, também conhecido por sistema de painéis (*panelides system*), consiste na produção *off-site* de painéis estruturais que posteriormente são enviados para a obra para formarem estruturas tridimensionais.

Esta tipologia tem ganho terreno na indústria da construção em comparação aos sistemas modulares uma vez que apresenta maior flexibilidade na concessão de diferentes tipos de design e menores custos de transporte em comparação aos sistemas modulares. Regra geral, os painéis são fabricados em madeira ou em LSF (*light steel frame*).

Segundo Tayler S. (2009), existem duas principais tipologias de painéis, sendo elas:

- 1. Painéis abertos:** nesta tipologia os painéis são enviados para obra com todos os componentes montados e prontos a serem instalados, com a exceção dos elementos de revestimento dos componentes estruturais, ficando esta etapa para ser concluída no local de construção;
- 2. Painéis avançados:** painéis com os seus componentes totalmente instalados e acabados. São encaixados em estruturas pré-montadas e podem incluir janelas, portas, acabamento exterior e interior eliminando da obra, todas as tarefas de acabamento C.Goodier & A.Gibb (2007).

Pré-asseblagem volumétrica

Elementos volumétricos fabricados em ambiente fabril e posteriormente enviados para o local de construção. Em geral, constituem espaços uteis das habitações como casas de banho, cozinhas, lavandarias etc e são enviados para obra completamente finalizados no seu interior C.Goodier & A.Gibb (2007).

Sistemas modulares

Os sistemas modulares ou volumétricos, tal como referido neste capítulo, são unidades tridimensionais (módulos) produzidos em fábrica e totalmente equipados antes de serem

transportados para o local de construção e empilhados em alicerces previamente construídos para os acomodar e formarem habitações C.Goodier & A.Gibb (2007).

3.2 Tipologias, Configurações Estruturais e Componentes Base

Conceitos como flexibilidade, mobilidade e agilidade estão inerentemente associados à construção *Off-Site*, mais particularmente à sua variante mais extrema, a construção modular, uma vez que, é característico desta modalidade a facilidade de transporte dos módulos entre fabrica e local de construção, a realocação dos módulos e a flexibilidade no que concerne à expansão do edifício adicionando ou subtraindo módulos. Contudo, é importante salientar que a construção modular não é uma construção móvel e a sua característica de mobilidade não se deve à capacidade de se deslocar, mas sim à capacidade de transporte e fácil montagem.

Posto isto, podemos classificar a construção modular em duas tipologias distintas tendo em conta o seu destino final, sendo elas: construção modular permanente e construção modular temporária.

A construção modular permanente é um tipo de construção que integra na sua constituição módulos pré-fabricados que podem constituir soluções autónomas, quando constituídas por um módulo totalmente acabado e pronto a utilizar, ou soluções agregadas quando o edifício é finalizado no local através da agregação de vários módulos. É característica particular desta tipologia o facto de se apresentar fixa ao local onde está implantada, contendo fundações e ligações às redes de infraestruturas urbanas. A construção modular temporária é caracterizada pelo seu carácter de reutilização e reaproveitamento dos seus módulos. Estes são transportados para um determinado local para colmatar uma necessidade temporária e específica. É comum a utilização desta tipologia de construção em hospitais, escolas, escritórios entre outros onde existe uma grande necessidade de entrega, realocação e flexibilidade.

Relativamente às configurações estruturais, segundo Mark Lawson (2007), podemos classificar as estruturas modulares em dois sistemas genéricos de acordo com a distribuição vertical de cargas, sendo eles: **4 sided modules** – as cargas verticais são distribuídas ao longo das paredes; **Open sided** – as cargas verticais são distribuídas ao longo dos pilares de canto dos módulos. No seguimento destes dois sistemas genéricos, podemos ainda identificar mais três tipologias de sistemas: **Partially open-sided modules**, **Mixed modules** e **Módulos suportados por uma estrutura primária**.

3.2.1 4 sided modules

Neste sistema de construção, as cargas verticais são transferidas por via das 4 paredes do módulo. Estes são assemblados recorrendo á utilização de painéis 2D pré-fabricados. O processo de assemblagem iniciasse, geralmente, pela fabricação do chão, de seguida as paredes e os tetos são acoplados ao chão através de elementos de fixação. Os módulos têm dimensões compreendidas entre os 3 a 3,6 metros de largura e 6 a 10 metros de comprimento. A altura dos módulos poderá variar conforme restrições mecânicas dos materiais utilizados e restrições impostas pelo sistema de transporte. É prática usual a utilização destes módulos para a edificação de hotéis, residências universitárias ou residências familiares.



Figura 11 - Representação gráfica de um módulo **4 sided**
(Fonte: www.permitadvisors.com)

3.2.2 Open sided

Nesta tipologia de construção, os módulos utilizados são totalmente abertos nas suas laterais e as cargas verticais são transferidas até ao solo pelos pilares de canto. Esta característica apenas é alcançável graças à utilização de colunas reforçadas em aço de secção quadrada ou retangular permitindo a criação de espaços amplos ao colocar módulos lado a lado, perfeitos para utilização em hospitais ou escolas. A estabilidade dos módulos é conseguida através da colocação de tensores diagonais em forma de X nas paredes divisórias, quando estas existem.



Figura 12 - Exemplo de um módulo **Open Sided**
(Fonte: www.mgac.com)

3.2.3 Partially open-sided modules

Nesta tipologia de construção, muito semelhante aos *4 sided modules*, os módulos apresentam aberturas laterais o que permite formar áreas mais amplas em relação ao seu primogénito. Partilham o mesmo processo de produção e o comportamento estrutural é semelhante em ambos. A rigidez estrutural é alcançada utilizando vigas de canto rígidas e contínuas na cassetete do chão e são aplicados postes intermédios.



Figura 13 - Exemplo de um módulo **Partially open-sided**
(Fonte: www.vestamodular.com)

3.2.4 Mixed modules

Sistema de construção híbrido que combina módulos e painéis pré-fabricados no mesmo projeto. Os módulos de base podem ser acomodados lado a lado para formarem uma superfície de apoio a longos painéis de chão. Esta tipologia de construção é semelhante à *open sided* contudo, a carga aplicada às extremidades dos módulos é consideravelmente superior.

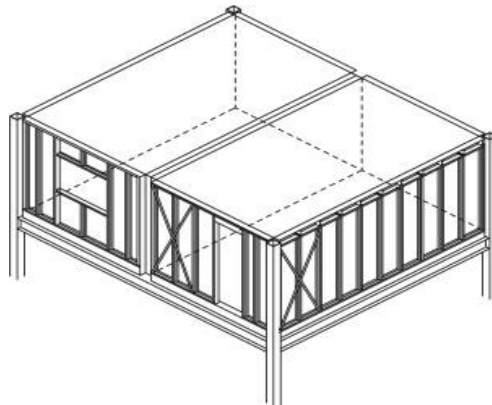


Figura 14 - Representação gráfica de uma construção híbrida
R.M. Lawson (2008)

3.2.5 Módulos suportados por uma estrutura primária

Nesta tipologia de construção, inicialmente é construída uma estrutura primária para acomodar os módulos. As colunas de suporte são instaladas ao longo da largura dos módulos e, geralmente, atingem um limite máximo entre 4 a 6 andares. A utilização de uma estrutura primária de suporte permite criar espaços amplos no piso inferior e subterrâneos, ideais para a construção de edifícios que conjugam espaços comerciais e residenciais (Lawson, 2007).

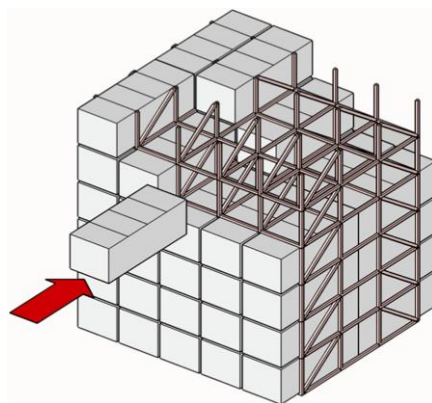


Figura 15 – Representação gráfica de uma construção modular com estrutura primária
Pasquale Di, et. al. (2020)

Como em todo e qualquer sistema produtivo de bens, as matérias-primas são os elementos base que abastecem as atividades transformadoras que originam os produtos finais de um determinado sistema produtivo. No setor da construção civil, materiais como a madeira, ferro e betão há muito que são utilizados nas mais diversas técnicas convencionais de construção. A madeira, material leve e moderadamente forte, é ideal para edifícios pequenos e de médio porte. Pelo contrário, o aço, material mais pesado, mas também mais forte, é utilizado em construções mais altas e complexas. Por último, o betão, material mais pesado do que os anteriores descritos, é ideal para a construção de fundações e estruturas reforçadas. Apesar das diferentes características dos materiais descritos, diferentes projetos requerem também diferentes materiais, e como tal, a aplicabilidade e necessidade de cada um é descrita consoante o projeto final pretendido.

À semelhança da construção civil convencional, a construção modular segue rigorosamente os mesmos fundamentos anteriormente descritos, com a particularidade do desenvolvimento e introdução de materiais tecnologicamente mais avançados, mas com origens da madeira, aço e betão.

3.2.6 Construções em Madeira

O uso da madeira na construção modular é sem dúvida a prática mais comum nesta tipologia de construção, de facto, são vários os autores que afirmam que este material e todos os seus derivados representam a maior parte das soluções nesta tipologia de construção. São inúmeros os benéficos da sua utilização, desde logo, a sustentabilidade ambiental, uma vez que, a madeira é um material orgânico, ecológico, reutilizável e facilmente reciclável. Para além desta característica, a madeira é um material fácil de manusear e maquinar com elevada precisão, possui uma propriedade térmica importante uma vez que não se expande com o calor, pelo contrário, adquire mais força quanto mais seca (Torres, 2010).

Existem duas aproximações distintas à industrialização da construção civil com o recurso à madeira, sendo elas a construção “painelizada” (técnica que utiliza painéis de madeira pré-fabricados para a construção de edifícios) e a construção modular (técnica que recorre à pré-fabricação de módulos para a construção de edifícios). A pré-fabricação de painéis de madeira consiste em fabricar partes do edifício como paredes, tetos ou chão, em madeira ou nos seus derivados. Apesar de representar uma redução de tempo de construção em relação às técnicas convencionais, a construção “painelizada” necessita ainda de diversos trabalhos a ser efetuados em obra. A outra abordagem à industrialização da construção com o recurso à madeira, e uma das técnicas que mais importa estudar no âmbito desta dissertação de mestrado é a construção modular em madeira. Tal como abordado nos capítulos anteriores, a construção modular em madeira consiste na pré-fabricação de módulos parcialmente ou totalmente acabados que



Figura 17 – Exemplo de um painel fabricado em CLT



Figura 16 – Exemplo de um módulo com estrutura em madeira

quando colocados lado a lado, ponta com ponta ou empilhados formam um edifício de configurações várias e estilos distintos consoante o layout de construção. Tipicamente, são utilizados neste tipo de construção materiais como vigas e colunas de madeira para a construção do esqueleto e derivados de madeira como contraplacado, OSB (*Oriented Strand Board*), MDF (*Medium Density Fiberboard*) entre outros para o isolamento e acabamento. Por outro lado, na “painelização” são utilizados materiais laminados de madeira como o CLT (*Cross-Laminated Timber*), o NLT (*Nail-Laminated Timber*), o DLT (*Dowel-Laminated Timber*) e o GLT (*Glue-Laminated Timber*) que diferem entre si apenas no método de junção das lâminas de madeira. Pelo facto de serem constituídos por lâminas de madeira sobrepostas entre si, estes componentes apresentam níveis de isolamento e rigidez estrutural elevados (Torres, 2010).

3.2.7 Construções em Aço Galvanizado

A par das técnicas convencionais, o aço também está presente na construção modular. Devido ao seu alto desempenho ao nível da rigidez estrutural, as construções em aço são tipicamente caracterizadas

por vão longos, desenhos geométricos exclusivos e edifícios altos. Um dos seus derivados mais utilizados na industrialização da construção civil quer seja pela “painelização” ou construção modular é o aço galvanizado. Apesar de partilhar a maior parte das vantagens com a construção em madeira, a construção em aço galvanizado destaca-se pelo seu elevado rácio resistência/peso o que permite projetar edifícios mais altos do que os projetados em madeira (Lawson & Grubb, 1999).

Este tipo de construção é tipicamente apelidado de construção LSF do inglês *Light Steel Frame*. Dissecando este termo, *Steel* remonta para a matéria-prima utilizada, o aço e *Light*, indica a sua principal característica, o peso reduzido, uma vez que, os perfis utilizados neste tipo de construção são fabricados através de chapa de aço galvanizada de espessura reduzida e enformados a frio em forma de C, o que lhes confere maior resistência à torção. Por último, *Frame* defini a essência desta tipologia, ou seja, o esqueleto estrutural composto por diversos perfis conectados entre si que passam a funcionar como um todo para suportar o edifício.



Figura 18 – Exemplo de um módulo com estrutura em LSF

3.2.8 Construções em Betão Pré-fabricado

O betão é um dos materiais mais utilizados na indústria da construção civil e consiste na mistura de cimento, areia e água passando por um período de cura até à obtenção do seu estado final de utilização. Sendo um dos materiais mais antigos no setor não poderia ficar fora da industrialização da construção, assim sendo, existe na atualidade sistemas construtivos que utilizam painéis e até mesmo módulos pré-fabricados em betão. A técnica para a obtenção destes produtos difere em muito das duas anteriormente descritas uma vez que, para a obtenção destes painéis e módulos é necessário recorrer à tecnologia de moldagem (Albarran, 2008). No longo termo, esta metodologia de construção demonstra ser

economicamente mais vantajosa em relação às técnicas convencionais de cofragem em betão uma vez que, os moldes utilizados podem ser reutilizados centenas de vezes. De facto, esta esta tipologia não é inovadora apenas evoluiu dos produtos pré-fabricados em betão há muito utilizados na construção civil como o caso de unidades tubulares de drenagem de águas, blocos de cimento, vigas entre outros. Apesar do seu peso excessivo, existe um esforço na comunidade para desenvolver novas técnicas mais leves com a introdução do poliestireno expandido para produzir painéis sanduiche o que permitirá aumentar o seu desempenho ao nível do isolamento térmico e permitirá projetar edifícios mais altos ou no limite, concorrer diretamente com a painelização de madeira ou LSF para o revestimento de fachadas.



Figura 19 - Exemplo de um módulo fabricado em Betão

3.3 Vantagens da adoção da Construção Modular

São inúmeras as vantagens da construção modular, contudo, e muito por causa do desconhecimento e falta de informação do tema, estas são por vezes negligenciadas uma vez que os métodos tradicionais são convenientemente aceites como os mais simplistas. É importante por isso, descortinar este tema para demonstrar as reais capacidades deste método de construção nas diferentes áreas abrangentes.

Um modelo triangular desenvolvido por Clancy (2016), demonstra os requisitos do mercado da construção habitacional e as consequências para o alcance dos mesmos. Clancy afirma que os principais requisitos da construção são a rapidez, a qualidade e o custo.

Nos vértices da pirâmide da figura 20 encontram-se os principais requisitos da construção e entre estes, os diferentes binómios possíveis de conjugação. É possível identificar que para o alcance de projetos com elevada rapidez e baixos custos, o requisito qualidade é posto em causa. Por outro lado, projetos com baixos custos e elevada qualidade veem o seu tempo de execução disparar. Por fim, e talvez o caso

mais comum na atualidade, para a realização de projetos com elevada qualidade e rapidez, os custos de execução são demasiado elevados.

A par destes três grandes requisitos da construção, podemos destacar mais três áreas, ou aspetos, a ter em consideração para a análise das vantagens da adoção da construção modular sendo elas: impactos ambientais, segurança e saúde no trabalho e flexibilidade.



Figura 20 - Modelo Triangular de requisitos da construção habitacional
Clancy (2016)

3.3.1 Custos

A construção modular permite reduzir os custos de produção em todas as fases do processo de construção devido à produção em massa e em ambiente controlado. Desde o início do processo até à sua conclusão, é perfeitamente perceptível a redução de custos que esta metodologia proporciona. Desde logo na fase de aquisição de materiais em que as necessidades são realmente estimadas, o que permite a redução de desperdícios com material adquirido inadequadamente. A redução dos gastos com mão-de-obra na fase de montagem do projeto e a eficiência de instalação dos módulos são também elas características que destacam, positivamente, esta metodologia de construção em relação aos métodos convencionais em termos de redução de custos. Devido às condições controladas do processo de produção em ambiente fabril, é naturalmente de esperar que a qualidade de construção aumente, reduzindo, por isso, as necessidades de intervenção com retrabalho. O aumento da produtividade devido à redução dos tempos inativos contribuiu diretamente para a redução dos custos indiretos do projeto refletindo-se positivamente na economia geral de custos (Shafai, 2012).

3.3.2 Tempo

Não é novidade que a padronização de processos e a standardização de materiais são fatores que contribuem para a redução de tempos de produção e para o alcance de economias de escala como é exemplo a economia de componentes automóveis. Tendo por base esta informação, e visto que existe um enorme esforço na tentativa de aproximar a indústria da construção modular com estas grandes economias de escala, é claramente previsível que o tempo de construção de edifícios modulares seja menor em relação às técnicas convencionais de construção (Clancy, 2016).

A característica da construção modular que mais evidencia esta redução do tempo é a simultaneidade de fases do projeto, ou seja, a fabricação dos módulos e a construção das fundações ocorrem em simultâneo, podendo reduzir até 50% o tempo de construção. Para além desta característica, a vantagem de produzir os módulos em fábrica permite mitigar os atrasos devidos às condições climáticas.

Na figura 21 estão representados os cronogramas da construção modular e da construção convencional.

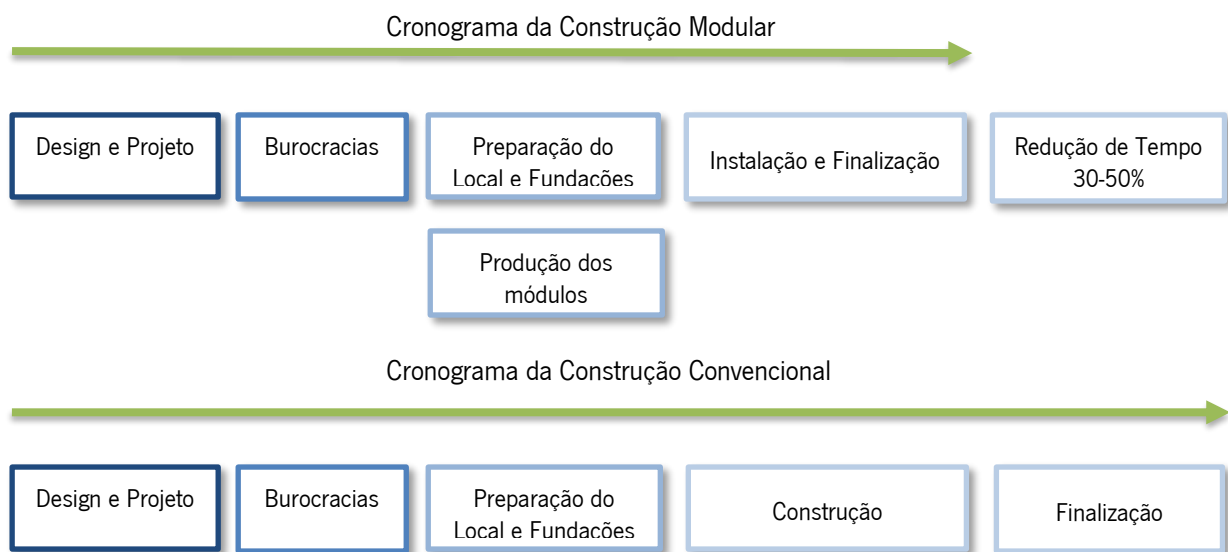


Figura 21 - Cronograma da Construção Modular vs Construção Convencional

3.3.3 Qualidade

Como em todo e qualquer processo produtivo, a qualidade final dos produtos produzidos é um dos pontos mais importantes, se não o maior a ter em consideração no momento de avaliar o desempenho de todo o processo produtivo. Aspetos como a satisfação dos clientes, redução de custos e vantagens competitivas apenas são passíveis de ser alcançadas quando os processos são acompanhados por metodologias e modelos que promovem a consciencialização e aumento da qualidade. É exemplo o modelo *Total Quality Management (TQM)*, ou Gestão da Qualidade Total, que tem como objetivos, garantir

a satisfação dos clientes, a promoção do trabalho em equipa, a procura constante pela perfeição integrando pessoas e máquinas (Clancy, 2016).

Sendo a construção modular um processo produtivo e os módulos os seus produtos, é importante destacar todos os aspetos da qualidade que diferenciam esta metodologia de construção das metodologias convencionais. Pode-se afirmar que os processos de fabrico na construção modular favorecem o alcance da qualidade visto que, os processos são separados em etapas à semelhança de outros processos produtivos em ambiente fabril. Após cada etapa, é realizada uma análise de conformidade e atestada a qualidade dos produtos. Destas análises são recolhidos dados de controlo que permitem avaliar o cumprimento das normas legais aplicadas consoante o mercado de destino, reduzindo as visitas aos locais de construção e consequentemente a redução dos custos com burocracias. A utilização de maquinaria mais sofisticada, como por exemplo sistemas de Controlo Numérico Computorizado (CNC), que trabalham com tolerâncias de milésimas e décimas de milésimo permitem assegurar o controlo das dimensões planeadas e garantir a uniformidade de todo o projeto. Por fim, o recurso ao auxílio de modelos 3D por meio da incorporação de *software* BIM (*Building Information Modeling*) ou Modelagem da Informação da Construção, permite antecipar possíveis futuros problemas e testar virtualmente componentes (Crotty, 2012).

3.3.4 Impactos ambientais

O setor da construção civil, apesar de todos os seus benefícios de carácter económico e social, como o desenvolvimento da economia global por via da comercialização de materiais imprescindíveis às atividades da construção e o desenvolvimento social com a criação de habitações de primeira necessidade proporcionando o desenvolvimento de sociedades e regiões, é considerado um setor altamente degradante e impactante no que concerne à preservação ambiental. Desde logo na extração de matéria-prima, sendo um dos setores responsável pela maior parte do consumo de minérios.

Um dos principais materiais do setor, o cimento, é responsável pela libertação de grandes quantidades de CO₂ para a atmosfera aquando do seu processo produtivo (Laruccia, M., 2014).

Um estudo publicado pela UKGBC (2014), associação do Reino Unido que visa transformar a maneira como construímos em prol do meio ambiente, afirma que cerca de 15% dos materiais de construção adquiridos são desperdiçados em encomendas em excesso ou danificados por mau acondicionamento em obra. O mesmo estudo afirma que por ano, o setor da construção produz cerca de 109 milhões de toneladas de resíduos.

Todos estes factos apresentados geram consternação na sociedade que se vê, cada vez mais, preocupada com o meio ambiente e as alterações climáticas provocadas, em parte por este setor, o que se traduz diretamente na necessidade de desenvolver alternativas mais sustentáveis que visem diminuir os impactos negativos para a sociedade e planeta.

A construção modular é uma alternativa segura e ecológica em relação às técnicas convencionais. A produção em ambiente fabril permite controlar, eficazmente, o consumo de materiais, recursos energéticos e a reciclagem dos resíduos. Uma das grandes vantagens desta técnica de construção para o meio ambiente é a redução do impacto direto na limpeza dos solos do ar e da água adjacentes ao local de construção. A diminuição do consumo de água em fabrico é também uma das características positivas da adoção deste tipo de construção. Todos estes fatores conjugados culminam na obtenção de casas mais amigas do ambiente e sustentáveis (Laruccia, M., 2014).

3.3.5 Segurança e Saúde no trabalho

A segurança e saúde no trabalho continua a ser umas das maiores preocupações para a prevenção dos riscos profissionais e promoção da saúde dos trabalhadores. Apesar dos avanços tecnológicos e do desenvolvimento de métodos que previnem a ocorrência de acidentes, o setor da construção civil apresenta por natureza elevados riscos associados a atividades perigosas como o trabalho em altura e a utilização de maquinaria pesada. A par disto, a negligência na utilização dos equipamentos de proteção individual por parte dos trabalhadores e a falta, por vezes, de fiscalização aliado a condições climatéricas adversas contribuem para que o setor da construção civil apresente elevadas taxas de acidentes de trabalho. Assim sendo, a adoção de técnicas de construção que promovem a migração de grande parte das atividades para meios controlados como o caso da construção modular, é uma das alternativas eficazes para combater os riscos associados à construção convencional. A melhoria das condições de trabalho, a utilização de mão-de-obra especializada, a redução do ruído, a diminuição da poluição do ar e a redução do tráfego no local de construção são características que qualificam a construção modular como técnica de construção mais segura em alternativa às técnicas convencionais o que contribui diretamente para a redução do número de casos de acidentes de trabalho.

3.3.6 Flexibilidade

A flexibilidade é um termo cada vez mais presente no tecido empresarial e, tendo em conta as tendências atuais de consumo e necessidades, a flexibilidade é uma característica necessária e incontornável que permite auxiliar a manutenção da competitividade nas mais diversas áreas de negócio.

Quando abordamos este tema no contexto da construção modular, a flexibilidade pode representar tanto a capacidade das empresas entregarem um leque variável de produtos como a flexibilidade inerente aos próprios produtos, neste caso os módulos ou a conjugação destes. É certo que, quando comparada com as modelos convencionais de construção, a produção modular pode ficar há quem do esperado, uma vez que a flexibilidade na customização dos módulos é limitada, sobretudo, a medidas standards não negligenciado, porém a escolha dos acabamentos e distribuição espacial.

No que toca à flexibilidade dos produtos, esta destaca-se positivamente em relação às técnicas convencionais de construção conferindo à construção modular, uma das maiores vantagens da sua adoção. A disponibilidade para realocar os módulos consoante as necessidades e procuras, permite reduzir a necessidade de matéria-prima e a diminuição dos gastos com energia para a construção de um edifício novo para atender às necessidades pontuais. A estes projetos especiais e flexíveis chamamos Edifícios Realocáveis. Estes, são construídos em ambiente fabril com o recurso à construção modular e em conformidade com os regulamentos e códigos aplicáveis. Permitem a sua reutilização em diversos projetos uma vez que, podem ser transportados para diversos locais. Esta flexibilidade de deslocação e arranjo permite disponibilizar edifícios a baixo custo, com enorme rapidez e sobretudo, permite atender a necessidades temporárias de habitações Clancy (2016).

3.4 História e Evolução da Construção Modular

Apesar de despercebida aos olhares dos mais desatentos, a construção modular é uma excelente alternativa às metodologias de construção civil convencionais. Quando abordamos esta metodologia, assumimos à partida que se trata de um conceito inovador e recente, mas desenganemo-nos. Apesar da sua evolução nos últimos anos e da constante adaptação às exigências do mercado, a construção modular remonta para inícios do século XIX. Apesar de não existir uma coerência entre os diversos autores que descrevem o aparecimento e evolução desta metodologia de construção, podemos assumir que a revolução industrial serviu de catalisador para o arranque desta metodologia e pensamento de construção uma vez que, com a introdução de novos materiais como o ferro e o desenvolvimento de maquinaria industrial, a sua adoção foi facilitada (Herbert G., 1972).

Um dos primeiros exemplos da abordagem a esta metodologia remonta para o ano de 1830 em Londres às mãos do seu criador, o carpinteiro Henry Jonh Manning com o projeto apelidado de "*Manning Portable Cottage*", que traduzido significa A Cabana Portátil de Manning. O projeto consistia na construção de uma casa de campo confortável e suficientemente fácil de transportar, com o objetivo de servir a necessidade do seu filho emigrante na Austrália. A pequena casa foi desenvolvida através de um sistema

pré-fabricado de ripas de madeira, painéis e treliças de madeira que compoñham o telhado. Devido à sua padronização, as várias peças eram intercambiáveis consoante a sua tipologia. Uma das características mais importantes deste projeto era o baixo peso dos seus componentes o que permitia o transporte por vários quilómetros sem se recorrer a grandes meios ou infraestruturas de transporte. Este projeto teve tamanho sucesso que Henry desenvolveu várias tipologias para colmatar a escassez de habitações nas colónias britânicas do século XIX (Herbert G., 1972).

Anos mais tarde em 1851, é construído em Londres o Palácio de Cristal concebido por Josep Paxton. Apesar da metodologia adotada para esta construção não ter sido exatamente a construção modular, podemos afirmar que a essência e visão desta metodologia foi incorporada neste projeto não só pelo facto do seu projetista estar ligado ao desenvolvimento de técnicas na área da construção modular mas também pelo feito histórico na rapidez com que o edifício foi concebido, o que permitiu demonstrar que o avanço tecnológico e a incorporação de técnicas de produção industrial eram uma mais-valia para a construção civil.

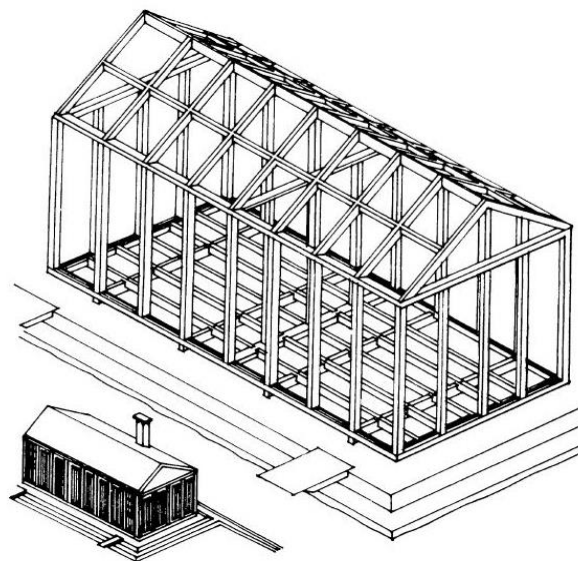


Figura 22 - "Manning Portabel Cottage"

No início do século XX, surgem nos Estados Unidos da América duas empresas que viriam a revolucionar o mercado da construção pré-fabricada. A *Aladdin Homes* (1906) e a *Sears, Roebuck and Co* (1908) foram as primeiras empresas a disponibilizar catálogos de modelos de casas pré-fabricadas em madeira. A *Sears* destacou-se ainda mais pelo facto de oferecer 370 modelos distintos de casas que eram enviadas para os seus clientes em peças pré-fabricadas (Old House Jornal, 2021).

O apogeu da revolução e industrialização da construção civil dá-se perto do final do século quando surgem mega construções utilizando módulos pré-fabricados. A *Nagakin Capsule Tower* é um desses excelentes exemplares. Construída em 1972 e projetada pelo arquiteto japonês Kisha Kurokawa, a torre era constituída por 140 unidades modulares empilhadas em torno de uma estrutura central de betão armada. Os módulos eram independentes o que permitia a troca individual de cada um possibilitando uma vida útil superior do edifício.



Figura 23 - "*Nagakin Capsule Tower*"

Os anos finais do século XX e início do século XXI foram marcados pelo *Boom* tecnológico e como consequência, a construção modular foi levada por arrasto nesta onda de inovação e desenvolvimento tecnológico o que permitiu elevar os horizontes e expandir fronteiras desta metodologia de construção. Aproxima-se uma nova revolução mundial, onde a tecnologia, a automação e a internet das coisas (IoT) marcam o caminho para o futuro e para o alcance do sucesso, posto isto, podemos afirmar que o futuro e a tendência da arquitetura modular é risonho e ascendente.

3.5 Mercado

Nos últimos anos temos assistido a grandes alterações no mercado da construção civil e como consequência, diversas vertentes da indústria têm vindo a ganhar mercado nas mais diversas economias mundiais em resposta à crescente procura por habitações e surgindo como alternativas às metodologias de construção convencional. A construção modular posiciona-se atualmente como uma das melhores alternativas às metodologias tradicionais. O mercado das pequenas casas modulares impulsionou o

interesse e a procura por este tipo de construção. Esta crescente procura aliada à postura adotada pelas novas gerações em prol do meio ambiente, poderá proporcionar o momento de viragem para um mercado da construção civil mais industrializado e competitivo (Pereira, 2012).

Segundo o relatório publicado pela *ResearchCMFE*, o mercado da construção modular em 2020 estava avaliado em 95.49 bilhões de dólares com perspectiva de alcançar os 141.80 bilhões de dólares em 2027. O mesmo relatório destaca que o aumento da procura por casas acessíveis bem como o desenvolvimento de infraestruturas hospitalares e comerciais afetarão de forma positiva o mercado da construção modular.

No mercado internacional, podemos destacar vários exemplos de sucesso que adotaram a construção modular como o seu método construtivo. Em Nova Iorque nos Estados Unidos da América, situa-se o maior hotel modular do mundo. O AC Hotel New York NoMad, é um hotel com 168 quartos distribuídos por 26 andares com 109 metros de altura. Cada piso é constituído por 8 módulos pré-fabricados, totalmente decorados e equipados com todo o mobiliário necessário. No último piso do hotel localiza-se o *RoofTop Bar* também ele projetado e construído com o recurso a módulos pré-fabricados. Na base do hotel localizam-se as áreas comuns, estas construídas com o recurso às técnicas convencionais que serviram de base para os módulos (Brenner, 2019). O grande desafio desta construção seria a produção e o transporte dos módulos, uma vez que estes foram produzidos na Polónia por uma empresa local, a DMDmodular, e enviados por transporte marítimo até ao local de construção. Este desafio foi ultrapassado com sucesso e no final, este projeto demonstrou as capacidades e as vantagens deste método construtivo uma vez que, foram gastos menos 35 milhões de euros e concluiu-se o projeto em menos 6 meses do que teria sido se optasse pelas técnicas convencionais.



Figura 24 - AC Hotel New York NoMad



Figura 25 - Módulo utilizado na edificação do hotel AC Hotel New York NoMad

Na Europa, o estúdio de arquitetura AEMSEN está a projetar um complexo residencial na cidade holandesa de Capelle aan den IJssel. Numa nova forma de entender o urbanismo e a vida comunitária, o complexo Barbizon espera revolucionar o conceito de habitação, sustentabilidade e acessibilidade. O complexo ecológico e modular deverá ser construído a partir de módulos pré-fabricados de madeira que devido à sua flexibilidade e adaptabilidade podem ser facilmente utilizados noutros locais, replicando assim o projeto inicial. No total, o complexo será composto por 112 apartamentos com uma superfície que deverá variar entre os 45 e os 120 metros quadrados distribuídos por 16 diferentes tipologias. O estúdio de arquitetura tem o objetivo de restaurar o equilíbrio entre a cidade e a natureza e para isso as fachadas e a cobertura do edifício estarão repletas de vegetação proporcionando a integração da biodiversidade no complexo. A par desta característica, os espaços comuns serão acessíveis a todos os residentes do complexo através de corredores contribuindo para a interação social (Selva, 2021).



Figura 26 - Complexo residencial Barbizon

O mercado nacional da construção modular, em vez do panorama internacional ainda apresenta diversas lacunas quanto á oferta desta tipologia de construção. Apesar da crescente procura por soluções modulares para a construção habitacional, as soluções que se pode encontrar no mercado apenas atendem às necessidades de moradias familiares térreas ou de dois pisos no máximo. Existe ainda uma grande inércia e desconfiança em relação a este tema. A falta de informação sobre os processos de licenciamento, a dificuldade na obtenção de crédito e o mercado ainda em desenvolvimento contribuem para a baixa adoção desta tipologia de construção. Contudo, apesar do mercado avançar a um ritmo lento é possível encontrar em Portugal exemplos de sucesso de edifícios pré-fabricados ou modulares. O hotel Pedras Salgadas Spa & Nature Park, localizado em Vila Pouca de Aguiar é um excelente exemplo

da adoção desta metodologia de construção. O conjunto turístico composto por 16 “eco-houses” é da autoria do arquiteto Luís Rebelo de Andrade e a construção ficou a cargo da empresa *Modular System*, empresa portuguesa que se dedica à produção de pequenas casas modulares. A combinação de 3 módulos distintos (entrada/casa-de-banho – sala de estar – quarto), permite criar diferentes arranjos das “eco-house” e o seu revestimento em ardósia e madeira conferem um design moderno e apelativo numa perfeita simbiose entre a arquitetura moderna e a Mãe natureza.



Figura 27 - "Eco-House" Hotel Pedras Salgadas Spa & Nature Park

Relativamente às empresas que se dedicam ao fabrico deste tipo de habitações, em Portugal a oferta, apesar de diversa, ainda se baseia em pequenas fábricas pouco industrializadas com baixa capacidade produtiva e sobretudo, dedicadas à produção de pequenas casas familiares. No norte, mais concretamente no concelho de Famalicão, podemos encontrar a Fábrica das Casas com uma produção anual de cerca de 250 unidades. No seu catálogo de produtos podemos encontrar modelos T0 até T5 térreas ou de dois pisos. Os módulos, com 14 metros de comprimento, 4 metros de largura e 3 metros de altura, são fabricadas em aço galvanizado soldado e revestidos em ETICS (*External Thermal Insulation Composite System*). As paredes e tetos do módulo são revestidos por gesso cartonado hidrófugo, os pisos em porcelânico ou derivados de madeira e os caixilhos com rutura térmica. Apesar de utilizarem um sistema construtivo inovador, a Fabrica das Casas compromete-se a entregar aos seus clientes soluções idênticas às metodologias tradicionais com a particularidade do tempo de conclusão dos projetos variar entre 3 a 7 meses.



Figura 28 - "Elegance V3" moradia T3

4. CASO DE ESTUDO

A presente dissertação de mestrado surge no âmbito do estágio curricular elaborado na empresa BySteel FS. A empresa do grupo DST, constituída em março de 2016, opera no mercado de engenharia de fachadas, dedicando-se à conceção, desenvolvimento, transformação e montagem de sistemas de fachadas. A BySteel FS é atualmente uma das maiores fabricantes nacionais no ramo da caixilharia e fachadas. A sua faturação anual ascende aos milhões de euros sendo que, a maior parte da produção é exportada para os seus dois maiores mercados, Reino Unido e França.

O dstgroup, é um grupo nacional de referência na área da engenharia e construção. As suas origens remontam para os anos 40 com o início de atividade ligada à pedra e às pedreiras. Com a missão de construir projetos empresariais sustentáveis que agreguem valor para a comunidade, o grupo atua atualmente em seis setores de atividade distintas: Engenharia e Construção, Energias Renováveis, Telecomunicações, Real State e Ventures. O *slogan* da empresa, “*Building Culture*” assina em todos os projetos do grupo a génese e a visão de construir arte com engenho paralelamente com a Arte e a Cultura. De facto, o grupo promove há quase 25 anos o “Grande Prémio da Literatura dst” a nível nacional e internacionalmente com a edição em 2019 do “Prémio de Literatura dstangola/Camões”.

O grande mote para o desenvolvimento desta dissertação parte da ideia de desenvolver uma unidade industrial para o desenvolvimento e produção de módulos pré-fabricados em grande escala, daí a incorporação do estágio curricular na empresa BySteel Fs, uma vez que, esta dedica-se à produção de fachadas modulares. Assim sendo, e tendo por base todo o conhecimento e tecnologia empregue na BySteel FS, a presente dissertação visa desenvolver todo o processo produtivo para a produção dos módulos pré-fabricadas, assegurando a eficácia, otimização e qualidade de todo o processo produtivo. Fazendo minhas as palavras do presidente do dstgroup, engenheiro José Teixeira, esta nova unidade industrial deverá ser considerada a “Autoeuropa das casas”.

No presente capítulo serão abordadas as principais fases para o desenvolvimento e planeamento do sistema produtivo e de todas as áreas de apoio ao seu correto funcionamento. Para tal será idealizado o *layout* do chão de fábrica, serão estudadas todas as fases do sistema, serão propostos equipamentos para o fabrico e serão estudados os principais componentes dos módulos.

Como em todo e qualquer projeto, numa primeira fase é necessário definir metas e objetivos a alcançar. Para o efeito, é apresentado um *roadmap* na figura 29 para coordenar o processo de desenvolvimento garantindo que todas as fases do processo serão realizadas com a máxima transparência clarificando todos os pontos-chave de cada fase.

Um *roadmap* é uma ferramenta visual que ajuda a mapear o trajeto e a evolução do projeto em que é aplicado. Pode ser utilizado nas mais diversas áreas de negócio, desde o desenvolvimento de produtos, sistemas ou até mesmo competências. Este ajuda a organização a definir a posição atual e o “destino” final, age como um guia para todos os intervenientes no projeto planearem as tarefas e executarem a estratégia adotada.

Tipicamente, um *roadmap* deveria incluir datas objetivo e atividades dos mais diferentes departamentos envolvidos. Para o efeito, e uma vez que esta dissertação de mestrado foca-se no desenvolvimento e elaboração do processo produtivo e sendo que não existem à data desta redação datas objetivos, o presente *roadmap* apenas esboça o trilho de todo o processo de desenvolvimento do processo produtivo, não incluindo outras áreas da empresa como marketing, departamento financeiro etc.

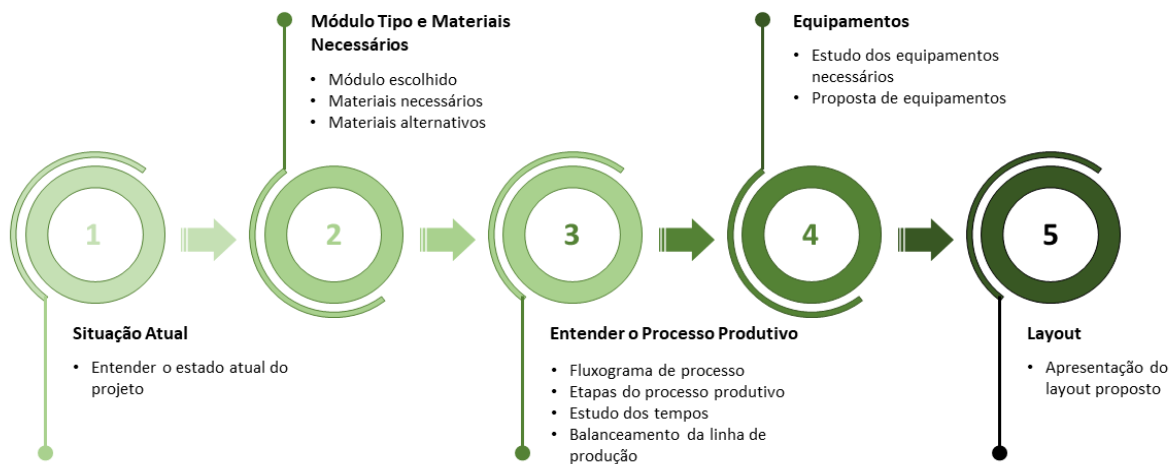


Figura 29 - Roadmap para o desenvolvimento do sistema produtivo

Na primeira etapa do processo, será avaliada a situação atual do projeto que incluirá a produção anual objetivo. De seguida, a segunda fase do processo contará com a apresentação do tipo de módulo escolhido para fabrico, materiais necessários e possibilidades de matérias alternativos para a produção dos módulos.

Na terceira fase da pesquisa, será necessário entender todo o processo produtivo que incluirá a descrição detalhada de todas as etapas do processo, o estudo dos tempos de cada posto de trabalho e tempo de ciclo. Na penúltima fase serão estudadas as necessidades de equipamentos e serão apresentadas

propostas das soluções existentes no mercado. Por último, e sendo esta a fase mais importante do processo, será desenvolvida e apresentada a proposta para o *layout* do chão de fábrica que incluirá, para além das células de produção, espaços de armazenamento, corredores de abastecimento e logística de receção e expedição.

4.1 Definição de Requisitos

Num caso de estudo onde o processo produtivo já se encontrasse em funcionamento, a primeira etapa para o desenvolvimento do estudo passaria pela observação direta de todos os fatores críticos de uma ou várias operações com o objetivo de compreender as operações e definir medidas de desempenho e identificar possíveis oportunidades de melhoria.

No presente caso de estudo tal não acontece, como tal é necessário identificar e compreender o trabalho de pesquisa e desenvolvimento até então realizado. Em conjunto com a equipa de trabalho destacada para o desenvolvimento do sistema produtivo em causa, foi possível identificar alguns pontos-chave já definidos bem como a produtividade anual objetivo. Conclui-se então, que para otimizar o processo de transporte dos módulos entre a fábrica e o local de construção, tendo por base as restrições do sistema nacional de transporte português, os módulos deverão ter uma área de implantação entre os **20 m²** a **30 m²**.

A produtividade anual objetivo é de cerca de **2000 módulos**. Para garantir que o sistema de produção satisfaz esta procura anual, deveremos calcular o *Takt Time*. O *Takt Time*, de uma forma simplificada, representa o ritmo a que o mercado consome produtos, ou seja, de quanto em quanto tempo, em média, o mercado consome uma unidade de produto. A seguinte fórmula pode ser utilizada para calcular o TT.

$$Takt\ Time\ (TT) = \frac{Tempo\ de\ Produção\ Disponível}{Procura}$$

Da análise da fórmula do cálculo do TT, reparamos que são necessárias duas variáveis para proceder ao respetivo cálculo. A procura é dada pela produção anual objetivo (2000 módulos anuais) e o tempo de produção disponível será dado em função do tempo de operação da linha de produção. Assumindo que a linha de produção estará em funcionamento 8h por dia, ou seja, 480 minutos, o que deverá representar 1 turno de trabalho, e que por ano apenas 251 dias representam trabalho efetivo, o TT será de:

$$Takt\ Time\ (TT) = 480\ min / 8\ unidades = \mathbf{60\ minutos/unidade}$$

Conclui-se então, que o sistema produtivo deverá fabricar 1 módulo de 60 em 60 minutos para satisfazer a procura diária de 8 módulos. O TT calculado poderá não refletir a realidade uma vez que assumimos que a linha de produção funciona 8 horas seguidas sem interrupção e que não existem produtos defeituosos. Assim sendo, podemos concluir que o tempo de ciclo (TC) da linha de produção deverá ser, no máximo, igual a 60 minutos.

O tempo de ciclo (TC) diz respeito ao tempo necessário para produzir uma unidade de produto. Desta forma, para que a linha de produção possa concluir o fabrico de 1 módulo de 60 em 60 minutos, é necessário que todos os postos de trabalho tenham um tempo de processamento **igual ou inferior a 60 minutos**. Se caso se verificar o contrário, o sistema produtivo não conseguirá satisfazer a procura diária.

Da análise da situação atual concluímos que:

- A área de implantação de cada módulo deverá variar entre os 20 a 30 m²;
- O TT = 60 minutos/módulo;
- O TC deverá ser igual ou inferior a 60 minutos.

4.2 Módulo Tipo e Materiais Necessários

O mercado da construção civil alvo da nova unidade industrial em estudo será a Europa. Tendo em consideração a tipologia dos edifícios habitacionais europeus e as restrições à construção de “arranha-céus” nos centros das grandes cidades europeias, a escolha do módulo tipo cairá sobre os módulos fabricados em madeira, o que possibilitará a construção de edifícios de médio a elevado porte. Como abordado no capítulo anterior, a madeira possui propriedades térmicas de isolamento elevadas e, sendo um material orgânico, é um material sustentável ao nível ambiental o que contribuirá para o alcance da descarbonização do setor.

Na figura 30 podemos observar o módulo tipo desenvolvido pelo departamento BIM, que funcionará como base para o dimensionamento de toda a linha de produção. As suas características dimensionais tiveram em consideração a otimização do sistema de transporte. Assim sendo, o módulo tipo terá 7.2 metros de comprimento, 3.4 metros de altura e 3.8 metros de largura.

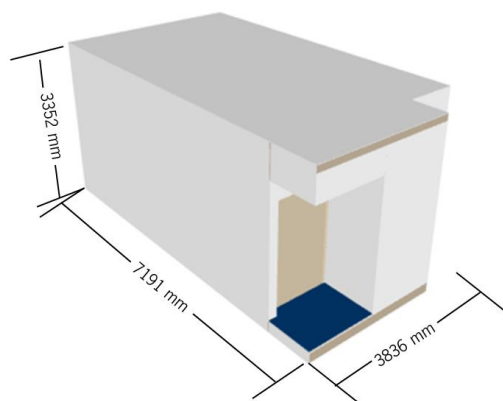


Figura 30 – Módulo de Madeira

4.2.1 Características estruturais

O módulo tipo desenvolvido é classificado como um **4 sided**, ou seja, é um módulo fechado, constituído por 4 paredes, chão e teto. As cargas verticais são transferidas ao longo das paredes o que implica que as paredes longitudinais alinhem com os módulos superiores e inferiores para transferir corretamente as cargas verticais até às fundações do edifício. Adicionalmente, são incorporados ângulos de aço nos cantos do módulo para conferir maior estabilidade à estrutura.

Na figura 31 está representado um corte vertical da estrutura primária em madeira do módulo para melhor compreender as posições relativas entre si das diferentes partes constituintes.

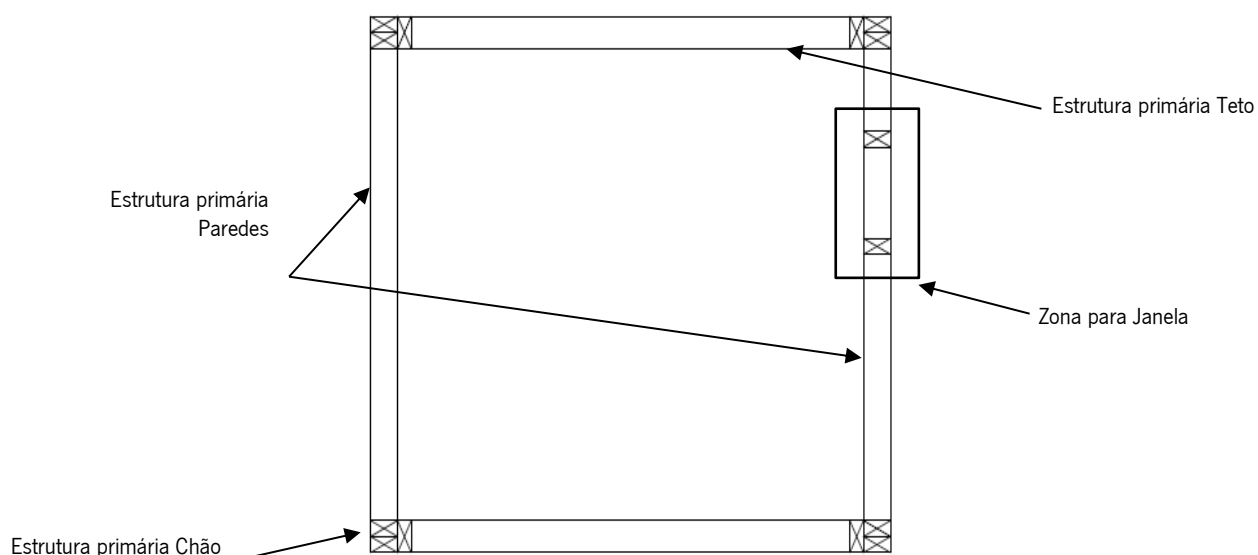


Figura 31 - Corte vertical da estrutura primária modelado em *AutoCad*

A estrutura primária dos painéis laterais, teto e chão, e conseqüentemente do módulo, serão fabricados a partir de colunas e vigas de madeira maciça. O interior dos painéis será cheio com material isolante e serão colocadas cablagem elétrica e tubagens para o sistema de águas e posteriormente serão fechados com placas de derivados de madeira. Os painéis laterais poderão ser classificados em 3 tipologias distintas, sendo elas: painéis exteriores, painéis de ligação e painéis interiores, sendo que este último deverá diferir dos outros dois na medida em que a sua constituição e método de produção será diferente dos demais. Os painéis exteriores serão os mais complexos das 3 tipologias uma vez que, uma das duas faces está virada para o exterior do edifício, como tal, deverá incluir, para além do acabamento interior, isolamento hidrófugo e o acabamento exterior do edifício. Os painéis de ligação, como o próprio nome indica, fazem a ligação entre módulos, como tal, estes apenas irão incluir acabamento na face interior do módulo. Por último, os painéis interiores não desempenham funções estruturais apenas fazem a divisão interior dos módulos, assim sendo, estes poderão ser fabricados em gesso cartonado e respetiva estrutura metálica.

Os painéis de teto e chão são em muito semelhantes. Nos painéis de chão será necessário incorporar o sistema águas pluviais e nos painéis de teto o sistema AVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado). Ambos os painéis não deverão incorporar, numa primeira fase, os acabamentos finais uma vez que, estes apenas serão instalados numa outra fase de montagem dos módulos.

De maneira a tornar o sistema produtivo mais eficiente, rápido e eficaz, as instalações sanitárias deverão ser pré-fabricadas numa outra fase anterior ao processo de montagem ou fornecidas por uma empresa fabricante deste tipo de instalações. Os *pods* sanitários, posteriormente à sua instalação, apenas necessitam dos acabamentos finais.

4.2.2 Componentes materiais

O escrutínio de todos os elementos constituintes do módulo é fundamental para o desenvolvimento do sistema produtivo, isto porque, a quantidade necessária de cada material e o momento de montagem de cada elemento condicionará a projeção do layout do chão de fábrica. Posto isto, foi realizada uma análise no mercado pelos diversos materiais constituintes do módulo. É importante realçar que, por não existir, à data da redação desta dissertação de mestrado, um módulo teste produzido, será apenas realizado uma análise macro aos materiais necessários comuns à maioria dos painéis. Elementos de instalações especiais como cablagens elétricas ou sistemas AVAC serão postos de parte uma vez que estes poderão variar significativamente de projeto para projeto.

Na figura 32, modelado em 3D com recurso ao software *SketchUp Pro*, está representada uma secção do painel lateral exterior para melhor compreender e identificar os elementos constituintes do painel e a distribuição relativa entre si.

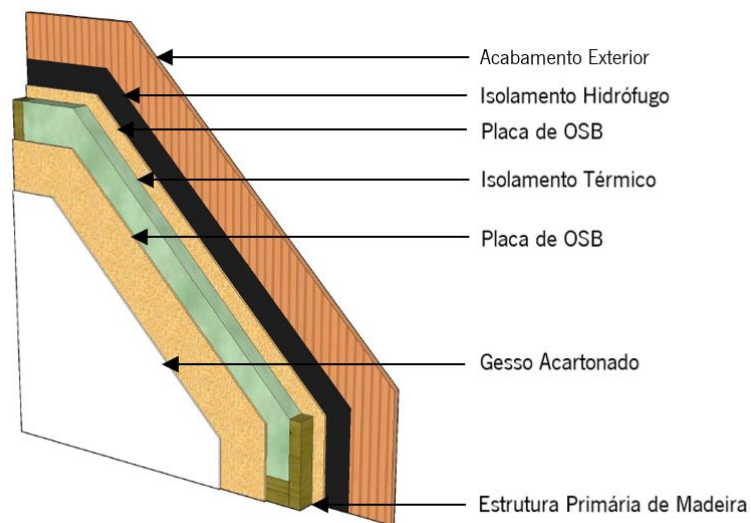


Figura 32 - Elementos constituintes do painel lateral exterior

Tomando de exemplo um módulo constituído por 2 painéis laterais (1 longitudinal + 1 transversal), 2 painéis de ligação (1 longitudinal + 1 transversal), 1 painel de cobertura e 1 painel de chão e sendo que as características dimensionais são as estipuladas no modelo tipo representado na figura 28, foi desenvolvida uma lista de materiais e respetivas quantidades como representado na figura 33.

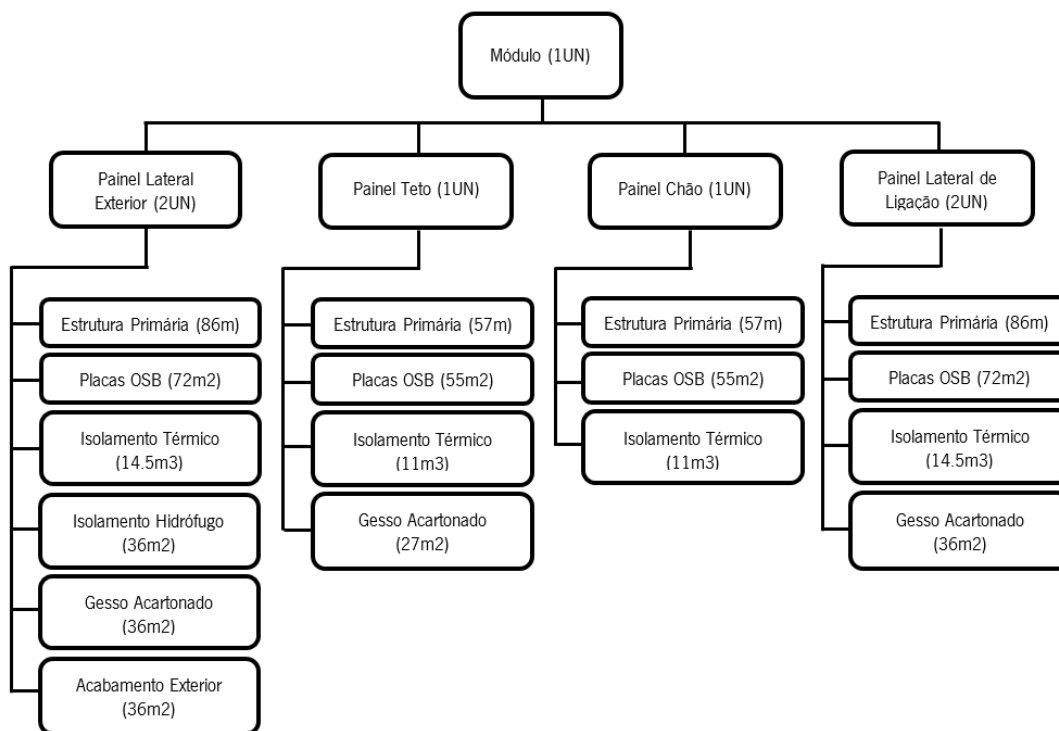


Figura 33 - Lista de Materiais e respetivas Quantidades

Da análise da lista de matérias em cima representada é possível identificar 3 unidades de medida distintas, isto porque, tendo em consideração a tipologia de cada material, o cálculo das necessidades de materiais é dado em função da unidade de medida da respetiva matéria-prima. Ora, tendo em consideração o exemplo representado, serão necessários 286 metros de madeira para o fabrico da estrutura primária do módulo. Serão gastos 254 m² de placas OSB, 51 m³ de isolamento térmico, 99 m² de gesso acartonado, 36 m² de isolamento hidrófugo e 36 m² para o acabamento exterior.

A escolha dos respetivos materiais incidirá sobre as soluções existentes no mercado para cada tipo de elemento e para a função que este desempenhará.

- **Estrutura Primária**

A estrutura primária é responsável pela sustentação e robustez do módulo, esta, será fabricada a partir de vigas e colunas de madeira com seção retangular que poderão variar consoante a altura do edifício. Por norma, cada painel será constituído por duas vigas sobrepostas superiores, duas vigas sobrepostas inferiores e um número variável de colunas, distas entre si 1 metro, consoante o comprimento do painel.

- **Isolamento Térmico**

A fim de proteger o espaço interior do módulo dos agentes térmicos exteriores, é necessário incluir nos painéis algum tipo de material isolante térmico. A madeira por si só já apresenta características de isolamento termo-acústico mas, para aumentar o fator de isolamento térmico poderemos recorrer a soluções naturais ou sintéticas em formato de placas, rolos, mantas, granulados, fibras ou espuma. As lãs minerais como a Lã de Rocha ou a Lã de Vidro poderão ser solução. A Lã de Rocha é composta por partículas de rocha basáltica e é resistente à combustão. Por sua vez, a Lã de Vidro resulta da fusão de areias, é semelhante à lã de rocha, mas fornece um melhor isolamento acústico e resiste melhor à humidade. Ambas são versáteis e de fácil manuseamento, contudo, uma vez que são materiais volumosos o seu armazenamento poderá condicionar o layout dos armazéns. Outra solução são os granulados e fibras que, pelo seu formato poderão ser armazenados em silos e colocados com o auxílio de condutas aéreas que os distribuirão diretamente para os postos de trabalho, reduzindo o espaço dedicado ao seu armazenamento e melhoram a limpeza dos postos de trabalho na medida que não originam desperdícios nem partículas resultantes do seu corte.

- **Placas de revestimento**

Para o revestimento da estrutura primária e do isolamento térmico serão utilizadas placas de OSB. O OSB, como já referido no capítulo anterior, é um aglomerado de lascas de madeira misturadas com resinas sintéticas e prensadas a altas temperaturas. De entre a família dos aglomerados de madeira, o OSB é o material que melhor se adequa para o efeito uma vez que com o aumento das dimensões das partículas de madeira, este material apresenta características mecânicas superiores nomeadamente ao nível da resistência e rigidez.

- **Isolamento Hidrófugo**

Nas paredes exteriores dos painéis expostos às condições climatéricas é necessário revestir as placas de OSB com elementos impermeabilizantes. As membranas hidrófugas são um tipo de material impermeabilizante, possibilitam a passagem do vapor de água e de eventuais condensações. A membrana possibilita uma correta ventilação dos painéis evitando que se acumule humidade e a proliferação de fungos.

- **Acabamento exterior**

Os painéis laterais expostos às condições climatéricas devem ser protegidos com a adição de um acabamento exterior. Este tipo de acabamento tem a função de proteger os elementos internos do

módulo dos agentes climatéricos externos. Agem como uma barreira extra de isolamento térmico e acústico. Para além das suas características funcionais, os elementos de acabamento exterior podem ser utilizados como recursos decorativos. Os materiais mais comuns para este tipo de acabamento são a madeira, PVC, placas cimentícias, ETICS, painéis compósito entre outros. Durante o processo de fabrico dos painéis, este tipo de acabamento pode ser integrado numa fase preliminar do processo, quando se trata de um acabamento simples, ou numa final quando o módulo estiver totalmente fechado com todos os painéis constituintes.

- **Acabamento interior**

À semelhança dos projetos convencionais na construção civil, a fase de acabamentos representa a etapa de finalização da construção. No processo de montagem dos módulos pré-fabricados, esta etapa também deverá ser realizada numa fase final do processo, à exceção de algum tipo de material que poderá ser incorporado na fase de fabrico dos painéis.

O acabamento interior consiste na colocação de pisos, azulejos, pintura, vasos sanitários, mobiliários entre outros. O material mais utilizado para o efeito, à luz dos paradigmas atuais da construção é o gesso acartonado. As placas de gesso, ou mais comumente conhecido como *pladur*, são compostas por sulfato de cálcio hidratado (gesso) e revestidas por películas de celulose de papel. Este material pode ser utilizado em todas as divisórias do módulo uma vez que existem variantes resistentes à água, ao fogo, ao choque e ao ruído. Uma vez que este material poderá ser colocado diretamente sob as placas de OSB, a sua instalação poderá ser realizada no momento final de fabrico dos painéis, diminuindo o tempo gasto na etapa de finalização dos módulos.

Para além do gesso acartonado, a pintura das paredes e tetos, a colocação de azulejos ou até mesmo de papel de parede, deverão ser realizadas antes da montagem do módulo. É importante, por isso, ter em atenção esta etapa aquando da idealização da linha de produção.

4.3 Máquinas e Equipamentos Industriais

Os equipamentos industriais são um dos elementos mais importantes que constituem os sistemas produtivos. Na realidade, são estes os responsáveis pela transformação, montagem e movimentação dos materiais utilizados para a produção do produto final. É importante por isso, incorporar equipamentos de última geração nos novos sistemas produtivos visto que, estes podem conferir vantagens competitivas às empresas destacando-as dos seus principais concorrentes oferecendo produtos com maior qualidade, maior rapidez e eficiência em todo o processo produtivo.

Os países mais desenvolvidos deparam-se agora com uma nova realidade e transformação da indústria. Se no século XX assistiu-se à revolução da indústria com a entrada da *internet*, hoje em dia assiste-se a uma revolução da indústria com a introdução da robótica, a inteligência artificial, a partilha de dados entre outros. A esta revolução chamamos Indústria 4.0.

A Indústria 4.0 promete revolucionar todo o processo produtivo tornando mais inteligente e autónomo. Uma das ferramentas da Indústria 4.0 é a *Internet of Things* ou a Internet das coisas. Esta ferramenta converte os objetos que não possuem autonomia em objetos inteligentes, ou seja, com poder de decisão. Ora tendo em consideração esta nova revolução industrial e toda a competitividade dos mercados atuais, é importante analisar no mercado potenciais fornecedores de equipamento especializado para a indústria da construção modular.

Tendo em consideração os requisitos do processo produtivo em estudo, é possível dividir os equipamentos industriais em:

- Equipamentos transformadores;
- Equipamentos de movimentação e armazenamento;
- Equipamentos de elevação.

4.3.1 Equipamentos transformadores

Os equipamentos transformadores são os equipamentos, que de maneira geral, transformam matéria-prima em componentes ou produtos finais. De certa forma, estes são os equipamentos que mais valor acrescentam na cadeia de valor do sistema produtivo.

De uma forma em geral, mas em particular no sistema produtivo em desenvolvimento, é essencial escolher equipamentos eficientes, compactos e de última geração por forma a tornar o processo o mais automatizado e eficiente possível.

Para o efeito, foram estudados equipamentos com base em dois fornecedores líderes no mercado no fornecimento de equipamentos para a indústria da construção modular, Randek e Homag.

Na tabela seguinte, estão representados os equipamentos transformadores principais necessários, tempos de processamento, caso se aplique, e dimensões aproximadas.

Tabela 1 – Lista de principais equipamentos transformadores

Equipamento	Tempo de processamento	Dimensões aproximadas
M1 - Estação automatizada de corte de vigas e colunas de madeira	4.25m ² /min	Comprimento: 50m Largura: 42m
M2 - Estação automatizada de montagem da estrutura primária	2.4m ² /min	Comprimento: 14.5m Largura: 4.5
M3 - Estação automatizada de montagem de painéis OSB/Gesso acartonado automatizada	7.2m ² /min	Comprimento: 14.5 Largura: 4.5m
M4 - Ponte multifunções para corte e fixação dos painéis OSB/Gesso acartonado	3.6m ² /min	Comprimento: 14.5 Largura: 4.5m
M5 - Estação automatizada para montagem do isolamento térmico	4m ² /min	Comprimento: 14.5 Largura: 4.5m
M6 - Mesa de esquadrias/fixação das vigas e colunas de madeira	1.5m ² /min	Comprimento: 14.5 Largura: 4.5m
M7 - Estação manual para montagem dos painéis OSB	2m ² /min	Comprimento: 14.5 Largura: 4.5m
M8 - Estação manual para montagem do isolamento térmico	3m ² /min	Comprimento: 14.5 Largura: 4.5m

4.3.2 Equipamentos de movimentação e armazenamento

Os equipamentos de movimentação são responsáveis pela movimentação dos componentes através das células de produção entre postos de trabalho. Por sua vez, os equipamentos de armazenamento, no caso de estudo em concreto, são responsáveis por armazenar temporariamente os produtos semiacabados resultantes da produção das células de produção dos painéis laterais e painéis de cobertura. São de igual forma responsáveis pelo armazenamento intermédio dos painéis laterais antes da operação de acabamento.

Durante o processo produtivo dos painéis laterais, de cobertura e de chão é necessário equipamento especializado para a movimentação entre os diversos postos de trabalho. Para o efeito, ambos os fornecedores considerados disponibilizam no mercado, mesas de transporte totalmente automáticas que se adequam às várias tipologias de painéis. Por meio de tapetes rolantes, as mesas de movimentação permitem uma elevada eficiência na movimentação entre postos de trabalho. Para além da função de movimentação, as mesas permitem a realização de trabalhos manuais necessários ao fabrico dos painéis.



Figura 34 - Mesa de trabalho e movimentação de painéis

Outro equipamento de movimentação indispensável ao processo de fabrico dos painéis são as mesas para a inversão da face dos painéis, isto é, em determinado momento do processo produtivo dos painéis é necessário inverter a face de trabalho dos painéis uma vez que estes são produzidos na horizontal. As mesas destinadas para esta tarefa são vulgarmente conhecidas como *butterfly tables* ou mesas do tipo borboleta. Este tipo de equipamento consiste no conjunto de duas mesas que se erguem na vertical em direções concêntricas permitindo a inversão da face dos painéis como exemplificado na imagem 35.



Figura 35 - Mesa do tipo borboleta

Ainda na categoria de equipamentos de movimentação, durante o processo de fabrico dos painéis, será necessário efetuar o transporte na vertical dos painéis entre a última operação de fabrico na horizontal e a operação de acabamento dos painéis assim como, será necessário efetuar também, o transporte na vertical dos painéis entre a operação de acabamento e o armazenamento intermédio dos painéis antes da montagem final do módulo.



Figura 36 - Carrinho para transporte e distribuição dos painéis entre postos de trabalho

Por último, para a movimentação dos módulos entre os vários postos de trabalho na fase de montagem “3D”, uma vez que se pretende instalar uma linha de montagem semelhante às linhas de montagem automóvel, será necessário instalar um sistema que permita a movimentação contínua a uma velocidade constante entre os postos de trabalho. Inicialmente pensou-se aplicar um sistema de carris, no entanto, este tipo de sistema não permite retirar os módulos da linha de montagem sem o auxílio de um meio de elevação.

Por forma a contornar esta limitação, seria interessante desenvolver um sistema que permitisse a retirada dos módulos da linha de montagem em qualquer posto de trabalho. Para tal é necessário que o sistema de movimentação tenha a possibilidade de redirecionar os módulos para uma via de escape paralela à linha de montagem. Na figura 37 está representado um possível sistema de tapetes rolantes seccionados implantados ao nível do chão.



Figura 37 - Sistema de movimentação dos módulos na linha de montagem

Relativamente aos equipamentos de armazenamento, serão necessários dois tipos de equipamentos distintos uma vez que, para além da função de armazenamento, uma tipologia de equipamento servirá de posto de trabalho para a operação de acabamento dos painéis.



Figura 38 - Trilhos para acabamento e armazenamento de painéis



Figura 39 - Depósito de painéis acabados

4.3.3 Equipamentos de elevação

Os equipamentos de elevação podem ser considerados como todos os equipamentos capazes de elevar cargas (materiais, produtos, equipamento, pessoas...) e deslocá-las de um ponto para a outro. A escolha deste tipo de equipamentos é, maioritariamente, condicionada pelo peso que devem elevar.

No caso de estudo em concreto, os equipamentos de elevação necessários para o desempenho das necessidades do sistema produtivo baseiam-se nos tradicionais equipamentos de elevação como plataformas, empilhadores, *stackers*, pórticos e pontes rolantes. No caso deste último, a sua utilização será indispensável na linha de assemblagem dos módulos quer seja para a instalação dos *pods* sanitários, mas também para a instalação dos painéis laterais e de cobertura.

A movimentação dos módulos acabados na fase final de montagem para o local de armazenamento e no momento da carga nos caminhões de transporte deverá ser realizado com a maior segurança e eficiência possível. Dado o peso e dimensões dos módulos e as rotas de movimentação, os equipamentos de elevação para o efeito não poderão estar condicionados a movimentos fixos, isto é, deverão poder circular em qualquer direção e deverão também ser ágeis o suficiente para poder circular entre corredores de módulos armazenados. Posto isto, existe no mercado soluções de equipamentos, do género empilhador, capazes de elevar e movimentar os módulos acabados. Na figura 40 está representado um exemplar deste tipo de equipamento.



Figura 40 - Equipamento de elevação para módulos acabados

4.4 Processo Produtivo

Tal como abordado nos capítulos anteriores, o principal objetivo da presente dissertação de mestrado foca-se em desenvolver uma unidade industrial capaz de produzir módulos pré-fabricados para a indústria da construção modular. É importante por isso, desenvolver um sistema capaz de satisfazer as necessidades do mercado. Para que tal objetivo seja alcançado, e uma vez que, o processo fabril é um fator que determinará a duração, a qualidade e a sustentabilidade dos projetos de construção, é extremamente importante garantir que serão utilizadas tecnologias de ponta, métodos produtivos eficientes e desenvolvido um sistema de produção flexível, ágil e capaz de absorver flutuações da procura do mercado.

Como já mencionado anteriormente, o sistema de produção para a construção modular deverá ser similar às linhas de montagem dos processos de produção convencionais, isto é, deverão ser replicados modelos de produção *lean*, como o caso da indústria automóvel, para garantir a máxima produtividade do sistema de produção.

As linhas de montagem/produção podem ser descritas como a sequenciação de várias atividades produtivas, separadas por estações onde o fluxo de trabalho respeita uma sequência de montagem que origina o produto final. Estas, como descrito no capítulo 2, demonstram uma grande eficiência quando utilizadas na produção em massa, contudo, para garantir a sua máxima eficiência é necessário assegurar um ritmo de produção constante podendo, sob pena desta premissa não ser cumprida, afetar a produtividade da linha de produção.

Segundo Lee et al. (2016), os fatores que mais condicionam a produtividade nas linhas de produção são: o retrabalho, o efeito *bottleneck* e o congestionamento dos trabalhos.

De modo geral, retrabalho representa a necessidade de refazer determinadas tarefas já concluídas quer por causa de mau planeamento, mau controlo de qualidade, entre outros fatores. Nos modelos tradicionais de construção civil, o retrabalho, apesar de implicar custos acrescidos, pode facilmente ser efetuado sem congestionar o processo global de construção. Por outro lado, na construção modular, em concreto nas linhas de produção, o retrabalho tem um impacto significativo no fluxo de produção uma vez que, o atraso num posto de trabalho implica o atraso de todas os postos de trabalho subsequentes. Por forma a minimizar ou até mesmo erradicar o retrabalho no processo produtivo, é essencial adotar medidas preventivas de controlo de qualidade e reduzir a complexidade das tarefas.

O efeito *bottleneck* é outro dos fatores críticos mencionados e pode ser descrito como o abrandamento do fluxo produtivo devido à capacidade limitada de processamento. Os *bottlenecks* podem ocorrer por diferentes motivos geralmente associados à falta de capacidade produtiva, como por exemplo sempre que a carga de trabalho alocada a um posto de trabalho excede a sua capacidade produtiva que resultará no aumento do WIP (*work-in-progress*), ou seja, o fluxo de trabalho ficará congestionado a montante do *bottleneck* e a jusante deste, verificar-se-á precisamente o contrário. Este fenómeno poderá ser evitado se o processo produtivo estiver perfeitamente equilibrado. Segundo Nam et al. (2020), os *bottlenecks*, conforme estudo levado a cabo por estes numa instalação fabril coreana, tendem a surgir na fase da construção “molhada” – métodos de construção que impliquem a utilização de componentes húmidos. Por último, o congestionamento dos trabalhos ocorre quando a área de trabalho é demasiado pequena para a simultaneidade de trabalhos acontecer num determinado período de tempo (Lee et al.,2016). Na construção modular, o tamanho reduzido dos módulos poderá afetar o ritmo de produção uma vez que,

os trabalhos executados, sobretudo na fase final do processo onde são realizados os acabamentos, requer a utilização de mão-de-obra especializada, manuseamento de equipamento específico e longos períodos de execução, que por sua vez resulta no acumular de tarefas a realizar em simultâneo.

Analisando holisticamente os motivos que originam a ocorrência das situações em cima mencionadas, nomeadamente, os *bottlenecks*, o congestionamento e o retrabalho, e em consonância com diversos autores de investigações da mesma área, é possível concluir que a complexidade das tarefas é uma causa transversal a todos eles. Ora, de maneira a simplificar o processo produtivo e reduzir o número de operações e componentes a circular no chão de fábrica, é imperativo entender as relações dos mais diversos componentes que constituem os módulos por forma a isolar grupos de componentes semelhantes e independentes de maneira a pré-fabricar tais elementos. A pré-fabricação permitirá aliviar a carga de trabalho de vários postos de trabalho do processo produtivo, uma vez que, o tempo de fabrico desses componentes será absorvido por outras células de produção.

Assim sendo, numa primeira fase, será necessário estudar e perceber todo o processo produtivo dos módulos. Para isso, é necessário enumerar todas as fases do processo, definir a cadência das operações, entender a precedência das operações e extrapolar e especular os tempos de cada operação dado que, é impossível aferir os tempos reais de cada operação por não existir ainda um sistema produtivo no ativo.

Como já explanado no capítulo III desta dissertação, o módulo na sua essência, é constituído por 4 paredes, teto e chão. Este é considerado o produto final da linha de produção. Os painéis laterais, teto e chão, podem ser considerados como produtos semiacabados que irão abastecer a linha de montagem dos módulos no seu estado final.

Em termos dimensionais, os módulos apresentam características tridimensionais, ou seja, constituem um sistema de construção volumétrica. Por sua vez, os painéis apresentam características bidimensionais podendo ser considerados como pré-asmblagem não volumétrica. Assim sendo, podemos assumir que existirão dois momentos distintos no sistema de produção, “2D” e “3D”. A transição de uma fase para a outra dar-se-á no começo da montagem dos elementos que irão formar o módulo.

Para melhor compreender o processo produtivo, na figura 34 está representado o fluxo de trabalho relativo ao processo de produção.

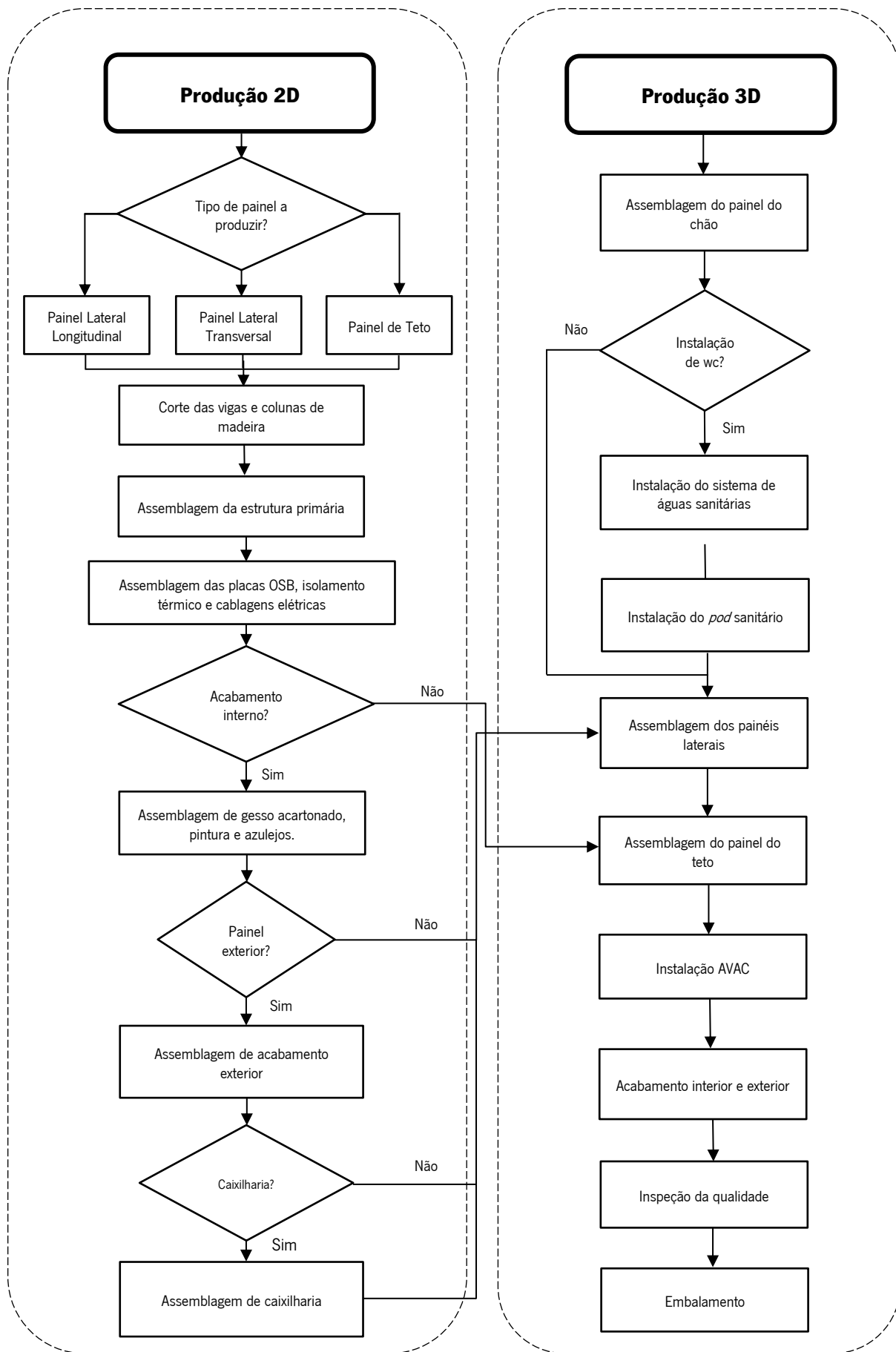


Figura 41 - Fluxo de Trabalho da assemblagem de Módulos com estrutura de madeira

Tal como referido anteriormente, o sistema de produção em desenvolvimento será dedicado a uma família de produtos muito particular, painéis como semi-acabados e módulos como produto final. Na revisão bibliográfica fez-se referência às configurações genéricas de sistemas de produção existentes. Tendo em consideração as características deste sistema em particular, podemos classificar o sistema como **Sistema de Produção Orientado ao Produto**. Este tipo de sistemas são caracterizados pelo controlo da complexidade dos fluxos produtivos adotando configurações de células ou linhas de produção.

Tendo em consideração as vantagens associadas aos sistemas de produção com implantações em células de produção, e tendo em conta que o sistema de produção em desenvolvimento apresenta os requisitos necessários para tal implantação, sendo eles o número reduzido de artigos diferentes no sistema e o número de unidades produzidas compreendidas entre os considerados nas oficinas de produção e linhas de produção, podemos concluir que o sistema de produção em desenvolvimento será composto por células de produção.

As células de produção agrupam e organizam os recursos de produção necessários ao fabrico de famílias de componentes ou montagem de produtos ou famílias de produtos.

Por sua vez, as famílias podem ser consideradas como o agrupamento de produtos simples (peças) e produtos finais ou intermédios, quando resultam de montagem, tendo por base características semelhantes entre estes, tais como, requisitos de fabrico, transporte, armazenamento entre outros.

Na figura 35 está representado, de forma esquemática, o processo necessário para a formação de células de produção. Segundo Alves (2007), o processo de formação de células de produção está dividido em 5 fases, sendo elas:

1. Formação de famílias de produtos;
2. Instanciação de células concetuais;
3. Instanciação de postos de trabalho;
4. Organização intracelular e controlo;
5. Arranjo integrado das células para formação do SPOP.

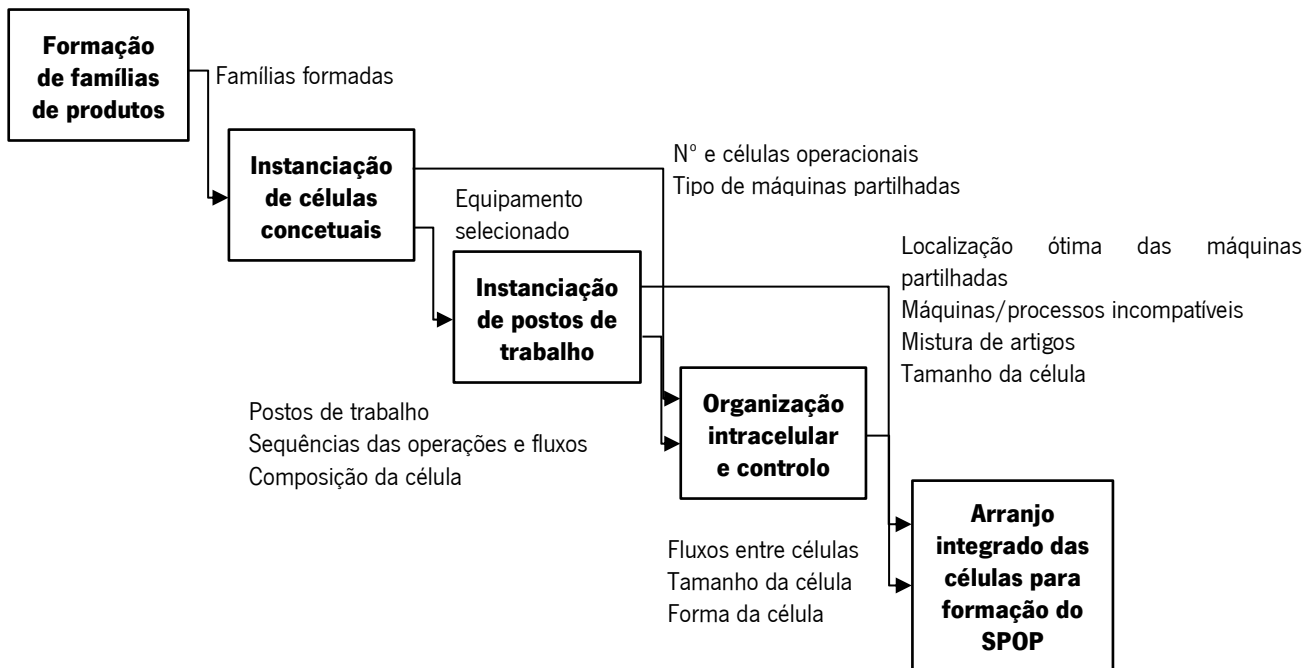


Figura 42 – Etapas para formação de células de produção – adaptado de (Alves 2007, p147)

4.4.1 Formação de famílias de produtos

O processo de formação de famílias de produtos nem sempre é uma atividade simples. Dependendo das quantidades produzidas, em determinados sistemas de produção poderão existir células de produção dedicadas única e exclusivamente a um determinado produto, pondo assim de parte, o processo de formação de famílias de produtos. Por outro lado, quando perante sistemas de produção com um maior leque de produtos, a formação de famílias torna-se imperativo. Nesses casos, é necessário considerar determinadas características dos produtos para assim, segmentar os produtos por famílias. Características como a geometria, tamanho, peso, processo de fabrico, gamas operatórias ou até mesmo matéria-prima são exemplos de características consideradas no processo para agrupar o fabrico de produtos semelhantes na mesma célula de produção.

Os métodos utilizados para a formação de famílias de produtos variam consoante as características consideradas, isto é, os métodos ou dados de entrada e o tipo de computação requerida. Ora, uma vez que o caso em estudo está numa fase muito prematura, isto é, os dados conhecidos até ao momento são muito superficiais, não existem detalhes de fabrico, especificações técnicas ou até mesmo quantidades e tempos de processamento. Assim sendo, para a formação de famílias de produtos, serão utilizados procedimentos descritivos como a abordagem manual. Nesta, descrevem-se a inspeção visual, a análise dos roteiros de fabrico entre outros.

Para melhor compreender o processo produtivo, na tabela 2 estão enumeradas todas as atividades necessárias para a produção dos painéis e módulos bem como as atividades precedentes.

Tabela 2 – Etapas para a produção dos painéis e módulos

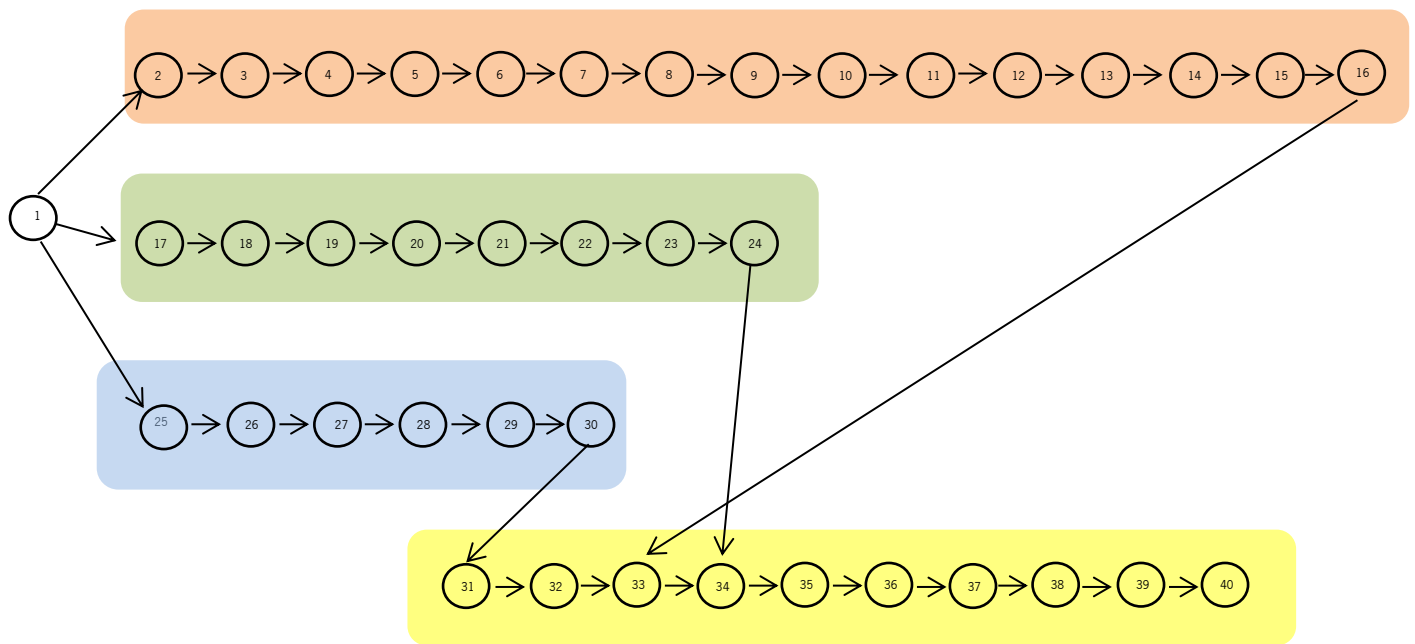
Atividade	Precedentes
1. Corte de vigas e colunas de madeira	-
2. Assemblagem da estrutura do painel lateral	1
3. Assemblagem de placas OSB no painel lateral I	2
4. Fixação e corte de secções das placas OSB I	3
5. Assemblagem da membrana hidrófuga no painel lateral	4
6. Rotação do painel lateral	5
7. Assemblagem de tubagens e cablagens elétricas no painel lateral	6
8. Assemblagem do isolamento térmico	7
9. Assemblagem de placas OSB no painel lateral II	8
10. Fixação e corte de secções das placas OSB II	9
11. Assemblagem de placas de gesso acartonado no painel lateral	10
12. Fixação e corte de secções das placas de gesso acartonado	11
13. Rotação para posição vertical do painel lateral	12
14. Instalação de janelas e portas no painel lateral	13
15. Pintura e acabamento exterior do painel lateral	14
16. Transporte e armazenamento do painel lateral	15
17. Assemblagem da estrutura do painel de cobertura	1
18. Assemblagem de placas OSB no painel de cobertura I	17
19. Rotação do painel de cobertura	18
20. Assemblagem de cablagens elétricas no painel de cobertura	19
21. Assemblagem do isolamento térmico	20
22. Assemblagem de placas OSB no painel de cobertura II	21
23. Rotação para posição vertical do painel de cobertura	22
24. Transporte e armazenamento do painel de cobertura	23
25. Assemblagem da estrutura do painel de chão	1
26. Assemblagem de placas OSB no painel de chão I	25
27. Rotação do painel de chão	26
28. Assemblagem de tubagens e cablagens elétricas no painel de teto	27
29. Assemblagem do isolamento térmico	28

30. Assemblagem de placas OSB no painel de chão II	29
31. Instalação da unidade pré-fabricada de casa de banho/ <i>pod</i> s sanitários	30
32. Instalação dos painéis laterais	31,16
33. Instalação do painel de cobertura	32,24
34. Instalação de tubagens para sistema AVAC	33
35. Colocação de pavimento na casa de banho	34
36. Instalação de cerâmicas e mobiliário na casa de banho	35
37. Colocação de pavimento no módulo	36
38. Pintura e acabamentos no interior do módulo	37
39. Inspeção e teste de qualidade	38
40. Embalamento e armazenamento	39

Por meio da análise da informação contida na tabela 2 é possível elaborar um diagrama de precedências do sistema produtivo. O diagrama de precedência é uma ferramenta que permite representar todos os relacionamentos que existem entre as várias atividades do processo produtivo.

Da análise da figura 43 é possível identificar 4 famílias de produtos, que para efeito de cálculos futuros na presente dissertação, são consideradas famílias mono-produto (3 semiacabados e 1 produto final), sendo elas:

- **FP1** - Painéis Laterais;
- **FP2** - Painéis de Cobertura;
- **FP3** - Painéis de Chão;
- **FP4** - Módulos.



Legenda:

- Produção de painéis laterais
- Produção de painéis de cobertura
- Produção de painéis de chão
- Assemblagem dos módulos
- Representação de atividade
- - Relação de precedência

Figura 43 - Diagrama de Precedências do Processo Produtivo

Ora daqui conclui-se que o sistema de produção será composto por 4 células de produção (**CFP1, CFP2, CFP3 e CFP4**)

Os produtos que compõem cada família de produtos identificada, serão, na sua essência, muito semelhantes. As características dimensionais, serão provavelmente, a característica diferenciadora dos diversos produtos dentro das famílias de produtos, com exceção da FP1, que no caso poderão existir diferenças entre os produtos que a compõem ao nível dos acabamentos finais, que se refletirá nos fluxos internos da célula de produção destinada à produção desta família de produtos.

4.4.2 Instanciação de células conceituais

A fase de instanciação das células conceituais consiste, basicamente, na seleção da melhor configuração operacional para cada célula de produção identificada. Nesta fase é necessário identificar a existência ou não de fluxos intercelulares e, caso se verifiquem esses fluxos, é necessário avaliar a predisposição

para a aquisição de máquinas para eliminar esses fluxos ou até mesmo, reorganizar as famílias de produtos para eliminar tais fluxos.

Ainda nesta fase, será necessário determinar o número necessário de máquinas afetas a cada família de produtos e definir os fluxos intracelulares.

Num tradicional caso de estudo de reorganização de um sistema produtivo, seria necessário perceber o número de máquinas disponíveis para a realização de cada operação e, depois de definidos os fluxos intracelulares, afetar as máquinas a cada célula de produção começando pela mais complexa.

No caso de estudo em concreto, uma vez que não existe ainda um sistema de produção no ativo e dado que devemos, sempre que possível, optar por fluxos diretos dentro das células de produção, será pressuposto que não existe limites de recursos de máquinas, com exceção da máquina **M1**. Assim sendo, na tabela seguinte estão representados os planos sequenciais para cada família de produtos.

Tabela 3 - Planos sequenciais das famílias de produtos

FP1	OpA1 – OpA2 – OpA3 – OpA4 – OpA5 – OpA6 – OpA7 – OpA8 – OpA9 – OpA10 – OpA11 – OpA12 – OpA13 – OpA14 – OpA15 – OpA16
FP2	OpA1 – OpA17 – OpA18 – OpA19 – OpA20 – OpA21 – OpA22 – OpA23 – OpA24
FP3	OpA1 – OpA25 – OpA26 – OpA27 – OpA28 – OpA29 – OpA30
FP4	OpA31 – OpA32 – OpA33 – OpA34 – OpA35 – OpA36 – OpA37 – OpA38 – OpA39 – OpA40

Considerando a sequência de operações da tabela 3, o passo seguinte centra-se em determinar o número de máquinas necessárias para sequência de operações.

Para tal é necessário a informação da quantidade total a produzir de cada produto e os tempos operatórios das gamas operatórias correspondentes a cada produto.

Para determinar o tempo de operação das diferentes gamas operatórias, considerou-se a produção de módulos com uma implantação de 30m². Considerando o módulo tipo apresentado na figura 30 procedeu-se ao cálculo dos m² em média dos painéis laterais:

$$\text{Média } m2 \text{ dos painéis laterais} = \frac{(3.4*3.8)*2+(3.4*7.9)*2}{4}$$

Os painéis laterais terão, em média, 19.9m². Os painéis de chão e cobertura terão cerca de 30m².

Para a FP1 a quantidade necessária a produzir num turno de 8h é de 32 painéis, para a FP2 e FP3, 8 painéis e para a FP4, 8 módulos.

Na tabela 4 está representado o cálculo para a FP1.

Tabela 4 - Cálculo das necessidades de máquinas para a FP1

Tempos operatórios																
FP1	OpA1	OpA2	OpA3	OpA4	OpA5	OpA6	OpA7	OpA8	OpA9	OpA10	OpA11	OpA12	OpA13	OpA14	OpA15	OpA16
P1	4.7	8.3	2.8	5.5	3	2	15	5	2.8	5.5	2.8	5.5	2	60	120	10
Carga																
P1	150.4	265.6	89.6	176	96	64	480	160	89.6	176	89.6	176	64	1920	3840	320
Número de máquinas necessárias																
	0.31	0.55	0.19	0.37	0.2	0.13	1	0.33	0.19	0.37	0.19	0.37	0.13	4	8	0.67
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	8	1
M1	1															
M2		1														
M3			1						1		1					
M4				1						1		1				
M5								1								
M10					1		1									
M11						1							1			
M12																1

Tabela 5 - Cálculo das necessidades de máquinas para a FP2

Tempos operatórios									
FP2	OpA1	OpA17	OpA18	OpA19	OpA20	OpA21	OpA22	OpA23	OpA24
P2	7	20	15	2	7.5	10	15	2	10
Carga									
P2	56	160	120	16	60	80	120	16	80
Número de máquinas necessárias									
	0.12	0.33	0.24	0.03	0.125	0.17	0.25	0.03	0.17
	1	1	1	1	1	1	1	1	1
M1	1								
M6		1							
M7			1				1		
M8						1			
M10					1				
M11				1				1	
M12									1

Tabela 6 - Cálculo das necessidades de máquinas para a FP3

Tempos operatórios							
FP3	OpA1	OpA25	OpA26	OpA27	OpA28	OpA29	OpA30
P3	7	20	15	2	15	10	20
Carga							
P3	56	160	120	16	120	80	160
Número de máquinas necessárias							
	0.12	0.33	0.24	0.03	0.24	0.17	0.33
	1	1	1	1	1	1	1
M1	1						
M6		1					
M7			1				1
M8						1	
M10					1		
M11				1			

O cálculo das necessidades de máquinas para a FP4 não foi realizado uma vez que, as máquinas consideradas não operam na CFP4.

De notar ainda que, a máquina M1 é o único equipamento com restrição de aquisição. No caso, esta máquina, pelo seu elevado custo de aquisição e também por recomendação dos fabricantes só é possível e necessário, a compra de um exemplar deste tipo. Ora pela taxa de ocupação das diferentes células, é possível concluir que face à procura diária, a máquina M1 satisfaz a procura, ora vejamos: $1 - 0.12 - 0.12 - 0.31 = 0.45$. Concluimos assim, que a máquina M1 opera ainda com folga.

De notar ainda que, existem operações sem atribuição de máquinas, nomeadamente OpA14 e OpA15, uma vez que, estas operações não utilizam as máquinas consideradas para o processamento de trabalho. Os trabalhos realizados nessas operações fazem-se valer do conhecimento e força humana.

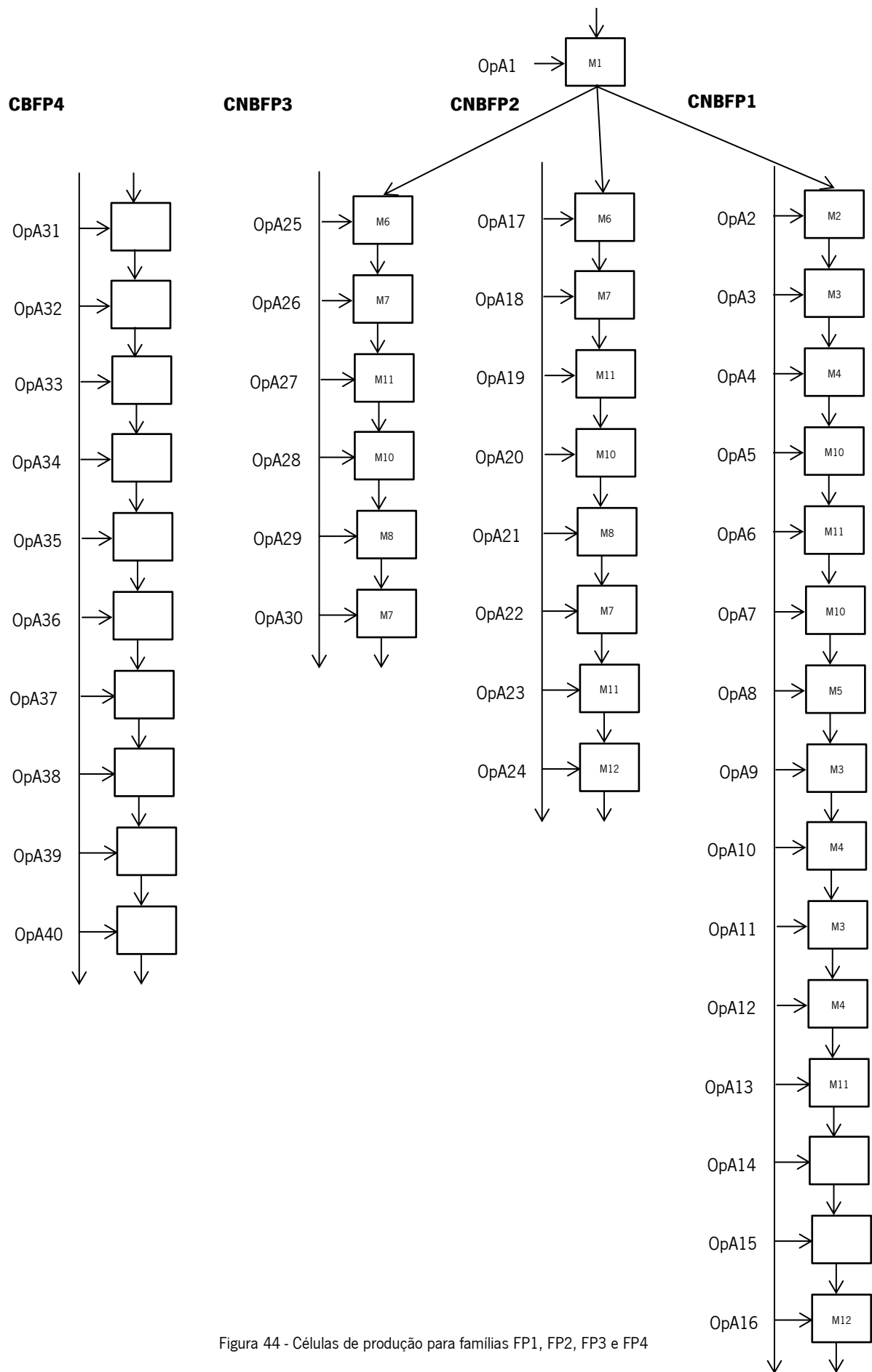


Figura 44 - Células de produção para famílias FP1, FP2, FP3 e FP4

Da análise da figura 44, conclui-se que por existir uma dependência das células **CNBFP1**, **CNBFP2** e **CNBFP3** em comum com o centro de corte de vigas e colunas composto pela máquina **M1**, é possível afirmar que o sistema de produção é composto por 3 células híbridas e 1 célula básica **CBFP4**. Assim sendo, tendo em consideração as configurações operacionais existentes e uma vez que tanto na célula básica formada como nas células não básicas não existem fluxos inversos, concluímos que a configuração mais adequada para a célula **CBFP4** será uma célula *Just-in-Time* (CJIT).

Para as restantes 3 células não básicas, a configuração operacional mais adequada poderá ser as células de resposta rápida ou *quick response manufacturing* (CQRM).

4.4.3 Instanciação de postos de trabalho

Na fase de instanciação dos postos de trabalho, procura-se determinar o número mínimo de postos de trabalho, realizar o balanceamento das células de produção e afetar os operadores disponíveis aos postos de trabalho selecionados. Esta afetação é realizada conforme as características e competências dos operadores disponíveis, isto é, procura-se alocar um determinado operador a um posto de trabalho onde os requisitos de trabalho se assemelhem o mais possível às características do operador afeto. Isto minimiza os tempos de operação, melhora o ritmo e qualidade de trabalho.

O primeiro passo para a instanciação dos postos de trabalho passa por calcular o número mínimo de postos de trabalho. Para tal podemos recorrer à seguinte fórmula:

$$N_{min \text{ de postos de trabalho}} = \frac{\text{Tempo de atravessamento}}{\text{Takt Time}}$$

Posto isto, podemos calcular o número mínimo de postos de trabalho para cada célula formada, tendo em conta que para a **CNBFP1** o TT é dado pela seguinte fórmula:

$$\text{Takt Time (TT)} = 480 \text{ min} / 32 \text{ unidades} = \mathbf{15 \text{ minutos/unidade}}$$

- **CNBFP1** – considerando TT = 15min e TA = 254.9min

$$N_{min \text{ de postos de trabalho}} = \frac{254.9}{15} = 16.99 \approx 17 \text{ operadores}$$

- **CNBFP2** – considerando TT = 60min e TA = 88.5min

$$N_{min \text{ de postos de trabalho}} = \frac{88.5}{60} = 1.48 \approx 2 \text{ operadores}$$

- **CNBFP3** – considerando TT = 60min e TA = 89min

$$N_{\text{min de postos de trabalho}} = \frac{89}{60} = 1.48 \approx 2 \text{ operadores}$$

No caso da família de produtos 4, é necessário primeiro explicar os tempos de operação da respetiva gama operatória. Na tabela 7 estão representados os respetivos tempos de operação e respetiva carga.

Tabela 7 – Tempos operatórios da gama de operações da família de produtos FP4

Tempos operatórios										
FP4	OpA31	OpA32	OpA33	OpA34	OpA35	OpA36	OpA37	OpA38	OpA39	OpA40
P4	180	360	60	180	180	120	180	300	480	240
Carga										
P4	1440	2880	480	1440	1440	960	1440	2400	3840	1920

- **CBFP4** – considerando TT = 60min e TA = 2120

$$N_{\text{min de postos de trabalho}} = \frac{2120}{60} = 36.3 \approx 37 \text{ operadores}$$

Depois do número mínimo de postos de trabalho determinado, segue-se o segundo passo que consiste no balanceamento das células de produção. Para o efeito, recorreu-se ao método de Carga Agregada e Peso Posicional, admitindo TC=480min.

Tabela 8 - Nº de postos de trabalho para CNBFP1

	32			
CNBFP1	P1	Carga	PP	PT
OpA1	4.7	150.4	8156.8	1
OpA2	8.3	265.6	8006.4	2
OpA3	2.8	89.6	7740.8	
OpA4	5.5	176	7651.2	3
OpA5	3	96	7475.2	
OpA6	2	64	7379.2	
OpA7	15	480	7315.2	4
OpA8	5	160	6835.2	5
OpA9	2.8	89.6	6675.2	
OpA10	5.5	176	6585.6	
OpA11	2.8	89.6	6409.6	6
OpA12	5.5	176	6320	
OpA13	2	64	6144	
OpA14	60	1920	6080	7,8,9 e 10
OpA15	120	3840	4160	11,12,13,14,15,16,17 e 18
OpA16	10	320	320	

Tabela 9 - N° de postos de trabalho para CNBFP2

	8			
CNBFP2	P2	Carga	PP	PT
OpA1	7	56	708	–
OpA17	20	160	652	19
OpA18	15	120	492	
OpA19	2	16	372	
OpA20	7.5	60	356	
OpA21	10	80	296	
OpA22	15	120	216	
OpA23	2	16	96	20
OpA24	10	80	80	

Tabela 10 - N° de postos de trabalho para CNBFP3

	8			
CNBFP3	P3	Carga	PP	PT
OpA1	7	56	712	–
OpA25	20	160	656	21
OpA26	15	120	496	
OpA27	2	16	376	
OpA28	15	120	360	
OpA29	10	80	240	
OpA30	20	160	160	22

Tabela 11 - N° de postos de trabalho para CBFP4

	8			
CBFP4	P4	Carga	PP	PT
OpA31	180	1440	18240	23,24 e 25
OpA32	360	2880	16800	26,27,28,29,30 e 31
OpA33	60	480	13920	32
OpA34	180	1440	13440	33,34 e 35
OpA35	180	1440	12000	36,37 e 38
OpA36	120	960	10560	39 e 40
OpA37	180	1440	9600	41,42 e 43
OpA38	300	2400	8160	44,45,46,47 e 48
OpA39	480	3840	5760	49,50,51,52,53,54,55 e 56
OpA40	180	1920	1920	57,58 e 59

Nas tabelas 8,9,10 e 11 estão representados os balanceamentos para cada célula de produção criada. De reparar que dado os tempos de operação elevados, a célula **CBFP4** é a célula que necessita de mais postos de trabalho para operar. Ainda de reparar que, uma vez que as 3 células não básicas partilham uma secção tecnologia, isto é, partilham a máquina **M1**, no balanceamento das células **CNBFP2** e **CNBFP3** não foi considerada a operação OpA1. Nas células **CNBFP2** e **CNBFP3** é

possível fazer um reajuste à distribuição das operações pelos postos de trabalho assim sendo, na **CNBFP2** o posto de trabalho 19 agrega as operações OpA17, OpA18, OpA19 e OpA20 e o posto de trabalho 20 agrega as operações OpA21, OpA22, OpA23 e OpA24. O mesmo se pode fazer para na **CNBFP3** com o posto de trabalho 21 agregar as operações OpA25, OpA26 e OpA27 e o posto de trabalho 22 agrega as operações OpA28, OpA29 e OpA30.

O último passo na instanciação dos postos de trabalho passaria por alocar os operadores disponíveis aos postos de trabalho definidos. Uma vez que no caso de estudo em concreto não existem operadores por não existir um sistema produtivo no ativo, este passo fica sem efeito.

4.4.4 Organização intracelular e controlo

A organização intracelular e controlo tem como objetivo organizar e definir o melhor arranjo para máquinas, definir o modo operativo dos operadores e a sequência dos produtos lançados para produção. Da análise do esquema da figura 42 é possível verificar que para as tomadas de decisões nesta fase é necessário ter em consideração as saídas da fase da instanciação de células concetuais e da instanciação de postos de trabalho isto porque, a definição da implantação intracelular é condicionada pelo tipo de máquinas partilhadas, pelos postos de trabalho definidos, pela sequência de operações e fluxos e também pela composição da célula.

Um arranjo intracelular eficiente permitirá a produção de artigos com maior qualidade, menor custo de produção e possibilitará a minimização das movimentações dos artigos e operadores.

A definição do arranjo intracelular deve ter em consideração as dimensões dos artigos produzidos, isto porque, artigos de dimensões pequenas são facilmente manuseáveis, no entanto, artigos de dimensões consideráveis, o seu manuseamento, em grande parte das vezes, necessita do uso de maquinaria específica para o seu transporte. Ora sendo assim, no momento de definir os arranjos intracelulares é necessário ter em consideração os fatores as restrições mencionadas.

Nas fases anteriores desta dissertação, concluiu-se que o sistema produtivo em causa será composto por 3 células não básicas híbridas e 1 célula básica de fluxo direto. Conclui-se também que as configurações operacionais mais adequadas para as 3 células não básicas seria CQRM e para a célula básica CJIT.

A célula CJIT ou *Just-in-Time*, podem ser divididas em diversos modelos com as mesmas características e objetivos. Um desses modelos é o *One-piece-flow* (OPF). Este modelo é caracterizado pelos fluxos contínuos, como anteriormente indicado, o que resulta no fabrico de peças individualizadas, ou seja, lotes unitários de peças. Este tipo de configuração operacional é caracterizado pelo arranjo em linha.

Tendo em consideração as características dimensionais dos módulos, o tipo de equipamento para a movimentação dos mesmos entre os vários postos de trabalho e a configuração operacional escolhida, conclui-se que a célula **CBFP4** terá um arranjo intracelular linear.

Nas células CQRM ou *Quick-response-manufacturing* determinadas, uma vez que o número de operadores definidos é inferior ao número de operações, com exceção na **CNBFP1**, o arranjo intracelular preferencial seria em U na tentativa de diminuir as distâncias percorridas pelos operadores. Ora uma vez mais, as dimensões dos painéis e o tipo de maquinaria utilizada não permitem tal arranjo, assim sendo, as 3 células não básicas também terão um arranjo intracelular linear. Para refutar esta escolha, uma vez que a gama operatória dos produtos constituintes das diferentes famílias de produtos será igual, faz sentido um arranjo linear para corresponder à sequência de operações comum a todos os produtos/artigos.

Nesta fase de definição da organização intracelular e controlo é necessário também definir os modos operatórios das diferentes células de produção.

O modo operatório de uma célula de produção consiste na escolha da melhor forma de afetar os operadores às diversas atividades de cada célula.

Tendo em consideração a complexidade do processo produtivo e a necessidade de mão-de-obra especializada para determinados postos de trabalho, é essencial garantir que os postos de trabalho afetos a um determinado operador não variam, isto é, é essencial permitir a especialização dos operários em determinadas áreas do sistema produtivo para garantir a máxima eficiência e qualidade possível.

Assim sendo, o modo operatório que atende a estes requisitos é o *Working balance* (WB). Provavelmente o modo operatório mais tradicional, o WB distribui de forma equilibrada a carga de trabalho pelos diferentes operadores e afeta a cada um deles, de forma invariável e permanente, um determinado número de tarefas.

Este tipo de modo operatório atribui uma zona de trabalho específica a cada operador, não permitindo a mistura com outras zonas de trabalho de outros operadores.

Tabela 12 - Tabela resumo da Configuração operacional, Arranjo intracelular e Modo operatório

Célula	Configuração operacional	Arranjo intracelular	Modo operatório
CNBFP1	CQRM	Linear	WB
CNBFP2	CQRM	Linear	WB
CNBFP3	CQRM	Linear	WB
CBFP4	CJIT	Linear	WB

4.4.5 Arranjo integrado das células para formação do SPOP

O arranjo integrado das células de produção é a última das etapas para a formação de um sistema de produção orientado ao produto. Esta é a fase onde culminam todas as informações até então recolhidas e todas as decisões até então tomadas.

Tal como no arranjo intracelular, o arranjo intercelular depende de vários fatores como a localização de máquinas, os meios de movimentação, os fluxos entre as células partilhas, caso existam, ou até mesmo do espaço disponível e do tamanho das células de produção. Como ponto de partida, apesar de todos os fatores que condicionam o arranjo intercelular, o objetivo de minimizar as distâncias percorridas e assim os custos associados a estas, deve ser o começo para iniciar o arranjo intercelular.

Para além do objetivo de minimizar os custos de movimentações, num sistema de produção é necessário ter em consideração que as células de produção não interagem apenas entre si. Existe toda uma rede de informação, de abastecimento de materiais e de interação com outros sistemas de produção que devem ser levados em consideração com o objetivo principal, entregar os produtos que os clientes querem, no momento exato, com a melhor qualidade e com o menor custo possível.

No sistema de produção em desenvolvimento, existe uma clara restrição à partida. As células não básicas partilham entre si a máquina **M1**, posto isto, é necessário perceber o melhor arranjo entre estas. Uma vez que a célula que mais ocupa a produção de **M1** é a célula **CNBFP1** e que dado as necessidades de proximidade desta com a máquina em questão para garantir um fluxo contínuo e automatizado do processo, conclui-se assim que a máquina **M1** deverá estar o mais próximo possível da célula **CNBFP1** e até mesmo se possível posicionadas linearmente uma com a outra.

Outra restrição a priori é o facto de que as 3 células não básicas interagem obrigatoriamente com a célula básica uma vez que, o resultante das suas produções irá ser utilizado para a montagem dos módulos na célula **CBFP4**. Assim sendo, é necessário perceber os momentos exatos e as localizações exatas dessas necessidades para posicionar o fim destas células o mais próximo possível da entrada dos produtos na célula básica.

Na figura 45 está representado um possível arranjo intercelular e os respetivos fluxos. Tendo em consideração as movimentações dos produtos das famílias de produtos **FP1** e **FP2**, considerou-se que a direção dos fluxos internos das células **CNBFP1** e **CNBFP2** estão em sentido oposto aos fluxos internos das células **CNBFP3** e **CBFP4**. De notar ainda que, a distância entre a máquina **M1** e o início da célula **CNBFP3** é a maior de todas as movimentações consideradas, no entanto, as vantagens desta implantação superam em muitos os custos acrescidos com o aumento desta distância.

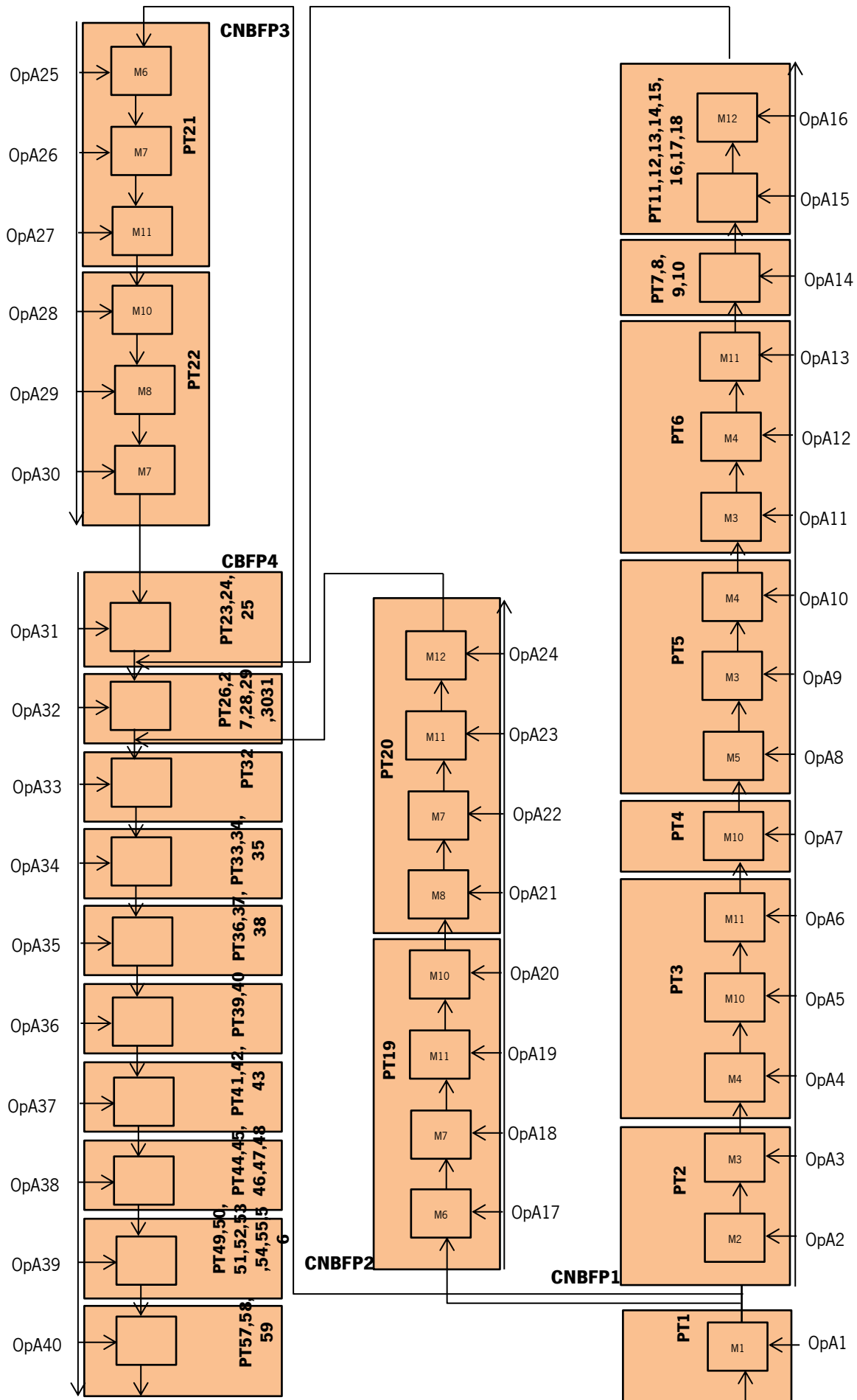


Figura 45 - Implantação intercelular do SPOP

5. IMPLANTAÇÃO DE LAYOUT

A distribuição organizada dos componentes de um sistema de produção num determinado espaço industrial pode definir o conceito de *layout*. Contudo, o conceito de *layout*, ou arranjo físico, abrange outro tipo de instalações, nomeadamente, armazéns, escritórios, lojas de comércio, etc. Segundo Heragu (1997), o *layout* de uma instalação pode ser definido como sendo a organização de tudo o que é necessário para a produção de bens ou prestação de serviços.

À semelhança do que foi abordado no capítulo anterior em relação à implantação intercelular de um sistema de produção, o planeamento de um *layout* deve ter em consideração a minimização dos custos de movimentação de materiais e operadores. No entanto, a segurança das instalações e a flexibilidade de reorganização do *layout* também devem ser levadas em consideração no planeamento do arranjo físico de uma instalação.

Posto isto, existem métodos de otimização de *layout's* e estes podem ser classificados tendo em conta o ponto de partida, isto é, podemos classificar os métodos como construtivos quando se desenvolve um *layout* novo, ou melhoria quando se reorganiza um *layout* existente com vista à melhoria da disposição de equipamentos e fluxos de materiais e produtos.

Uma vez que, no caso de estudo em concreto, ainda não existe um sistema de produção implantado, faz sentido a utilização de métodos construtivos.

Os métodos/heurísticas construtivos consistem na obtenção de um arranjo espacial viável e não ótima de uma instalação. Estes métodos são caracterizados pela construção passo a passo de uma solução viável tendo como critérios de seleção o nível de importância e respectivas adjacências das diferentes secções que constituem o *layout*.

Posto isto, de entre os diversos métodos/heurísticas construtivas existentes, optou-se pela utilização do método CORELAP (*Computerized Relationship Layout Planning*).

Este método construtivo foi desenvolvido por Lee e Moore e apresentado pela primeira vez em 1967 (Lee & Moore, 1967). O seu funcionamento divide-se em duas fases: 1^a – determinar a ordem de colocação dos departamentos na implantação; 2^a – colocar os departamentos na implantação.

Na primeira fase, é necessário atribuir Valores do Grau de Relacionamento (VGR) aos Graus de Relacionamento (GR). Posto isto, calcula-se a taxa de proximidade total (TPT) para cada departamento. O departamento com maior TPT será o primeiro a ser implantado no *layout*. De seguida, seleccionam-se os departamentos com GR do tipo A com os departamentos já implantados. Caso não se verifique nenhuma relação deste tipo, inicia-se uma nova seleção por departamentos com GR do tipo E com os departamentos já implantados e por aí em diante até ao GR do tipo X. Em caso de empate entre

departamentos, prevalece o de maior TPT, de seguida o de maior área e por fim o número do departamento.

Na segunda fase, inicia-se a colocação dos departamentos no espaço disponível começando pelo departamento com maior TPT. O segundo departamento poderá ser colocado em qualquer posição adjacente ao primeiro. Daí em diante, os restantes departamentos são colocados em posições adjacentes aos até então colocados por forma a maximizar a soma dos valores pesados dos GR (SWGR).

5.1 Desenvolvimento do *Layout* com recurso ao método CORELAP

Para o desenvolvimento do *Layout* é necessário listar os departamentos a considerar. De notar que, fazem parte dos departamentos, para além das células de produção, locais de armazenamento de produtos e semiacabados, corredores de fluxos de produtos e materiais. Assim sendo, segue a lista dos departamentos considerados:

1. Célula de Produção CNBFP1;
2. Célula de Produção CNBFP2;
3. Célula de Produção CNBFP3;
4. Célula de Produção CBFP4;
5. Local de armazenamento dos painéis laterais;
6. Local de armazenamento dos painéis de cobertura;
7. Via de escape para módulos;
8. Máquina M1.

De seguida, atribui-se os Valores do Grau de Relacionamento (VGR) aos Graus de Relacionamento (GR).

Tabela 13 - Grau de Relacionamento (GR) e Valores do Grau de Relacionamento (VGR)

GR		VGR
A	Absolutamente necessário	6
E	Especialmente importante	5
I	Importante	4
O	OK	3
U	Não importante	2
X	Não desejável	1

Com os departamentos enumerados e os GR e VGR definidos é possível então elaborar a tabela de relacionamento entre os diversos departamentos.

Tabela 14 - Tabela de relacionamentos entre departamentos

N.	Departamento	1	2	3	4	5	6	7	8	TPT
1	Célula de Produção CNBFP1		E	I	I	A	U	X	A	28
2	Célula de Produção CNBFP2	E		I	I	U	A	X	E	27
3	Célula de Produção CNBFP3	I	I		A	U	U	O	E	26
4	Célula de Produção CBFP4	I	I	A		A	A	A	X	33
5	Local de armazenamento dos painéis laterais	A	U	U	A		E	U	U	25
6	Local de armazenamento dos painéis de cobertura	U	A	U	A	E		U	U	25
7	Via de escape para módulos	X	X	O	A	U	U		U	16
8	Máquina M1	A	E	E	X	U	U	U		23

Da análise da tabela 13 podemos concluir que o primeiro departamento a ser implantado será a célula de produção CBFP4.

De seguida determinou-se a ordem de colocação dos restantes departamentos como mostra na tabela 14.

Tabela 15 - Ordem de colocação dos departamentos

Ordem	Departamento	Justificação
1°	D4	Máximo TPT
2°	D3	$GR(*,D4)A = \{D3,D5,D6,D7\}$ $TPT(D3) > TPT(D5,D6,D7)$
3°	D5	$GR(*,D4)A = \{D5,D6,D7\}$ $TPT(D5) = TPT(D6)$ $A(D5) > A(D6)$
4°	D1	$GR(*,D4)A = \{D6,D7\}$ $GR(*,D5)A = \{D1\}$ $TPT(D1) > TPT(D6,D7)$
5°	D6	$GR(*,D4)A = \{D6,D7\}$ $GR(*,D1)A = \{D8\}$ $TPT(D6) > TPT(D7,D8)$
6°	D2	$GR(*,D4)A = \{D7\}$ $GR(*,D6)A = \{D2\}$ $TPT(D2) > TPT(D7)$
7°	D8	$GR(*,D4)A = \{D7\}$ $GR(*,D1)A = \{D8\}$ $TPT(D8) > TPT(D7)$
8°	D7	—

Depois de determinada a ordem de colocação dos departamentos, segue-se a segunda fase do método - colocar os departamentos na implantação. Para tal será necessário representar esquematicamente os diferentes departamentos. Cada departamento será representado com um retângulo que terá as dimensões aproximadas de cada departamento. O início quer dos fluxos de materiais quer dos processos

produtivos será representado com o círculo vazio. O mesmo acontecerá com o fim, mas neste caso, este será representado com um círculo a cheio.

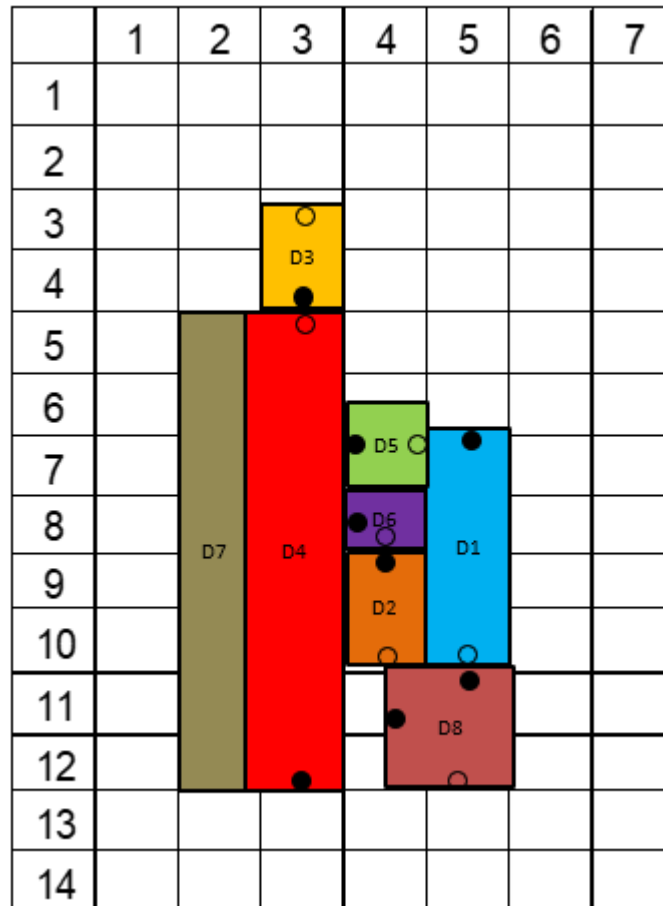


Figura 46 - Solução de implantação dos diferentes departamentos

Na figura 46 está representada a melhor solução de implantação dos 8 departamentos.

Com a disposição atual, o sistema de produção terá no mínimo uma implantação de 25000m², uma vez que, faltam considerar as distâncias mínimas entre postos de trabalho, locais de carga e descarga de materiais, armazéns de armazenamento entre outros que só poderão ser dimensionados numa fase mais pormenorizada do desenvolvimento do sistema produtivo.

6. CONCLUSÕES

No presente capítulo são apresentadas as considerações finais sobre o trabalho de investigação elaborado, as dificuldades sentidas e o trabalho futuro necessário para a continuação do desenvolvimento do trabalho realizado.

6.1 Considerações Finais

O projeto de investigação apresentado, desenvolvido na Bysteel *fs*, surge da necessidade de desenvolver um sistema produtivo para a produção de módulos para a indústria da construção modular. Ora, face ao objetivo proposto, surge a necessidade de entender o estado atual da construção civil, o nível de maturação de novas técnicas de construção, vantagens e desvantagens das novas técnicas de construção face às técnicas de construção convencionais e é necessário também, perceber as necessidades e limitações do sistema de produção a desenvolver.

A construção modular não é um conceito recente, no entanto, face ao aumento da procura por novas habitações e espaços de trabalho, as empresas da construção civil vêm-se obrigadas, por motivos económicos, mas também por motivos ambientais, a investir no desenvolvimento e melhoria de novas técnicas de construção. De facto, a construção modular permite a redução substancial do tempo total de construção, poderá proporcionar a diminuição dos custos de fabrico com a aproximação mais exata às reais necessidades de materiais que poderá conduzir à diminuição dos impactos ambientais causados pela construção civil. Por último, o aumento da qualidade dos produtos entregues poderá também ser uma realidade com a construção modular uma vez que, estes são produzidos sobre ambientes controlados e sujeitos a rigorosos controlos de qualidade.

Tendo por base todos os fatores em cima mencionados, a presente dissertação de mestrado foca-se em desenvolver um *roadmap* de implantação de um sistema de produção de módulos para a indústria da construção modular considerando para tal as boas práticas e pensamentos da Filosofia *Lean* e as técnicas e ferramentas *Lean*. Para tal foi necessário perceber os constituintes principais dos módulos, foi necessário perceber as fases principais para a produção de todos os constituintes dos módulos, o tipo de sistema produtivo a implementar e o *layout* mais adequado, tendo por base a informação recolhida.

Numa primeira fase, juntamente com a equipa de desenvolvimento foi possível determinar que a configuração estrutural preferencial dos módulos fabricados serão do tipo *4 sided modules*. Isto conduz-

nos às necessidades macros dos módulos – 4 painéis laterais; 1 painel de cobertura; 1 painel de chão. Os módulos terão uma área de implantação entre os 20-30m².

Foi possível também concluir que os componentes base serão fabricados com recurso a madeira, assim sendo, conduziu-se a investigação por equipamentos especializados para o tipo de material utilizado, tendo sido analisado propostas dos dois maiores fornecedores deste tipo de equipamentos no mercado: Randek e Homag.

Posto isto, iniciou-se o trabalho para o desenvolvimento do sistema produtivo. Concluiu-se que, dado as características do projeto em questão, o mais indicado será desenvolver um sistema de produção orientado ao produto composto por células de produção.

Tendo por base os constituintes principais dos módulos, e as gamas operatórias de cada constituinte, definiu-se que serão formadas 4 famílias de produtos e por conseguinte, 4 células de produção dedicadas. As 3 células de produção dedicadas à produção dos painéis são classificadas como células não básicas híbridas uma vez que, por força da tecnologia existente, convencionou-se que estas partilharam entre si a máquina de corte de vigas e colunas de madeira. As 3 células não básicas abastecerão a célula básica de montagem dos módulos.

Durante os trabalhos de investigação e desenvolvimento, em conjunto com a equipa multidisciplinar constituída por diversos colaboradores do grupo DST, à qual faz parte a empresa Bysteel *fs*, foi possível concluir que é estimado a procura anual de 2000 módulos, o que se traduz num *Takt Time* de 60 minutos que será igual para a célula de produção dos painéis de chão e para a célula de painéis de cobertura. A célula de painéis laterais terá um *Takt Time* de 15 minutos uma vez que, para suprir a procura de 2000 módulos anuais será necessário produzir, em média, 8000 painéis laterais por ano.

Por fim, tendo as células instanciadas e os fluxos intercelulares definidos recorreu-se à heurística construtiva CORELAP para o desenvolvimento de um *layout* viável para o sistema de produção. Depois de todos os departamentos implantados, foi possível concluir que a implantação terá no mínimo 25000m².

6.2 Limitações

Apesar de no final desta dissertação de mestrado os objetivos terem sido cumpridos, nomeadamente o desenvolvimento e apresentação de todas as fases necessárias para a implantação de um sistema produtivo capaz de produzir módulos para a indústria da construção modular atendendo às necessidades previstas do mercado, enfrentaram-se diversas dificuldades e limitações que condicionaram o desenvolvimento eficiente do projeto.

O desconhecimento tecnologia ao nível da produção deste tipo de produtos destaca-se de todas as dificuldades sentidas, isto porque, para o desenvolvimento de um produto complexo como o produto em causa, é necessário um conhecimento detalhado ao nível dos constituintes, dos materiais necessários, dos tempos de processamento, das dificuldades na movimentação, entre muitos outros fatores que condicionam a produtividade e a eficiência de um sistema de produção.

Os efeitos provocados pela pandemia da Covid-19 fizeram-se sentir no ritmo de desenvolvimento da presente dissertação. Se é certo que atualmente podemos contornar a indisponibilidade de relações interpessoais com o recurso às tecnologias informáticas de videoconferência, também é certo que determinadas informações, como a perceção do funcionamento de sistemas de produção semelhantes e o diálogo com profissionais da área apenas se conseguem interagindo pessoalmente com tais situações.

6.3 Trabalho Futuro

Apesar dos objetivos propostos terem sido cumpridos, fica a ressalva que todo o projeto de investigação e desenvolvimento teve como base o conhecimento empírico dos diversos profissionais constituintes da equipa multidisciplinar. Isto poderá refletir-se nos tempos de processamento extrapolados que poderão não refletir a realidade. Assim sendo, como trabalho futuro proponho o desenvolvimento de um módulo primeiro de série para possibilitar o estudo e a aferição das reais necessidades para a sua produção.

Será necessário, também, depois de aferidos os tempos reais de processamento, perceber se cada uma das células desenvolvidas estará com folga ou se pelo contrário estarão sobrecarregadas. Caso estejam com folga, é importante perceber se a procura do mercado se mantém, se aumentou ou diminuiu a fim de, reestruturar as células de produção para irem de encontro a essas novas necessidades. Se porventura as células se encontrarem em situação de sobrecarga, será necessário realizar um estudo para implementação de novas soluções para fazer face à procura do mercado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albarran, E. G., (2008). *Construção com Elementos Pré-fabricados em Betão Armado: adaptação de uma solução estrutural “in situ” a uma solução pré-fabricada*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Alves, A. C. (2007). Projecto dinâmico de sistemas de produção orientados ao produto. Tese de doutoramento, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal. <http://hdl.handle.net/1822/7606>
- Alves, A.C., Silva, S.C., Lima, R.M.(2003). Sistemas de produção orientados ao produto: integrando células e pessoas. *Revista de Inovação Organizacional*, 109146. <http://hdl.handle.net/1822/19060>
- Brenner, J. (2019). The New Marriott In Manhattan is The World’s Tallest Modular Hotel. *Forbes*. Consultado em janeiro 25, 2022, em https://www.forbes.com/cdn.ampproject.org/c/s/www.forbes.com/sites/juliabrenner/2019/11/22/the-new-marriott-in-manhattan-is-the-worlds-tallest-modular-hotel/amp/?fbclid=IwAR00HLEEgfOnzxlh_6EiGgFF7wLpsGqPdgZZtKIsG1xz9KLySmz4kOLivc
- Carvalho, D. (2008). Introdução aos Sistemas de Produção. Consultado em Janeiro 20, 2022, em <http://pessoais.dps.uminho.pt/jdac/apontamentos/IntrodSistProd.pdf>
- Clancy, S. (2016) In an SOW triangle: Cost, speed and quality are a delicate balance. Consultado em Outubro 22, 2021, em <http://cwstrategies.staffingindustry.com/sowmanagementcostspeedand-qualityadelicatebalance/>
- Crotty Ray. (2012). the impact of Building information modeling transformation construction. <https://doi.org/10.4324/9780203836019>
- García, J. L., Maldonado, A. A., Alvarado, A., & Rivera, D. G. (2014). Human critical success factors for kaizen and its impacts in industrial performance. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(9–12). https://doi.org/10.1007/s00170013_54454
- Gerami Seresht, N., & Fayek, A. R. (2018). Dynamic Modeling of Multifactor Construction Productivity for EquipmentIntensive Activities. *Journal of Construction Engineering and Management*, 144(9), 04018091. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.19437862.0001549](https://doi.org/10.1061/(asce)co.19437862.0001549)
- Goulding J. & Arif M. (2013). Offsite Production and Manufacturing – Research Roadmap Report. *International Council for Research ad Innovation in Building and Construction*.
- Heragu, S. S. (1997). Facilities design. Boston: BWS
- Herbert, G. (1972). The Portable Colonial Cottage. *Journal of the Society of Architectural Historians*, 31(4), 261–275. <https://doi.org/10.2307/988810>
- INE Instituto Nacional de Estatística (2020). Preços da habitação desaceleram para 7,1% 3º Trimestre de 2020. Consultado em 24 de mar. de 2021. Disponível em https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_destaques&DESTAQUESdest_boui=415206648&DESTAQUESmodo=2
- Jonsson, H. & Rudberg, M. (2014). Classification of production systems for industrialized building: A production strategy perspective. *Construction Management and Economics*, 32(1–2), 53–69. <https://doi.org/10.1080/01446193.2013.812226>

- Laruccia, Mauro. (2014). Sustentabilidade e Impactos Ambientais da Construção Civil. ENIAC Pesquisa. 3. 6984. 10.22567/rep.v3i1.124.
- Lawson, R. M., & Ogden, R. G. (2008). "Hybrid" light steel panel and modular systems. *ThinWalled Structures*, 46(7–9). <https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.01.042>
- Lawson, R. M. (2007). *Building Design Using Modules*. New Steel Construction. Disponível em: https://www.steelconstruction.info/File:SCI_P348.pdf
- Lee, J., Park, M., Lee, HS. et al. (2017). Workflow dependency approach for modular building construction manufacturing process using Dependency Structure Matrix (DSM). *KSCE J Civ Eng* 21, 1525–1535. <https://doi.org/10.1007/s1220501610851>
- Lee, R. e Moore, J. M., (1967). CORELAP – computerized relationship layout planning. *Journal of Industrial Engineering*, 18, pp 195200.
- Liker, J. K., & Morgan, J. M. (2006). The toyota way in services: The case of lean product development. In *Academy of Management Perspectives*. <https://doi.org/10.5465/AMP.2006.20591002>
- Lima, Rui M. (2003). *Sistemas Distribuídos de Produção em Ambiente de Produção Simultânea*. Dissertação de doutoramento, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal. <http://hdl.handle.net/1822/378>
- Montgomery, D.C. (2009). *Introduction to Statistical Quality Control* (6th ed.). John Wiley & Sons Inc., Hoboken.
- Nam, S., Yoon, J., Kim, K., & Choi, B. (2020). Optimization of Prefabricated Components in Housing Modular Construction. *Sustainability*, 12(24), 10269. <https://doi.org/10.3390/su122410269>
- Nomura, J., & Takakuwa, S. (2006). Optimization of a number of containers for assembly lines: The fixed-course pickup system. *International Journal of Simulation Modelling*, 5(4). [https://doi.org/10.2507/IJSIMM05\(4\)3.066](https://doi.org/10.2507/IJSIMM05(4)3.066)
- Ohno, T. (1979). *Toyota Production System Beyond Large Scale Production* Taiichi Ohno. In *Production*.
- Ohno, T. (1988). *Toyota Production System: Beyond LargeScale Production*. Bookman.
- Old House Journal (2021). *Kit Houses from Sears, Roebuck*. A bungalow built from a precut kit sold through a catalog. Consultado em novembro 22, 2021, em <https://www.oldhouseonline.com/housetours/kithouses/>
- Omogbai, O., & Salonitis, K. (2017). The Implementation of 5S Lean Tool Using System Dynamics Approach. *Procedia CIRP*, 60. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.01.057>
- Patel, D., & Patel, D. M. (2013). Design and development of an internal milk-run material supply in automotive industry. *International Journal of Application or Innovation in Engineering*
- Pereira, B. E. F., (2012). *A Crise na Construção e a Reabilitação como Solução*. Dissertação de Mestrado, Universidade Fernando Pessoa – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Porto, Portugal.
- Pinto, J. P. (2009). *Pensamento Lean*. Lisboa: Lidel
- Lawson R. M. & Mis. P. Grubb, "Modular Construction using Light Steel Framing: An Architect's Guide SCI PUBLICATION P272," 1999.
- Razkenari, M., Fenner, A., Shojaei, A., Hakim, H., & Kibert, C. (2020). Perceptions of offsite construction in the United States: An investigation of current practices. *Journal of Building Engineering*, 29. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101138>
- Reason, P., & Bradbury, H. (Eds.). (2001). *Handbook of action research: Participative inquiry and practice*. London: Sage Publications

- Rother, M., & Shook, J. (2003). Learning to See: Value Stream Mapping to Add Value and Eliminate Muda (Lean Enterprise Institute). In Lean Enterprise Institute Brookline.
- Selva, V., (2021). Este projeto de casas pré-fabricadas quer revolucionar o conceito de urbanismo sustentável. *Idealista/news*. Consultado em maio 15, 2022, em <https://www.idealista.pt/news/imobiliario/habitacao/2021/03/29/46752-este-projeto-de-casas-pre-fabricadas-quer-revolucionar-o-conceito-de-urbanismo>.
- Shafai, L. (2012). Simulation Based Process Flow Improvement for Wood Framing Home Building Production Lines. ProQuest Dissertations and Theses, 103. <https://era.library.ualberta.ca/items/ca8c07751d204d8d93a66566751d2e68>
- Susman, G., & Evered, R. (1978). An Assessment of the Scientific Merits of Action Research. *Administrative Science Quarterly*, 23(4), 582-603. doi:10.2307/2392581
- Süße, M., & Putz, M. (2021). Generative design in factory layout planning. *Procedia CIRP*, 99. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.002>
- Tezel, A., & Koskela, L. J. (2016). Visual management in production management: A literature synthesis. *Journal of Manufacturing Technology Management*, (November 2017). <https://doi.org/10.1108/JMTM-08-2015-0071>
- Torres, J. T. C., (2010). *Sistemas Construtivos Modernos em Madeira*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- UKGBC (2014) Key statistics: Construction waste. Consultado em Julho 07, 2021, em <http://www.ukgbc.org/resources/additional/keystatisticsconstructionwaste>
- Vinod, M., Devadasan, S. R., Sunil, D. T., & Thilak, V. M. M. (2015). Six Sigma through PokaYoke: a navigation through literature arena. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81(1-4). <https://doi.org/10.1007/s0017001572179>
- Womack, J. P., & Jones, D. T. (1997). Banish waste and create wealth in your corporation. *Journal of the Operational Research Society*, 48(11), 1148. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600967>
- Womack, J. P., Jones, D. T., & Roos, D. (1990). *The Machine That Changed the World*. Macmillan Publishing Company.