

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO  
CIVIL**

*Aplicação dos princípios da Construção Enxuta em canteiros de obras suportada  
por simulação computacional*

**ALEXANDRE VICENTINI DE ARAUJO**

**SÃO CARLOS**

**2016**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E  
CONSTRUÇÃO CIVIL**

Aplicação dos princípios da Construção Enxuta em canteiros de obras  
suportada por simulação computacional

**ALEXANDRE VICENTINI DE ARAUJO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Estruturas e Construção Civil.

**Área de Concentração:** Sistemas Construtivos.

**Orientador:** Prof. Dr. José Carlos Paliari

**SÃO CARLOS**

**2016**

Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da Biblioteca Comunitária UFSCar  
Processamento Técnico  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A663a Araujo, Alexandre Vicentini de  
Aplicação dos princípios da Construção Enxuta em  
canteiros de obras suportada por simulação  
computacional / Alexandre Vicentini de Araujo. --  
São Carlos : UFSCar, 2017.  
146 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de  
São Carlos, 2016.

1. Construção Enxuta. 2. Mapa de fluxo de valor.  
3. Simulação. I. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

---

Folha de Aprovação

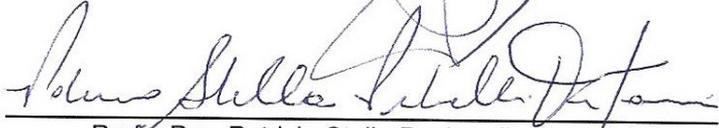
---

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Alexandre Vicentini de Araujo, realizada em 30/08/2016:



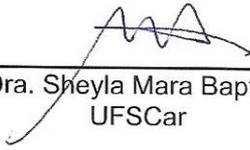
---

Prof. Dr. Jose Carlos Paliari  
UFSCar



---

Profa. Dra. Patricia Stella Pucharelli Fontanini  
UNICAMP



---

Profa. Dra. Sheyla Mara Baptista Serra  
UFSCar

# DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa Tatiana e ao meu filho Leonardo, que com amor, carinho e compreensão, me apoiaram e me confiaram essa missão.

# AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus pela oportunidade de realizar este sonho e dar um novo sentido à minha vida.

À minha esposa Tatiana, minha maior incentivadora, que sempre acreditou no resultado deste desafio, me apoiando com amor e paciência.

Ao meu filho Leonardo, nascido durante a elaboração desta dissertação, que me apresentou um novo horizonte e me inspirou a busca por novos desafios.

À minha família pelo apoio incondicional, em especial aos meus pais Orlando e Eliana, que me deram o dom da vida, aos sogros Oscar e Ana Maria, que me receberam como um filho, aos meus irmãos e cunhados que sempre estiveram do meu lado.

Agradeço ao Prof. José Carlos Paliari, orientador deste trabalho, pelo aprendizado, conversas e orientações que proporcionaram a realização dessa conquista. Agradeço pela sua disponibilidade e paciência durante todo o desenvolvimento do trabalho, pelas críticas e questionamentos que contribuíram para o meu crescimento profissional.

Agradeço ao amigo André Vivan pelas ricas discussões acerca do tema de nossas pesquisas, assim como, pelas sugestões dadas. Um verdadeiro amigo que o mestrado me presenteou.

A todos os colegas da pós-graduação pelo período de troca de experiências e aprendizado, em especial a Adriana Boni, pelo trabalho de campo realizado em conjunto.

Agradeço à empresa construtora na qual os estudos foram realizados, que permitiu a visita rotineira ao canteiro de obras, assim como ao engenheiro Alexandre e estagiário Túlio, que me receberam e auxiliaram no estudo.

Aos professores Sheyla Mara Baptista Serra e Itamar Aparecido Lorenzon, que compuseram a banca da qualificação, por aceitarem participar deste momento importante e oferecerem suas contribuições para enriquecer e aperfeiçoar este trabalho.

Às professoras Sheyla Mara Baptista Serra e Patricia Stella Pucharelli Fontanini, membros da banca examinadora, pelas correções, sugestões e apoio indispensáveis a este trabalho.

Aos professores e funcionários do departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, que muito colaboraram para conclusão deste trabalho.

Agradeço à CAPES pela bolsa de estudos que possibilitou a minha total dedicação à essa pesquisa.

A todos que de alguma maneira contribuíram para a realização deste trabalho.

ARAÚJO, A. V. **Aplicação dos princípios da construção enxuta em canteiros de obras suportada por simulação computacional**. 2016. 146 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas Construtivos) - Programa de pós-graduação em estruturas e construção civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.

## RESUMO

Este trabalho tem por objetivo propor e simular vários cenários com base nos princípios da Construção Enxuta objetivando executar uma estrutura reticulada de concreto armado de uma edificação residencial de múltiplos pavimentos dentro do prazo estipulado no seu planejamento, tendo-se como prazo de sete dias (*takt time*) para sua finalização. As estratégias de pesquisa adotadas incluíram a revisão bibliográfica, a identificação das oportunidades de aplicação dos princípios da Construção Enxuta, a elaboração do modelo computacional que representou a estrutura estudada, assim como os vários cenários e sua simulação. As oportunidades da aplicação dos princípios da Construção Enxuta foram identificadas por meio da avaliação do Mapeamento do Fluxo de Valor (MFV) e Linha de Balanço (LB). Foram elaborados 5 cenários, sendo o primeiro o de referência, a partir do qual foram simuladas as melhorias com uso do software de simulação ProModel® na versão 2014. Cada simulação realizada, com a consideração de uma melhoria com base nos princípios da Construção Enxuta, resultou na redução do *lead time*, convergindo, na simulação do último cenário, para um valor pouco superior ao *takt time*. Como indicador parcial dos cenários da simulação, foram avaliados o valor médio dos tempos de ciclo, movimentação, espera e conversão, dados estes extraídos do software utilizado. A comparação dos tempos entre o primeiro cenário, caracterizado como a representação da simples observação do canteiro acrescido sua variabilidade inerente, e o último cenário, caracterizado pela aplicação cumulativa dos princípios da construção enxuta, mostrou que o tempo de ciclo retornou uma redução na ordem de 29%, a movimentação aumentou em 105%, a espera reduziu em 54% e o tempo de conversão reduziu em 26%. O principal resultado alcançado no quinto cenário, foi um *Lead Time* de produção de 66,2 horas. Pode-se observar que o uso do MFV e da simulação fornece uma comunicação clara e concisa sobre abordagens enxutas e, desta forma, permite a compreensão e a evolução contínua dos conceitos *Lean*.

Palavras-chave: Construção enxuta. Mapa de fluxo de valor. Simulação.

ARAÚJO, A. V. *Application of principles of lean construction in construction sites supported by computational simulation*. 2016. 146 f. *Dissertation (Master in Constructive Systems)* - Programa de pós-graduação em estruturas e construção civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.

## ABSTRACT

*This research aims to propose and simulate various scenarios based on the principles of Lean Construction aiming to run a reticulated structure of reinforced concrete residential building with multiple floors within the stipulated time in its planning, taking as within seven days (takt time) to completion. The research strategies adopted included a literature review, identification of application opportunities of the principles of Lean Construction, the development of computational model that represented the studied structure, as well as the various scenarios and their simulation. The opportunities of application of the Lean Construction principles were identified through evaluation of Value Stream Mapping (VSM) and Line of Balance (LB). Five scenarios were prepared, the first being the reference, from which were simulated improvements with the use of simulation software ProModel® in 2014. Each version simulation carried out with consideration of an improvement based on the principles of Lean Construction, resulted in the reduction of lead time, converging in the simulation of the latter scenario, for a little higher than the takt time. As a partial indicator of simulation scenarios were evaluated the average cycle times, drive, hold and conversion data they extracted the software used. A comparison of time between the first scenario, depicted as representing the simple observation of the site plus the inherent variability and the latter scenario, characterized by cumulative application of the principles of lean construction, showed that the cycle time returned a reduction in the order of 29% handling increased by 105%, the expected reduced by 54% and the conversion time reduced by 26%. The main result achieved in the fifth scenario was a Lead Time 66.2 hours production. It can be seen that the use of the VSM and simulation provides a clear and concise communication on lean approaches and thus allows the understanding and continuing evolution of Lean concepts.*

*Keywords: Lean Construction. Value Stream Map. Simulation.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Casa do Sistema Toyota de produção .....	29
Figura 2 - Produção como um processo de fluxo .....	36
Figura 3 – Representação do Tempo de ciclo.....	40
Figura 4 – Representação do Tempo de Agregação de Valor .....	41
Figura 5 – Representação do <i>Lead Time</i> .....	41
Figura 6 - Gráfico de parâmetros para avaliação de eficácia do MFV .....	48
Figura 7 - Exemplo de LB de duas atividades, executadas por equipes distintas .....	49
Figura 8 - Taxa do alvo de entrega na LB .....	50
Figura 9 - Diferença indesejável na programação das atividades 2 e 3 de uma LB .....	50
Figura 10 - Programação correta de uma LB com dependência de tempo entre atividades 2 e 3 .....	51
Figura 11 - Versão simplificada do processo de modelagem.....	57
Figura 12 - Relação do mundo real e simulação com verificação e validação.....	58
Figura 13 - Fluxograma das estratégias adotadas nesta pesquisa.....	60
Figura 14 - Modelo para realização da revisão bibliográfica sistemática .....	63
Figura 15 - Procedimento iterativo da fase de processamento da RBS.....	67
Figura 16 - Planta baixa pavimento tipo.....	69
Figura 17 - Projeto estrutural do pavimento tipo.....	70
Figura 18 - Software ProModel® .....	77
Figura 19 - Janela para definir unidade de tempo e distância no software ProModel®.....	77
Figura 20 - Layout utilizado para modelagem de simulação.....	78
Figura 21 - Software StatFit® para definição da curva estatística a ser utilizar no software ProModel® .....	81
Figura 22 - Exportação da curva estatística adequada para o software ProModel® .....	81
Figura 23 - Definição do número de repetições por meio do software StatFit®.....	82

Figura 24 - Sequenciamento da obra .....	94
Figura 25 - Representação dos gastalhos executados na obra visitada.....	94
Figura 26 - Forma do pilar com as três faces colocadas.....	95
Figura 27 - Pré-montagem das armaduras realizadas no pavimento térreo.....	95
Figura 28 - Fôrma do pilar com as quatro faces colocadas .....	96
Figura 29 - Desforma de viga e pilar .....	97
Figura 30 - Escoras de sustentação para o molde das vigas .....	97
Figura 31 - Montagem do escoramento de assoalho .....	98
Figura 32 - Forma e armação da escada .....	98
Figura 33 - Mangueira utilizada para bombeamento do concreto .....	99
Figura 34 - Representação da armação da laje, passagens e embutidos no concreto .....	100
Figura 35 - Concretagem da laje .....	100
Figura 36 - Linha de balaço das atividades estudadas considerando os dados de planejamento da obra .....	101
Figura 37 - MFV “planejado” do pavimento-tipo .....	103
Figura 38 - Mapa de fluxo de valor da estrutura do pavimento-tipo.....	105
Figura 39 – Montagem do assoalho da obra visitada .....	106
Figura 40 - Laje da obra estudada .....	107
Figura 41 – Estoque de toda armação do pavimento em execução .....	108
Figura 42 – MFV com proposta de eliminação de estoque em processamento .....	109
Figura 43 - Oportunidade de aplicação de "5S" .....	110
Figura 44 - MFV “atual” com oportunidades de melhoria.....	112
Figura 45 - Resultado do cenário 1 de simulação.....	115
Figura 46 - Resultado do cenário 2 de simulação.....	116
Figura 47 - Associação entre o valor médio dos resultados do cenário 1 e cenário 2.....	117
Figura 48 - Resultado do cenário 3 de simulação.....	119

Figura 49 - Associação entre o valor médio dos resultados do cenário 1 e cenário 3.....	120
Figura 50 - Resultado do cenário 4 de simulação.....	121
Figura 51 - Associação entre o valor médio dos resultados do cenário 1 e cenário 4.....	122
Figura 52 - Resultado do cenário 5 de simulação.....	123
Figura 53 - Associação entre o valor médio dos resultados do cenário 1 e cenário 5.....	124
Figura 54 - Associação entre o valor médio dos resultados dos diversos cenários simulados .....	125
Figura 55 - Evolução do Lead Time ao longo dos diversos cenários de simulação.....	126

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação das atividades e representação no MFV.....	43
Quadro 2 - Ícones e símbolos para mapear o fluxo de material .....	44
Quadro 3 - Ícones e símbolos para mapear o fluxo de informações.....	45
Quadro 4 - Ícones e símbolos gerais para o MFV .....	46
Quadro 5 - Comparação de procedimento para diferentes modelos de simulação.....	56
Quadro 6 - Atividades desenvolvidas e seus respectivos procedimentos técnicos adotados ...	61
Quadro 7 - Descrição das palavras chave para realização do RBS .....	64
Quadro 8 - String utilizada na RBS .....	65
Quadro 9 - Princípios da CE que interferem diretamente no <i>Lead Time</i> .....	76
Quadro 10 - Momento que a entidade entra no cenário 1 .....	84
Quadro 11 - Momento que a entidade entra no cenário 2 .....	85
Quadro 12 - Momento que a entidade entra no cenário 3 .....	87
Quadro 13 - Momento que a entidade entra no cenário 4 .....	88
Quadro 14 - Momento que a entidade entra no cenário 5 .....	90
Quadro 15 - Cenários simulados e suas respectivas estratégias .....	113
Quadro 16 - Evolução do Lead Time ao longo dos diversos cenários de simulação .....	125

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Cálculo da linha do tempo do MFV .....	74
Tabela 2 - Variabilidade obtidas dos resultados de Souza (2001).....	80
Tabela 3 - Variações de tempo do cenário 1 de simulação .....	83
Tabela 4 - Variações de tempo do cenário 2 de simulação .....	85
Tabela 5 - Variações de tempo do cenário 3 de simulação .....	86
Tabela 6 - Variações de tempo do cenário 4 de simulação .....	88
Tabela 7 - Variações de tempo do cenário 5 de simulação .....	89
Tabela 8 - Síntese dos dados coletados no canteiro de obra.....	102
Tabela 9 - Resultados do cenário 1.....	114
Tabela 10 - Resultados do cenário 2.....	116
Tabela 11 - Associação entre o valor médio dos resultados do cenário 1 e cenário 2 .....	117
Tabela 12 - Resultados do cenário 3.....	118
Tabela 13 - Associação entre o valor médio dos resultados do cenário 1 e cenário 3 .....	119
Tabela 14 - Resultados do cenário 4.....	121
Tabela 15 - Associação entre o valor médio dos resultados do cenário 1 e cenário 4 .....	122
Tabela 16 - Resultados do cenário 5.....	123
Tabela 17 - Associação entre o valor médio dos resultados do cenário 1 e cenário 5 .....	124

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

5S - Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu e Shitsuke

FIFO - Primeiro a entrar, primeiro a sair (First In, First Out)

JIT - Just-in-Time

MFV - Mapeamento do Fluxo do Valor (Value Stream Mapping)

RBS – Revisão Bibliográfica Sistemática

STP - Sistema Toyota de Produção (Toyota Production System)

T/C Tempo de ciclo

WIP - Estoque em Processo (Work-in-process)

## Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	20
1.1	Problema de pesquisa .....	20
1.2	Questão de pesquisa .....	22
1.3	Objetivo .....	22
1.4	Justificativa.....	22
1.5	Estruturação do trabalho.....	25
2	REFERENCIAL TEÓRICO BÁSICO .....	27
2.1	Sistema Toyota de Produção .....	27
2.1.1	Autonomação.....	27
2.1.2	Just-in-time .....	28
2.1.3	Produção Enxuta.....	29
2.1.4	Pensamento Enxuto .....	31
2.1.5	Os quatorze princípios do Modelo Toyota .....	32
2.1.6	As quatro regras para se entender o Sistema Toyota de Produção.....	34
2.2	Lean Construction .....	35
2.3	Mapeamento de Fluxo de Valor (MFV).....	38
2.3.1	Métricas Lean para elaboração do MFV .....	40
2.3.2	Etapas para elaboração do MFV .....	42
2.3.3	Simbologia empregada na elaboração do MFV .....	43
2.3.4	MFV: elaboração do estado futuro .....	46
2.3.5	MFV: avaliação da proposta do estado futuro.....	47
2.4	Linha de balanço .....	48
2.5	Simulação .....	51
2.5.1	Vantagens da simulação .....	53
2.5.2	Definições de elementos de simulação.....	53

2.5.3	Componentes do processo de simulação .....	54
2.5.4	Etapas de simulação .....	56
2.5.5	Verificação e validação da simulação .....	56
2.6	Considerações sobre o capítulo .....	58
3	MÉTODO.....	60
3.1	Estratégia de pesquisa .....	60
3.1.1	Classificação da pesquisa com base em seus objetivos.....	60
3.1.2	Classificação da pesquisa com base nos procedimentos técnicos.....	61
3.1.3	Pesquisa bibliográfica.....	61
3.1.4	Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) .....	61
3.1.5	Estudo de caso .....	67
3.1.6	Simulação .....	68
3.2	Sujeito.....	69
3.3	Delineamento.....	70
3.4	Procedimentos operacionais .....	71
3.4.1	Elaboração da LB .....	71
3.4.2	Elaboração do MFV “planejado” do pavimento-tipo.....	72
3.4.3	Coleta de dados .....	73
3.4.4	Elaboração do MFV “atual” da estrutura do pavimento-tipo.....	73
3.4.5	Identificação de oportunidades de aplicação dos princípios da Construção Enxuta..	75
3.4.6	Simulação .....	75
3.4.7	Tempos de processamento.....	78
3.4.8	Número de repetições de simulação .....	82
3.4.9	Caracterização dos cenários .....	82
3.4.10	Modelagem do primeiro cenário .....	82
3.4.11	Modelagem do segundo cenário.....	84

3.4.12	Modelagem do terceiro cenário .....	86
3.4.13	Modelagem do quarto cenário .....	87
3.4.14	Modelagem do quinto cenário .....	89
3.5	Análise dos dados .....	90
4	RESULTADOS OBTIDOS.....	91
4.1	Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) .....	91
4.2	Caracterização tecnológica.....	94
4.3	Linha de balanço (LB).....	101
4.4	Dados coletados.....	101
4.5	MFV “planejado” do pavimento-tipo.....	102
4.6	MFV “atual” da tarefa estrutura do pavimento-tipo.....	104
4.7	Oportunidades de aplicação da Lean Construction .....	106
4.7.1	MFV com as oportunidades de aplicação dos princípios da Construção Enxuta.....	111
4.8	Simulação .....	113
4.8.1	Resultados do primeiro cenário .....	113
4.8.2	Resultados do segundo cenário .....	115
4.8.3	Resultados do terceiro cenário .....	118
4.8.4	Resultados do quarto cenário .....	120
4.8.5	Resultados do quinto cenário .....	122
4.9	Comportamento do Lead Time no decorrer da simulação .....	125
4.10	Considerações sobre o capítulo .....	126
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	127
5.1	Discussão geral.....	127
5.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	129
	REFERÊNCIAS .....	130
	Apêndice I: Folha de coleta de dados .....	134

Apêndice II: algoritmo do cenário 1 extraído do ProModel@.....	136
--	-----

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Problema de pesquisa

Constantemente, a construção civil tradicional tem sido alvo de críticas considerando seus processos de produção e desempenho operacional, por serem estes constituídos por baixa eficiência de produção, qualidade reduzida, desperdício de recursos naturais e grande quantidade de acidentes de trabalho. Na busca por eliminar os problemas citados e alcançar melhores resultados, apresenta-se a Construção Enxuta como alternativa, pois viabiliza a realização de um processo simples, organizado, produtivo, perdas controladas, transparência e maior rentabilidade.

Assim sendo, Koskela (1992) enfatiza que a *Lean Construction* traz como mudança conceitual mais importante para a construção civil a introdução de uma nova forma de se entender os processos produtivos. Afirma ainda, que esses conceitos se referem, essencialmente, à maneira pela qual processos e operações são definidos. Desta maneira, a Construção Enxuta surge como uma filosofia de produção que pode ser considerada como uma estratégia que traz um diferencial competitivo às empresas de construção civil.

Quando avaliados outros setores fora da construção civil, pode-se perceber que poucas indústrias têm conseguido reproduzir o Sistema Toyota de Produção (STP) com sucesso, mesmo reproduzindo as mesmas práticas da Toyota. Spear e Bowen (1999) analisam que muitos assumem que o segredo do sucesso da Toyota deve situar-se em suas raízes culturais. Segundo estes mesmos autores, porém, outras empresas japonesas, como Nissan e Honda, ficaram aquém dos padrões da Toyota, enquanto a mesma introduziu com sucesso o seu sistema de produção em todo o mundo, inclusive na América do Norte, onde a empresa produziu mais de um milhão de carros, minivans e caminhões leves.

Spear e Bowen (1999) acreditam ainda que as ferramentas e práticas da Toyota são confundidas com o próprio sistema, impossibilitando a resolução de um paradoxo aparente, ou seja, que as atividades, conexões e fluxos de produção seguem uma rotina de maneira rígida, mas, ao mesmo tempo, as operações são extremamente flexíveis e adaptáveis. Complementam que as atividades e processos são constantemente desafiados e empurrados para um nível mais alto de desempenho, permitindo à empresa inovar e melhorar continuamente.

Segundo Koskela (2000), para resolver alguns problemas críticos da construção civil, têm-se buscado algumas soluções. Neste sentido, a industrialização foi encarada como um sinônimo de progresso no setor. Outro fator é o uso da computação integrada, que é vista como uma ferramenta importante de atuação na construção. A construção robotizada e automatizada associada com modelos computacionais é outra solução almejada por pesquisadores. No entanto, atualmente, a aplicabilidade destas soluções não é rotineira.

Atualmente, existe certa resistência cultural na aplicação de novas tecnologias construtivas, tendo em vista que há tempos se utilizam as estruturas de concreto armado juntamente com a vedação em alvenaria cerâmica. Desta maneira, outra solução para as críticas do setor seria atuar na melhoria da construção tradicional.

Para aplicação da Construção Enxuta na construção tradicional Ortiz (2013) utilizou as ferramentas Mapeamento de Fluxo de Valor (MFV) e Linha de Balanço (LB) como técnica de diagnóstico.

Vivan, Ortiz e Paliari (2012) complementam que o MFV representa uma ferramenta importante para a identificação, redução e eliminação de atividades de fluxo, que não agregam valor (atividades de transporte, espera e inspeção), e retrata o comportamento dos processos que estão sendo analisados. Tem sido amplamente estudado e requer adaptações para o emprego na indústria da construção.

Na busca por medir a evolução do trabalho Timm e Lorig (2015) apresentam que diversas áreas do conhecimento passaram a adotar simulação de computador como parte essencial do processo de geração de conhecimento em pesquisa. Com base nos mundos virtuais passou-se a desenvolver experiências, as quais não podem ser realizadas em ambientes reais. Assim, a possibilidade de observação detalhada pode ser fornecida e novas perspectivas podem ser adquiridas por meio da simulação.

Léxico Lean (2003) define *Lead Time* de produção como:

“Tempo requerido para um produto se movimentar por todas as etapas de um processo, do início ao fim. No nível da planta, isso é frequentemente chamado de tempo de porta a porta. O conceito também se aplica ao tempo requerido para que um projeto progrida do início ao fim do desenvolvimento do produto ou para que um produto caminhe da matéria prima até produto acabado”.

Desta forma, este trabalho busca propor um modelo computacional para um conjunto de serviços relacionados à execução de estrutura reticulada de concreto armado, de maneira que a aplicação dos princípios da Construção Enxuta reduza o Lead Time de produção de onze para sete dias.

## 1.2 Questão de pesquisa

Para Gil (2002), a questão de pesquisa deve ser elaborada na forma de pergunta, ser clara e precisa, ser empírica, suscetível de solução e delimitada a uma dimensão viável. Desta forma, considerando a proposta do estudo, busca-se responder às seguintes questões:

*Por que aplicar os princípios da construção em um canteiro de obras?*

*Como identificar oportunidades de aplicação dos princípios da construção enxuta em um canteiro de obras?*

*Qual é o melhor cenário de simulação utilizando-se de ferramentas Lean que trará o menor Lead Time na obra estudada?*

## 1.3 Objetivo

Propor e simular vários cenários com base nos princípios da Construção Enxuta objetivando executar uma estrutura reticulada de concreto armado de uma edificação residencial de múltiplos pavimentos dentro do prazo estipulado no seu planejamento, tendo-se como prazo de sete dias *Lead Time* para sua finalização.

## 1.4 Justificativa

De acordo com Spear e Bowen (1999) o STP tem sido considerado uma excelente referência como fabricante. E complementam que diversas empresas tentaram adaptar o STP, e que este pode ser encontrado em diversos setores como o aeroespacial, produtos de consumo, processamento de metais e produtos industriais.

Segundo Spear e Bowen (1999), para fazer qualquer alteração no sistema de produção, a Toyota utiliza um processo de resolução de problemas rigoroso que exige uma avaliação aprofundada do estado atual e um plano de melhoria que é, na verdade, um teste experimental das alterações propostas.

Dooley (2002) mostra que a simulação permite aos investigadores assumir a complexidade inerente dos sistemas organizacionais como um dado e ajuda a responder à

pergunta: "E se?" Permite, ainda, estudos de sistemas mais complexos, porque cria observações por "avançar" para o futuro, ao passo que outras pesquisas abordam métodos retrospectivos ao longo da história para determinar o que aconteceu e como.

Timm e Lorig (2015) explicam que ao utilizar a simulação para realização de uma função em particular, os sistemas podem ser analisados, o desempenho medido e problemas resolvidos. E complementa que o uso metódico de simulação pode ser atribuído a fins de previsão ou compreensão.

No caso do MFV, Araujo et al. (2015) notaram que o processo de elaboração é muito mais rápido e prático, podendo ser, até mesmo, desenvolvido no próprio canteiro de obras. Porém, seus resultados são relativamente simples e fornecem apenas um panorama da situação atual do sistema de produção. Já para a simulação foi observado que a elaboração do modelo é uma atividade muito mais complexa quando comparada com o MFV, envolvendo, também, o conhecimento por parte do profissional do software que está sendo utilizado, além do que o profissional deve saber abstrair as informações do canteiro para o modelo de simulação, sem que o comportamento do sistema seja substancialmente alterado. Mas em termos de resultado, a simulação fornece muito mais informações sem que sejam necessárias diferentes análises, sendo isto possível, obviamente, por ser uma ferramenta computacional.

De Lima et al. (2016) consideram que a análise do estado atual quando realizada por meio do MFV é limitada aos dados atuais que estão disponíveis na empresa ou que são coletados para o MFV, mas com restrições para a obtenção de indicadores de desempenho, enquanto o MFV associado à simulação permite gerar indicadores de desempenho do estado atual que nem sempre estão disponíveis e que não são medidos. Os mesmos autores analisam a transição para o estado futuro quando realizada por intermédio do MFV como algo dependente da intuição do analista, ao passo que somado à simulação pode-se testar várias configurações com dados reais ou hipotéticos. Complementam que a implementação do estado futuro por meio do MFV seja uma abordagem de tentativa e erro in loco, gerando custos e tempo adicionais, ao mesmo tempo em que o MFV agregado à simulação trabalha com tentativa e erro de forma virtual, gerando um esforço menor de custo e tempo para definir a melhor alternativa a ser implementada.

Por fim, destacam que a implantação do estado futuro do MFV pode representar uma melhoria radical que tende a criar uma maior resistência à mudança, à medida que, com simulação pode ajudar a definir uma sequência incremental de implementação do

estado futuro, permitindo prever os ganhos parciais e conduzir a mudança em um processo de melhoria contínua (DE LIMA et al., 2016).

Assim, entende-se que, dependendo da necessidade, seja interessante que as empresas trabalhem com as duas ferramentas, utilizando o MFV como uma primeira etapa do processo de análise e diagnóstico, e a simulação como ferramenta de complementação desta análise para posterior projeto, análise e implementação das melhorias necessárias. Além disso, o uso da simulação computacional é considerado importante para a Construção Civil pelo fato da mesma não ser de uso corrente entre os profissionais da área, contribuindo, principalmente, para melhorias no campo de tomada de decisões (ARAUJO et al., 2015).

A análise crítica dos textos mencionados neste subitem serviu de orientação para a identificação da lacuna científica de interesse para esta dissertação. Foi realizada uma revisão bibliográfica sistemática (RBS) e os artigos encontrados, apresentados no item 4.1 deste trabalho, sugerem, a partir de conceitos e metodologias, uma forma sistematizada e, ao mesmo tempo, eficaz de utilização da simulação do processo de implementação da Construção Enxuta.

Com uma breve análise de cada artigo selecionado, obedecendo à sequência do primeiro ao oitavo, foi identificada a contribuição de cada artigo para o alcance da lacuna do conhecimento, conforme apresentado a seguir:

- aplicação do MFV tradicional associado à simulação de eventos discretos de um processo de manufatura;
- aplicação dos cinco princípios da Produção Enxuta para um processo de armação tradicional utilizando simulação computacional;
- desenvolvimento de um modelo de simulação para escolha do projeto do sistema de produção;
- identificação das implicações da modelagem conceitual na pesquisa de simulação de Construção Enxuta;
- simulação na cadeia produtiva da construção de uma empresa de elementos pré-fabricados;

- utilização do modelo de simulação buscando reduzir o tempo total de construção e propondo estratégia de customização em massa,
- uso da simulação para redesenhar processos de construção e torná-los mais enxutos;
- exploração de pontos de vista sobre diferentes cenários de linhas de balanço e seus respectivos indicadores.

A partir destas contribuições, tornou-se possível a identificação do conceito principal embutido em cada um dos artigos mencionados e, assim, a delimitação da lacuna do conhecimento inerente ao estudo proposto.

Desta maneira, se torna necessária a busca por soluções que promovam melhorias na produção proporcionando melhores resultados no desempenho operacional e em seus métodos de produção, considerando a eliminação de desperdícios.

Acredita-se que a aplicação dos princípios da *Lean Construction* no canteiro de obras represente grande relevância no contexto de evolução e crescimento da construção civil, visto que, a partir da escolha da ferramenta correta, bem como do momento oportuno para sua utilização, melhores resultados serão alcançados. Concomitantemente, no atual contexto econômico do país, deduz-se que, quando esses princípios forem aplicados, favorecerá a qualidade de vida da população.

## **1.5 Estruturação do trabalho**

Apresenta-se, a seguir, a estrutura da dissertação.

Capítulo 1 – Introdução da dissertação, em que está contido o problema de pesquisa, questão de pesquisa, objetivo e justificativa do trabalho;

Capítulo 2 – Neste capítulo está descrito o referencial teórico básico, em que são definidos os conceitos do sistema Toyota de produção, *Lean construction*, MFV, LB e simulação;

Capítulo 3 – Descreve o método de pesquisa, por meio da estratégia de pesquisa, sujeito, delineamento, procedimentos operacionais e análise de dados.

Capítulo 4 – Apresentação dos resultados obtidos por meio da LB, da coleta de dados, do MFV “planejado” e do MFV “atual”, oportunidades identificadas de aplicação da *Lean Construction* e simulação.

Capítulo 5 – As considerações finais incluem a discussão geral, o comportamento do *Lead Time* no decorrer da simulação e a conclusão.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO BÁSICO

Neste capítulo serão abordados os aspectos de interesse a serem estudados que proporcionam a base teórica que sustenta a pesquisa a ser realizada. Serão dissertados os seguintes temas: Sistema Toyota de Produção, *Lean Construction*, MFV, LB e simulação.

### 2.1 Sistema Toyota de Produção

Atendendo às necessidades de um mercado que passava por problemas trabalhistas num período pós-guerra e à exigência de produtos de qualidade a preços mais acessíveis, o Sistema Toyota de Produção se propõe a produzir séries menores de produtos variados e diferenciados, ou seja, contrário ao modelo proposto por Ford, que tinha como objetivo produzir quantidades cada vez maiores de um mesmo produto padronizado, e poucas variações (OHNO, 1997).

Considerado o idealizador do Sistema Toyota de Produção, Ohno (1997), enfatiza a importância da eliminação do desperdício, que é conceituado como qualquer atividade ou operação que consome recursos, porém não adiciona valor ao produto solicitado pelo cliente, e cuja tarefa é sustentar os dois pilares do sistema citados a seguir.

#### 2.1.1 Automação

A automação conceitua-se como a transferência da inteligência humana para equipamentos automatizados de modo a permitir que as máquinas detectem a produção de uma única peça defeituosa e suspendam imediatamente seu funcionamento enquanto se solicita ajuda. Este conceito, conhecido com *jidoka*, teve como pioneiro Sakichi Toyoda, no início do século XX, quando inventou as máquinas de tear automáticas que paravam instantaneamente quando uma linha se rompia. Isso permitia que um operador supervisionasse várias máquinas sem risco de produzir grandes quantidades de tecido defeituoso (WOMACK; JONES, 1998).

Shingo (1996) complementa que a automação separa completamente os trabalhadores das máquinas por meio do uso de mecanismos sofisticados para detectar anormalidades de produção. Para ser totalmente “autonomatizada”, uma máquina deve ser capaz de detectar e corrigir os seus próprios problemas operacionais. Desenvolver um

equipamento que detecte problemas (pré-automatização) é viável tanto técnica como economicamente. No entanto, fazer com que essa máquina também corrija uma anormalidade, pode transformar-se e uma solução muito cara e tecnicamente inviável e, em consequência, não é trivial justificar esse custo.

De acordo com Ohno (1997), o conceito da automação é mais abrangente, não se restringindo apenas às máquinas, mas também aos operários que diante de uma situação anormal têm a responsabilidade de parar a linha de produção.

### **2.1.2 Just-in-time**

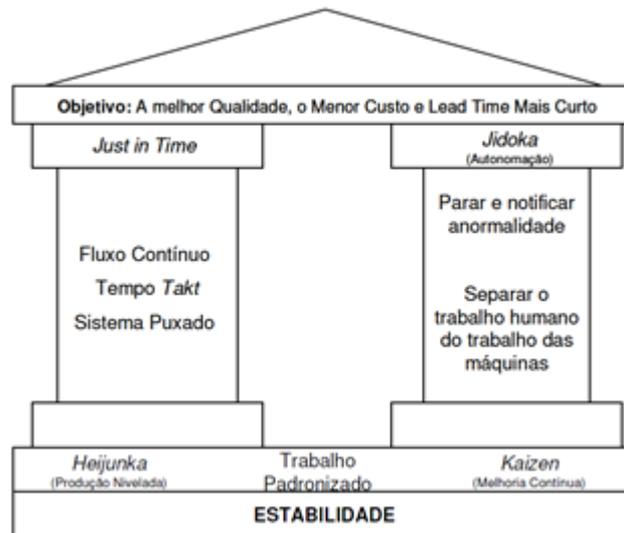
O segundo pilar do Sistema Toyota de Produção, o just-in-time, foi concebido por Ohno inspirado nas prateleiras de supermercados norte-americanos, das quais os clientes tiram o que precisam, quando precisam e na quantidade necessária. O objetivo é que cada posto de trabalho produza apenas a quantidade necessária, quando necessário e na qualidade exigida, reduzindo a necessidade de estoques, tanto de matéria-prima como de subprodutos. A caracterização como uma filosofia decorre do fato de que esse objetivo só pode ser alcançado mediante uma série de condições que envolvem o ambiente físico, o comprometimento das pessoas envolvidas em toda cadeia de produção, treinamento e a própria cultura focada na qualidade (SHINGO, 1996).

Para Ohno (1997), just-in-time significa que, em um processo de fluxo, as partes corretas necessárias à montagem alcançam a linha de montagem no momento em que são necessários e somente na quantidade necessária. Uma empresa que estabeleça esse fluxo integralmente pode chegar ao estoque zero. Ainda, segundo esse autor, do ponto de vista da gestão da produção, esse é um estado ideal; no entanto, adverte que é muito difícil aplicar o just-in-time ao plano de produção de todos os processos envolvidos de forma ordenada em um produto feito com milhares de componentes e um número enorme de processos.

Slack et al. (1999) reiteram que o aspecto básico do just-in-time é a produção de bens e serviços exatamente no momento em que serão necessários, não antes para não se transformarem em estoque, e não depois para que seus clientes não tenham que esperar. Além desse elemento temporal, pode-se adicionar as necessidades de qualidade e eficiência.

A Figura 1 representa a base, pilares e objetivos alcançados através da implantação do Sistema Toyota de Produção.

**Figura 1 - Casa do Sistema Toyota de produção**



Fonte: Léxico Lean, 2003

### 2.1.3 Produção Enxuta

A expressão “enxuta” descrita por Womack, Jones e Roos (1992) se deve ao fato de que esta maneira de gerenciar a produção necessita de menos de metade dos estoques no local de fabricação, metade do esforço dos operários, metade do espaço para fabricação, metade do investimento em ferramentas, metade das horas de planejamento para desenvolver novos produtos em metade do tempo, quando equiparada à produção em massa. Os mesmos autores incrementam que resulta na redução de defeitos e no aumento da variedade de produtos.

A Produção Enxuta combina as vantagens das produções artesanais e em massa, evitando os altos custos dessa primeira e a rigidez desta última. Com essa finalidade, emprega equipes de trabalhadores multiquificados em todos os níveis da organização, além de máquinas flexíveis e cada vez mais automatizadas para produzir imensos volumes de produtos de ampla variedade. Foi desenvolvida com a premissa de aumentar a eficiência da produção pela eliminação consistente e eficiente dos vários tipos de desperdícios que permeiam um sistema de produção (OHNO, 1997).

De acordo com Womack e Jones (1998), “muda” é uma palavra japonesa que significa desperdício, que pode ser entendido como qualquer atividade humana que absorve recursos, mas não cria valor, como por exemplo: erros que exigem retificação, produção de itens indesejados pelo consumidor, custo de manter mercadorias em estoque, etapas de

processamento que não são necessárias, movimentação de funcionários e transporte de mercadorias de um lugar para outro sem propósito, grupos de pessoas em uma atividade posterior que ficam esperando porque uma atividade anterior não foi realizada dentro do prazo, e bens e serviços que não atendem às necessidades dos clientes.

Um processo de produção, em geral, é composto por várias etapas e atividades, podendo tornar-se bastante complexo. Para propiciar a identificação das perdas necessita-se reconhecer a sua natureza. Para sustentar o processo de identificação e eliminação das perdas, que não agregam valor, Ohno (1997) propõe as seguintes categorias:

- **Perda por superprodução:** pode ser dividida em perdas quantitativas e perdas antecipadas. A superprodução quantitativa é a perda por produzir além do volume programado e perda por superprodução antecipada é a perda decorrente de uma produção realizada antes do momento necessário;
- **Perda por espera:** pode ser de dois tipos: perdas por espera do processo, que acontece, por exemplo, quando um lote inteiro permanece esperando liberação, enquanto o lote precedente é processado, inspecionado ou transportado; e perdas por espera do lote, que acontece, por exemplo, quando os componentes de um lote esperam até que o processamento de todo o lote seja concluído;
- **Perda por transporte:** todo transporte é desperdício e a otimização do transporte é, no limite, sua eliminação total;
- **Perda do processamento em si:** consiste naquelas atividades de processamento que são desnecessárias para que o produto/serviço adquira as características desejadas ou especificadas pelo cliente;
- **Perda por fabricação de produtos defeituosos:** consiste na produção de peças, subcomponentes e produtos acabados que não atendem as especificações de qualidade requeridas pelo projeto;
- **Perda por movimentação:** consiste nos movimentos desnecessários realizados pelos operadores na execução de uma operação; e
- **Perda por estoque:** consiste nas manutenções de estoque de matérias-primas, material em processamento e produtos acabados.

Liker e Méier (2007) concluem que o importante a ser observado é que as perdas, além de consumirem recursos como materiais, mão de obra e equipamento, causam

um impacto negativo nos operários, desestimulando-os. Como as perdas, em geral, ocultam os problemas, os funcionários não são motivados a resolvê-los, criando com isto, pessoas não acostumadas a pensar, inibindo sua criatividade.

#### 2.1.4 Pensamento Enxuto

Os criadores do termo Pensamento Enxuto (*Lean Thinking*) são Womack e Jones (1998). Os autores enfatizam que o mesmo se aplica à empresa como um todo e não somente aos processos de produção e representa uma forma de especificar valor, alinhar na melhor sequência as ações que criam valor, realizar atividades sem interrupção toda vez que alguém as solicitar e realizá-las de forma cada vez mais eficaz (WOMACK; JONES, 1998).

#### Os Cinco Princípios do Pensamento Enxuto

Womack e Jones (1998) descrevem Ohno como crítico do desperdício. Ele identificou e classificou os sete primeiros tipos de desperdício: por superprodução, por espera, por transporte, do processamento em si, na fabricação de produtos defeituosos, por movimentação e por estoque. Acrescentam que, independentemente do número de variedade de tipos de desperdícios, eles existem em toda parte. Estes autores sugerem o Pensamento Enxuto como forma de eliminação dos desperdícios.

A forma encontrada por esses autores para difundir a ideia do Pensamento Enxuto e facilitar a compreensão desta, foi da apresentação em cinco princípios, descrita a seguir (WOMACK; JONES, 1998):

- **Especificar o valor:** o valor deve ser especificado pelas necessidades dos clientes e ser avaliado por ferramentas administrativas como: Desdobramento da Função Qualidade (QFD) e simulação. Essas ferramentas definirão atributos que propiciam a satisfação do cliente. A partir das necessidades dos clientes, empresas procuram contemplá-las e cobrando, por isso, um preço específico que viabilizará a manutenção desta no negócio e aumentando os lucros por meio da melhoria contínua dos processos, redução de seus custos e melhorias na qualidade;
- **Fluxo de valor:** a análise do mesmo possibilita a identificação das etapas necessárias para se produzir um produto e estabelece “quando” e “como” as decisões serão tomadas. Representa as atividades específicas necessárias para projetar, pedir e oferecer

um produto específico, da concepção ao lançamento, do pedido à entrega e da matéria-prima às mãos do cliente. Neste contexto, todas as formas de desperdício devem ser eliminadas. A análise do fluxo de valor quase sempre mostra que ocorrem três tipos de ação ao longo de sua extensão:

- (1) Etapas que certamente criam valor;
- (2) Etapas que não criam valor, mas são inevitáveis; e
- (3) Etapas que não criam valor e devem ser evitadas imediatamente.

- **Fluxo:** O fluxo procura fazer com que as etapas restantes, que criam valor, fluam. A relação das atividades com seus correspondentes custos e duração, o relacionamento entre elas e o atrelamento dos recursos necessários como quantidade de trabalho, caracterização e quantidade de material e classificação de equipamento e ainda as informações necessárias completam as unidades básicas necessárias para a análise. Busca repensar as práticas e ferramentas de trabalho específicas, a fim de eliminar os retrofluxos, sucatas e paralisações de todos os tipos, permitindo que o projeto, a emissão de pedidos e a fabricação do produto possam prosseguir continuamente;

- **Produção puxada:** consiste em identificar o momento em que o cliente necessita do produto e proceder à entrega no momento oportuno. Representa a capacidade de projetar, programar e fabricar exatamente o que e quando o cliente precisa. A projeção de vendas pode ser descartada e a produção permanece atrelada à demanda; e

- **Perfeição:** ocorre à medida que as organizações especificam valor com precisão e identificam o fluxo de valor total. Deve acontecer de maneira que a criação de valor flua continuamente, e os clientes puxem o valor. Este quinto e último conceito se cria por meio de um círculo virtuoso permanente.

### 2.1.5 Os quatorze princípios do Modelo Toyota

Liker (2005) desenvolveu uma extensa pesquisa entrevistando mais de 40 gerentes da Toyota das áreas de produção, vendas, desenvolvimento de produto, logística, etc. Além disto, visitou várias plantas da empresa, escritórios de vendas, um centro de distribuição e fornecedores. O mesmo autor sintetizou os resultados no formato de princípios, que receberam a denominação de “Quatorze princípios do Modelo Toyota”. Esta formulação tem

como objetivo facilitar a divulgação e a aumentar a aprendizagem. Eles foram agrupados em quatro seções denominadas em 4Ps:

- **Filosofia:** pensamento de longo prazo. Nesta, é enfatizado o pensamento de longo prazo, fundamentando a construção de uma empresa com caráter de aprendizagem capaz de adaptar-se às mudanças no ambiente interno e externo, propiciando sua sobrevivência;
- **Processo:** condições favoráveis produzem resultados favoráveis;
- **Pessoal e Parceiros:** desenvolve-se um conjunto de atitudes como respeitar, desafiar e desenvolver, com o objetivo de apoiar a melhoria e o desenvolvimento contínuo das pessoas; e
- **Problemas:** aprendizagem e melhoria contínua. O resultado de uma análise competente, proposta e implementação da solução, reflexão e comunicação das lições aprendidas é muito importante para a aprendizagem.

A seguir, são apresentados os quatorze princípios identificados por Liker (2005) e que norteiam o Modelo Toyota de Produção. A elaboração desses princípios é o resultado de vinte anos de estudo desse autor na empresa.

### **Filosofia de longo prazo**

Princípio 1 - Basear as decisões administrativas em uma filosofia de longo prazo, mesmo que em detrimento de metas financeiras de curto prazo;

### **O processo certo conduzirá aos resultados certos**

Princípio 2 - Criar um fluxo de processo contínuo para trazer os problemas à tona.

Princípio 3 - Usar sistemas puxados para evitar a superprodução.

Princípio 4 - Nivelar a carga de trabalho (heijunka).

Princípio 5 - Construir uma cultura de parar e resolver problemas para obter a qualidade desejada logo na primeira tentativa.

Princípio 6 - Tarefas padronizadas são a base da melhoria contínua e da capacitação dos funcionários.

Princípio 7 - Usar controle visual para que nenhum problema fique oculto.

Princípio 8 - Usar somente tecnologia confiável e plenamente testada que atenda aos funcionários e processos.

### **Valorização da organização pelo desenvolvimento de seus funcionários e parceiros.**

Princípio 9 - Desenvolver líderes que compreendam completamente o trabalho, que vivam a filosofia e a ensinem aos outros.

Princípio 10 - Desenvolver pessoas e equipes excepcionais que sigam a filosofia da empresa.

### **A solução contínua da raiz dos problemas conduz à aprendizagem organizacional.**

Princípio 11 - Respeitar sua rede de parceiros e de fornecedores, desafiando-os e ajudando-os a melhorar.

Princípio 12 - Ver por si mesmo para compreender completamente a situação (genchi genbu-tsu).

Princípio 13 - Tomar decisões lentamente por consenso, considerando completamente todas as opções; e implementá-las com rapidez.

Princípio 14 - Tornar-se uma organização de aprendizagem pela reflexão incansável (hanse) e pela melhoria contínua (kaizen).

#### **2.1.6 As quatro regras para se entender o Sistema Toyota de Produção**

Para Spear e Bowen (1999), o conhecimento implícito que não se manifesta claramente pelo STP pode ser entendido em quatro regras básicas. Estas regras orientam a concepção, operação e melhoria de cada atividade, conexão, e via de cada produto e serviço. As regras são as seguintes:

- Regra 1: Todo o trabalho deve ser altamente especificado quanto ao conteúdo, sequência, tempo e resultado.
- Regra 2: Cada contato entre fornecedor e cliente deve ser direta, e deve haver um claro sim ou não como maneira para enviar pedidos e receber respostas.
- Regra 3: O caminho para cada produto e serviço deve ser simples e direto.
- Regra 4: Qualquer melhoria deve ser feita de acordo com o método científico, sob a orientação de um profissional experiente, no nível mais baixo possível na organização.

Todas as regras exigem que as atividades, conexões e caminhos de fluxo têm embutido testes para sinalizar problemas automaticamente. É a resposta contínua aos problemas que torna este sistema aparentemente rígido de modo flexível e adaptável à evolução das circunstâncias.

## **2.2 Lean Construction**

A Construção Enxuta iniciou-se com a percepção da reprodutibilidade dos conceitos desenvolvidos pelo sistema Toyota de produção para o ambiente da construção civil (BALLARD; HOWELL, 1998).

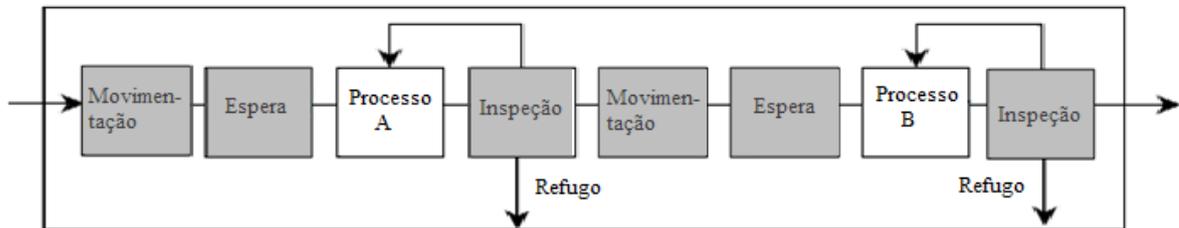
A Construção Enxuta tem evoluído ao longo dos anos com estudos que abrangem diferentes enfoques, que contemplam desde aspectos técnicos, definidos por Ballard e Howell (2003), que descrevem o desenvolvimento de métodos de controle da produção ao longo de todo o empreendimento, até aspectos político-sociais, apresentados por Hirota e Formoso (2001), que identificaram as barreiras para a introdução da Construção Enxuta, e, por fim, a identificação de aspectos promotores da Construção Enxuta, definidos por Alarcon e Seguel (2002). Entre as ferramentas mais utilizadas na prática, pode-se citar o Last Planner, mencionadas por Ballard e Howell (2003), a utilização de kanban, demonstrada por Arbulu, Ballard e Harper (2003), o gerenciamento visual e o 5 S's, definida por Salem et al. (2004).

Koskela (1992) publicou o trabalho *Application of the new production philosophy in the construction industry*, no qual avaliou a aplicabilidade do sistema de produção da indústria automobilística na indústria da construção civil.

As atividades desnecessárias na produção têm sido tradicionalmente denominadas desperdício ou sem valor agregado. Toda tarefa de transformação com vistas à busca de um produto ideal é chamada de atividade que agrega valor. Assim, o princípio fundamental do conceito de fluxo pode ser interpretado como a eliminação de atividades que não agregam valor.

Na Figura 2, as caixas sombreadas representam atividades sem valor agregado, em contraste com as atividades de processamento de agregação de valor.

**Figura 2 - Produção como um processo de fluxo**



Fonte: Koskela, (2000)

Koskela (1992) avalia que, enquanto as atividades de fluxo apenas consomem tempo e dinheiro, as atividades de conversão agregam valor à matéria-prima, e serão transformadas em um produto. Deste modo, as melhorias das atividades de fluxo devem ser focadas principalmente na sua redução ou eliminação, ao passo que as atividades de conversão têm que ser mais eficientes (KOSKELA, 1992).

Desta maneira este autor propõe a aplicação dos princípios que definem implicitamente problemas de fluxo de processo, tais como a complexidade, falta de transparência ou controle segmentado. A seguir serão expostos os onze princípios propostos por Koskela (1992):

**01. Reduzir a parcela das atividades que não agregam valor:** o autor classifica como atividades de agregação de valor, como toda atividade que converte material e/ou informações para atender a necessidade do cliente, e atividades que não agregam valor (desperdício), atividade que demanda tempo, recursos ou espaço, mas não agrega valor;

**02. Aumentar o valor do produto considerando as necessidades dos clientes:** este princípio caracteriza o valor gerado através do cumprimento dos requisitos do cliente, não como um mérito inerente de conversão. Para cada atividade há dois tipos de clientes, as próximas atividades e o cliente final. A abordagem prática para este princípio é a realização de um fluxo sistemático de projeto, onde os clientes são definidos para cada fase, e

seus requisitos analisados. Outros princípios, especialmente o reforço da transparência e melhoria contínua, também contribuem para este princípio.

**3. Reduzir a variabilidade:** os processos de produção são variáveis mesmo que eles passem ao longo do mesmo produto. Existem diferenças nos diversos itens como exemplo, os recursos necessários para produzi-los (tempo, matéria-prima, mão de obra) que variam. A abordagem prática para diminuição da variabilidade é composta por procedimentos da teoria de controle estatístico. Essencialmente, eles lidam com a medição da variabilidade, em seguida, localizar e eliminar suas causas raízes. Padronização das atividades de implementação de procedimentos padrão é muitas vezes a forma de reduzir a variabilidade em ambos os processos de conversão e de fluxo.

**04. Reduzir o tempo de ciclo:** o fluxo de produção pode ser caracterizado pelo tempo de ciclo, o que se refere ao tempo requerido para uma determinada peça ou material atravessar o fluxo. O tempo de ciclo pode ser representado como, o tempo de processamento somado ao tempo de inspeção, mais o tempo de espera e tempo de movimentação. A lógica é comprimir o tempo de ciclo, o que obriga na redução da inspeção, movimentação e espera.

**05. Simplificar as atividades por meio da redução do número de etapas:** a simplificação pode ser entendida como, a redução do número de componentes num produto e a redução do número de passos em um fluxo de material ou informações. Portanto, a simplificação pode ser realizada, por um lado, através da eliminação de atividades que não agregam valor no processo de produção, e por outro lado através da consolidação de partes ou passos.

**06. Aumentar a flexibilidade de saída:** adequar às características dos serviços ou produtos finais, com o objetivo de atender as exigências de diferentes clientes. Resultados favoráveis podem ser obtidos por meio da redução dos lotes para se aproximar da demanda, personalizar o processo o mais tarde possível, adoção de novas tecnologias construtivas e também com a utilização de mão-de-obra polivalente possibilitando melhorar o atendimento das necessidades dos clientes;

**07. Aumentar a transparência do processo:** com a ausência deste princípio, a propensão a errar aumenta, a visibilidade de erros diminui, e reduz a motivação pela melhoria. Assim, é um objetivo para tornar o processo de produção transparente e observável para a facilitação de controle e melhoria. Isto pode ser alcançado, tornando o processo diretamente

observáveis através de meios organizacionais ou físicos, medições e exibição pública de informações.

**08. Focar o controle no processo completo:** um processo de produção pode atravessar vários níveis organizacionais podendo inclusive ir além dos limites físicos da empresa, envolvendo fornecedores e clientes. O emprego de elemento responsável por todo o processo e a utilização de equipes de funcionários auto gerenciáveis propicia o controle de um processo de produção. Mesmo processos complexos devem apresentar condições de serem controlados e medidos, de preferência pela aplicação de indicadores globais;

**09. Introduzir melhoria contínua no processo:** o esforço para reduzir o desperdício e aumentar o valor é uma atividade interna, incremental e iterativo, que pode e deve ser realizada de forma contínua. A melhoria contínua pode ser institucionalizada por meio da medição e monitoramento das mesmas, com a eliminação de estoques ou redução do tempo de ciclo em que os problemas são descobertos e suas soluções são impulsionadas. A atribuição da responsabilidade da melhoria contínua deve ser dada a todos os trabalhadores, com o objetivo de eliminar a causa raiz de problemas, em vez de lidar com os seus efeitos.

**10. Manter o equilíbrio entre melhorias nos fluxos e nas conversões:** a melhoria de fluxo pode ser iniciada com investimentos menores, mas geralmente requer um tempo mais longo do que uma melhoria de conversão, a questão crucial é que a melhoria do fluxo e melhoria de conversão estão intimamente interligados. Desta maneira, quanto melhor fluxo se faz necessário menor capacidade de conversão, portanto, menos investimento em equipamento, enquanto, os fluxos mais controlados tornar a implementação de novas tecnologias de conversão mais fácil e a implantação de nova tecnologia de conversão pode proporcionar menor variabilidade e, assim, proporcionar grandes benefícios para o fluxo.

**11. Benchmarking:** as melhores práticas de fluxo de processos devem ser encontrar na classe mundial. O benchmarking é um estímulo para alcançar as melhores práticas através da reconfiguração radical dos processos.

### **2.3 Mapeamento de Fluxo de Valor (MFV)**

A ferramenta “Mapeamento de Fluxo de Valor” na Toyota é conhecida como “Mapeamento do Fluxo de Informação e Material”, e é utilizada pelos praticantes do Sistema de Produção Toyota para retratar o estado atual e o futuro, ou “ideal“, no processo de

desenvolvimento dos planos de implementação dos sistemas enxutos. Na Toyota infinita atenção é dada para estabelecer o fluxo, eliminando os desperdícios e agregando valor (ROTHER; SHOOK, 1998).

Rother e Shook (1998) resumem o mapeamento de fluxo de valor como uma ferramenta de comunicação, uma ferramenta de planejamento de negócios e uma ferramenta para gerenciar o processo de mudança.

Rother e Shook (1998) definem Fluxo de Valor como toda ação (agregando valor ou não) necessária para trazer um produto por todos os fluxos essenciais a cada produto. Os autores complementam que considerar a perspectiva do fluxo de valor significa levar em conta o quadro mais amplo, não só os processos individuais, ou seja, melhorar o todo, não só otimizar as partes.

A seguir, são apresentadas as vantagens do MFV, segundo Rother e Shook (1998), que as caracterizam como uma ferramenta essencial:

1. Você pode enxergar o fluxo;
2. Mapear ajuda a identificar as fontes de desperdício no fluxo de valor;
3. Fornece uma linguagem comum para tratar dos processos de manufatura;
4. Torna as decisões sobre o fluxo visíveis, de modo que você pode discuti-las.  
De outro modo, muitos detalhes e decisões no seu chão de fábrica só acontecem por omissão;
5. Junta conceitos e técnicas enxutas, que o ajuda a evitar a implementação de algumas técnicas isoladamente;
6. Forma a base de um plano de implementação;
7. Mostra a relação entre o fluxo de informação e o fluxo de material;
8. O MFV é uma ferramenta qualitativa com a qual você descreve em detalhe como a sua unidade produtiva deveria operar para criar o fluxo.

Ortiz (2013) complementa e classifica como benefícios do mapa de fluxo de valor:

1. Visualização do fluxo de todo o processo;

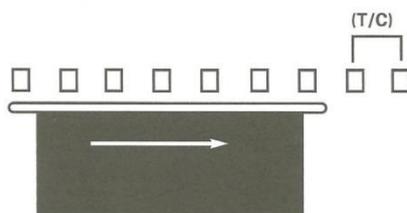
2. É de extrema importância para a identificação de desperdícios no fluxo de valor;
3. Fornece subsídios para propor melhorias e torna visíveis as decisões tomadas, permitindo a discussão dos resultados obtidos;
4. Torna possível a interação entre conceitos e ferramentas, evitando assim a aplicação isolada de técnicas;
5. É base de um plano de implantação, pois estabelece metas e fornece o caminho para alcançá-las;
6. Mostra a relação entre o fluxo de informação e o fluxo de material;
7. Representa uma linguagem que pode servir como ferramenta de comunicação, planejamento de negócios ou para gerenciar o processo de mudança.

### 2.3.1 Métricas Lean para elaboração do MFV

Os autores Rother e Shook (1998) apresentam algumas métricas, que podem ser utilizadas para elaboração do MFV, que estão listadas a seguir:

1. T/C (tempo de ciclo / "cycle time"): a frequência com que uma peça ou produto é realmente completado em um processo, cronometrada como observado. Também o tempo que um operador leva para percorrer todos os seus elementos de trabalho antes de repeti-los.

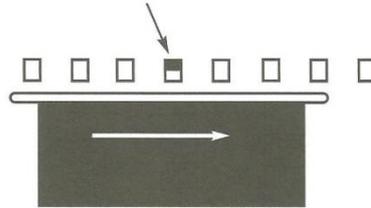
**Figura 3 – Representação do Tempo de ciclo**



**Fonte: Rother e Shook (1998)**

2. Tempo de Agregação de Valor (TAV) “Value Added Time”: tempo dos elementos de trabalho que efetivamente transformam o produto de uma maneira que o cliente está disposto a pagar.

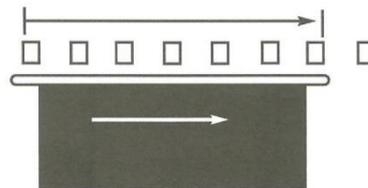
**Figura 4 – Representação do Tempo de Agregação de Valor**



**Fonte: Rother e Shook (1998)**

3. “Lead Time” (L/T): O tempo que uma peça leva para mover-se ao longo de todo um processo ou um fluxo de valor, desde o começo até o fim.

**Figura 5 – Representação do Lead Time**



**Fonte: Rother e Shook (1998)**

4. TR (tempo de troca / “changeover time”)
5. Disponibilidade (disponibilidade real da máquina)
6. TPT (tamanho dos lotes de produção)
7. Número de operadores
8. Número de variações do produto
9. Tamanho da embalagem
10. Tempo de trabalho (menos os intervalos)
11. Taxa de refugo

### 2.3.2 Etapas para elaboração do MFV

1. O mapeamento deve começar com a identificação das demandas do cliente:

Pasqualini (2005) identifica a importância de adequar o MFV à necessidade da construção de edificações e aponta a diferença do alto volume de pedidos solicitado na manufatura quando comparado ao baixo volume exigido na construção civil. Normalmente, a relação entre construtora e cliente baseia-se em um contrato, que estabelece a forma de pagamento do imóvel e o prazo de entrega da obra, representado por um cronograma que indica o tempo de execução de cada grande etapa, a fim de cumprir o prazo final da obra. O mesmo autor propõe uma nova maneira de calcular o *Takt Time* para construção, dividindo-se o tempo de trabalho disponível para cada etapa (cronograma) pela quantidade de metros quadrados a serem executados para essa mesma etapa. Como resultado, o *takt* da construção indicará o ritmo no qual se deve produzir com base na demanda do cliente (Equação 1).

$$Takt\ time = \frac{\text{tempo de trabalho disponível para cada etapa (cronograma)}}{\text{Quantidade de metros quadrados para a mesma etapa}} \quad \text{Eq. 1}$$

2. Com papel e lápis deve-se representar a primeira etapa do mapa do estado atual desenhando-se o cliente;

3. Percorra o caminho no sentido do cliente para o fornecedor da produção de um produto. Comece pela expedição final e, em seguida, os processos anteriores. Desenhe o processo juntamente com sua caixa de dados, sistema de abastecimento e depósitos;

4. Identificar utilização de transporte, empregado nas atividades de abastecimento pelo fornecedor na produção e entrega do produto final ao cliente.

5. Representar no mapa os processos de estoque em forma de triângulo (quantidade em estoque dividida pelos pedidos diários do cliente);

6. Representar no mapa o fluxo do material (empurrado, puxado, etc...) no sentido da esquerda para direita;

7. Representar no mapa o fluxo de informação (direita para esquerda);

9. Linha do tempo;

Ortiz (2013) justifica a importância de se realizar uma análise diferenciada para os fluxos do processo e os fluxos de operações na linha do tempo do MFV. Propõe-se utilizar para classificar as atividades que compõem o fluxo dentro da construção conforme apresentado no Quadro 1.

**Quadro 1 - Classificação das atividades e representação no MFV**

Classificação das atividades			Sigla	Representação na linha de tempo
Koskela (1992)		Shingo (2010)		
Atividades de conversão		Atividades de processamento	AP	
Atividades de fluxo	Espera	Fluxo de processos	AF	
	Transporte			
	Inspeção			
		Operações principais, tempos adicionais etc.	FO	

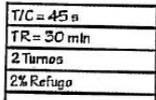
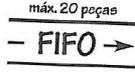
Fonte: ORTIZ (2013)

10. Desenhe um mapa de fluxo de valor projetado no estado futuro. Após a identificação das oportunidades de melhoria e do desperdício no MFV atual, deve-se projetar uma situação ideal.

### 2.3.3 Simbologia empregada na elaboração do MFV

A representação é formulada utilizando-se de símbolos representando partes de um processo produtivo. O Quadro 2 apresenta alguns dos símbolos utilizados para representar o fluxo de material.

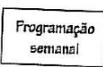
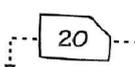
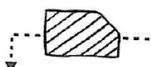
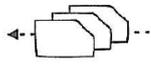
**Quadro 2 - Ícones e símbolos para mapear o fluxo de material**

Ícones de materiais	Representa	Notas
	Processo	Uma caixa de processo equivale a uma área de fluxo. Todos os processos devem ser identificados. Também usado para departamentos como o de Controle de Produção
	Fontes externas	Usado para mostrar clientes, fornecedores e processo de produção externos.
	Caixa de dados	Usado para registrar informações relativas a um processo de manufatura, departamento, cliente, etc.
	Estoque	Quantidade e tempo devem ser anotados.
	Entrega via caminhão	Anotar a frequência de entrega
	Movimento de materiais da produção EMPURRADO	Material que é produzido e movido para frente antes do processo seguinte precisar; geralmente baseado em uma programação.
	Movimento de produtos acabados para o cliente	
	Supermercado	Um estoque controlado de peças que é usado para a programação da produção em um processo anterior.
	Retirada	Puxada de materiais geralmente de um supermercado.
	Transferência de quantidades controladas de material entre processos em uma sequência "primeiro a entrar – primeiro a sair"	Indica um dispositivo para limitar a quantidade e garantir um fluxo de material (FIFO) entre os processos. A quantidade máxima deve ser anotada.

**Fonte: Rother e Shook (1998)**

O Quadro 3 apresenta alguns dos símbolos utilizados para representar o fluxo de informação.

**Quadro 3 - Ícones e símbolos para mapear o fluxo de informações**

Ícones de informação	Representa	Notas
	Fluxo de informação manual	Por exemplo: programação da produção ou programação da entrega.
	Fluxo de informação eletrônica	Por exemplo, via “Troca Eletrônica de dados”.
	Informação	Descreve um fluxo de informação
	Kanban de produção (linhas pontilhadas indicam a rota do kanban)	O kanban “um por container”. Um cartão ou dispositivo que avisa um processo quanto do que pode ser produzido e da permissão para fazê-lo.
	Kanban de retirada	Um cartão ou dispositivo que instrui o movimentador de material para obter e transferir peças (por exemplo: de um supermercado para o processo consumidor).
	Kanban de sinalização	Kanban “um por lote”. Sinaliza quando o ponto de reposição é alcançado e outro lote precisa ser produzido. Usado quando o processo fornecedor deve produzir em lotes por causa de trocas necessárias.
	Bola para puxada sequenciada	Dá instrução para produzir imediatamente uma quantidade e tipo pré-determinado, geralmente uma unidade. Um sistema puxado para processos de submontagem sem usar um supermercado.
	Posto de kanban	Local onde o kanban é coletado e mantido para transferência.
	Kanban chegando em lotes	
	Nivelamento de Carga	Ferramenta para interceptar lotes de kanban e nivelar o seu volume e mix por um período de tempo.
	Programação da produção “vá ver”	Ajuste da programação com base na verificação dos níveis de estoque.

**Fonte: Rother e Shook (1998)**

O Quadro 4 representa ícones e símbolos gerais para elaborar o MFV.

**Quadro 4 - Ícones e símbolos gerais para o MFV**

Ícones gerais	Representa	Notas
	Necessidade de kaizen	Destaca as melhorias necessárias em processos específicos que são fundamentais para se chegar ao fluxo de valor desejado. Pode ser usada para planejar os workshop kaizen.
	Estoque de segurança ou pulmão	“Pulmão” ou “estoque de segurança” devem ser anotados.
	Operador	Representa uma pessoa vista de cima.

**Fonte: Rother e Shook (1998)**

### 2.3.4 MFV: elaboração do estado futuro

Os desperdícios identificados devem ser analisados a fim de identificar as melhores propostas de melhoria para eliminá-los, chegando-se a uma proposta de mapa de estado futuro.

As propostas de melhoria devem focar principalmente as atividades de fluxo, ou sem valor agregado (SVA). Rother e Shook (2003) propõem algumas perguntas chave para o desenvolvimento do projeto do estado futuro, conforme listado a seguir:

1. Qual é o *Takt Time*?
2. Você produzirá para um supermercado de produtos acabados ou diretamente para a expedição?
3. Onde você poderá usar o fluxo contínuo?
4. Onde você precisará usar sistemas puxados com base em supermercados para controlar a produção nos processos anteriores?

5. Em que ponto único da cadeia produtiva (“processo puxador”) você programará a produção?
6. Como você nivelará o *mix* de produção no processo puxador?
7. Que incrementos de trabalho você produzirá e liberará conscientemente no processo puxador?
8. Quais melhorias de processos serão necessárias para o fluxo de valor comportar-se como o projeto de estado futuro define?

### 2.3.5 MFV: avaliação da proposta do estado futuro

Vivan, Ortiz e Paliari (2012) propõem a formulação de parâmetros numéricos, que mostrem a eficácia para soluções indicadas no estado futuro do MFV. O somatório das variáveis representadas pelos tempos de atividades de transporte ( $T_{ta}$ ), espera ( $T_{ea}$ ) e inspeção ( $T_{ia}$ ) indicam o tempo total de desperdício atual ( $T_{da}$ ), conforme (Equação 2).

$$\sum T_{ta} + \sum T_{ea} + \sum T_{ia} = T_{da} \quad \text{Eq. 2}$$

Seguindo o raciocínio do mesmo autor, as variáveis que representam os tempos futuros ( $T_{nf}$ ) são indicadas individualmente pelos tempos de atividades de transporte ( $T_{tf}$ ), espera ( $T_{ef}$ ) e inspeção ( $T_{if}$ ), e os parâmetros de eficácia se baseiam na razão entre as atividades de fluxo futuras e atuais, resultando em três termos:  $x_t$ ,  $x_e$ ,  $x_i$  ( $x_n$ ) (Equação 3).

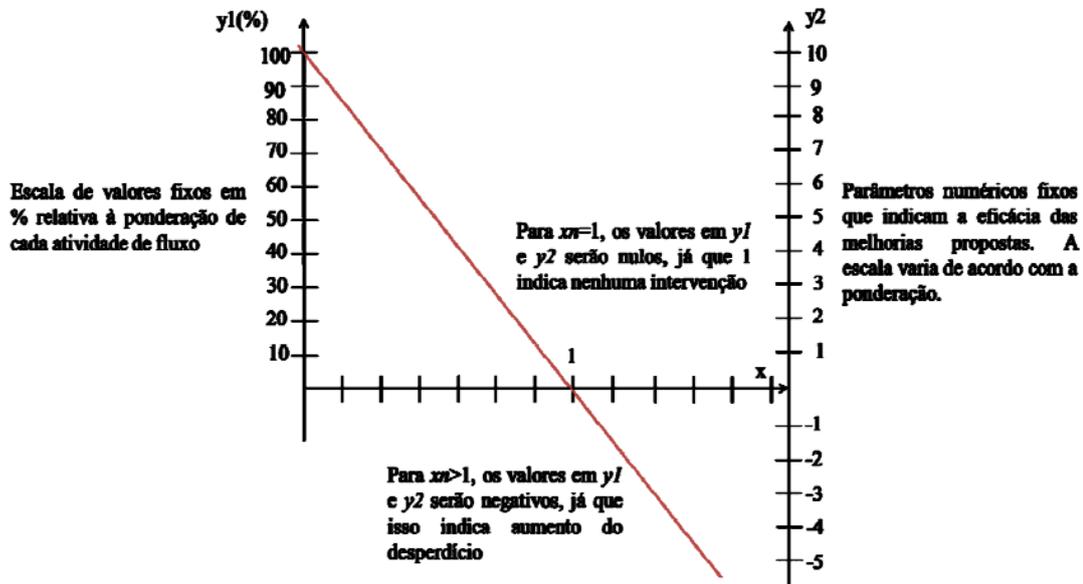
$$x_n = \frac{T_{nf}}{T_{na}} \quad \text{Eq. 3}$$

Caso as equações retornem um valor para  $x_n$  maior do que 1, é possível concluir que a intervenção proposta não é adequada.

Vivan; Ortiz e Paliari (2012) apresentam a necessidade de ponderação dos valores de  $x_n$ , através da divisão percentual do total do tempo de desperdício ( $T_{da}$ ) em relação a cada atividade de fluxo. Considera-se que o tempo total de desperdício seja 100%. Assim, as ponderações para as atividades de fluxo serão obtidas a partir da quantidade de cada

uma (MFV atual) em termos de números absolutos, dividindo-as pelo Tda. Os números resultantes são multiplicados por 100, para que retornem em termos percentuais (VIVAN; ORTIZ; PALIARI, 2012).

Figura 6 - Gráfico de parâmetros para avaliação de eficácia do MFV



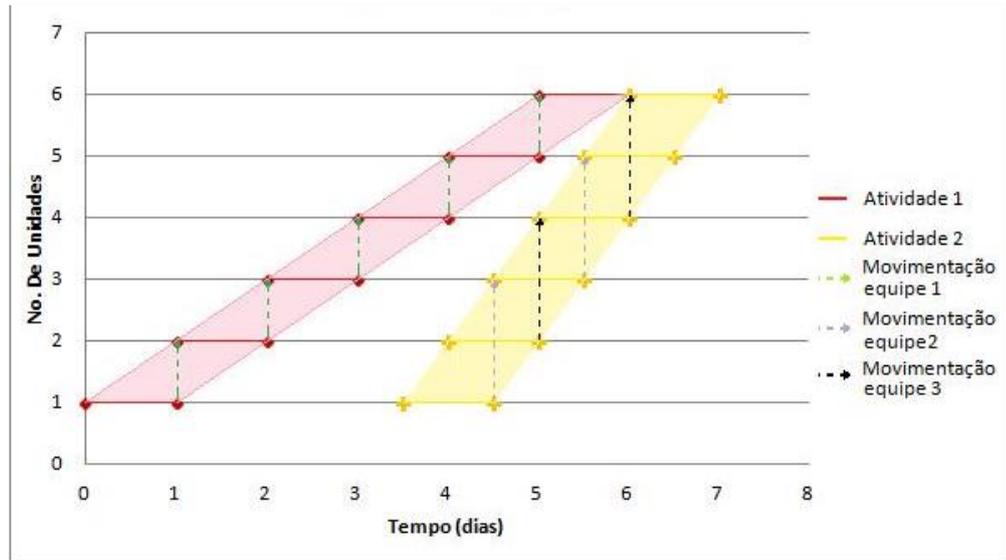
Autor: Vivan; Ortiz e Paliari (2012)

## 2.4 Linha de balanço

A LB é uma técnica bastante antiga, tendo seus primeiros registros encontrados no início dos anos 30 durante a construção do *Empire State Building* em Nova Iorque - EUA (SOUSA; MONTEIRO, 2011).

Para Arditi, Tokdemir e Suh (2002), a LB é orientada para a necessidade de entrega de unidades concluídas e é baseada no conhecimento de quantas unidades devem ser concluídas em dia de modo que pode ser alcançada a entrega programada de unidades. E complementam que o agendamento de sucesso deve incluir sequenciamento adequado das atividades, a compreensão de atividades interdependentes, e ligação flexível de serviços que correm simultaneamente.

**Figura 7 - Exemplo de LB de duas atividades, executadas por equipes distintas**



Fonte: Ortiz (2013)

Sousa e Monteiro (2011) analisam as vantagens da LB, e apresentam algumas características:

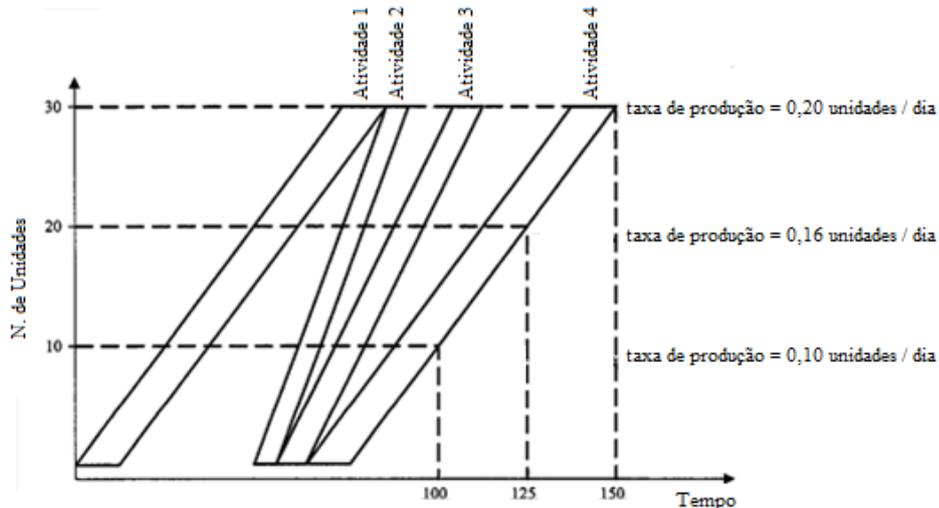
- Atividades programadas para determinada data ou localização;
- Intervalos temporais ou espaciais entre atividades;
- Ritmo de produção;
- Comparação visual entre os ritmos de produção das várias atividades;
- Descontinuidades nas atividades;
- Dependências entre as atividades;
- Datas limite que convêm não ultrapassar;
- Comparação entre as atividades conforme planejado, verificado e previsto.

Arditi, tokdemir e Suh (2002) consideram que o simples cálculo da taxa de alvo de entrega para o projeto tem pouco significado para a determinação do número real de equipes em cada atividade.

A Figura 8 ilustra as atividades que precisam ser executadas para concluir 10 unidades no período de 100 dias, considerando a taxa de produção de  $10/100 = 0,10$  unidades/dia. Posteriormente, pode-se observar que para 20 unidades serem concluídas em

125 dias, a taxa de produção é de  $20/125 = 0,16$  unidades/dia. E por fim, as 30 unidades que irão ser concluídas em 150 dias, com uma taxa de produção de  $30/150 = 0,20$  unidades/dia.

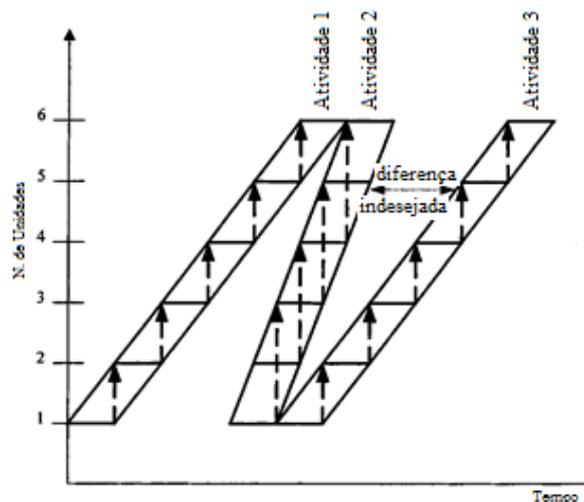
**Figura 8 - Taxa do alvo de entrega na LB**



Fonte: Arditi, Tokdemir e Suh (2002) adaptado pelo autor

Os autores explicam que quando uma atividade deve ser realizada logo após a atividade anterior, estas duas atividades são caracterizadas como atividades com dependência do tempo. Portanto, uma atividade dependente do tempo não tem a liberdade de ser realizada em seu próprio ritmo de produção. A sua taxa de produção é regulada pela taxa de produção de sua atividade dependente do tempo homólogo (ARDITI; TOKDEMIR E SUH, 2002).

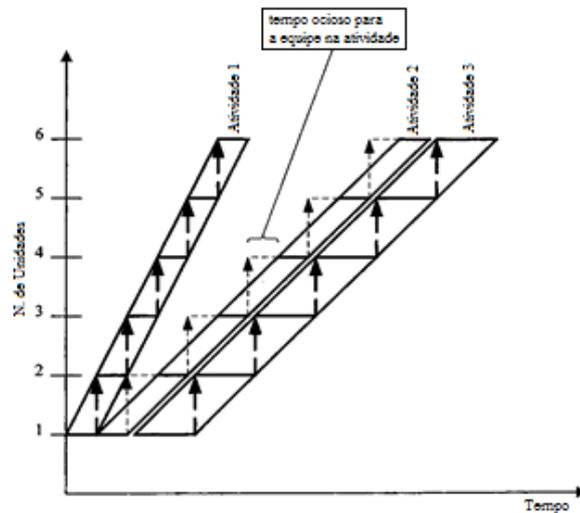
**Figura 9 - Diferença indesejável na programação das atividades 2 e 3 de uma LB**



Fonte: Arditi, Tokdemir e Suh (2002) adaptado pelo autor

Os mesmos autores complementam que as atividades dependentes não tem a liberdade de ser executada no seu próprio ritmo de produção e necessitarão esperar até que as outras atividades dependentes dentro da mesma unidade estejam concluídas. Assim, é inevitável que as atividades dependentes do espaço tenham tempo ocioso.

**Figura 10 - Programação correta de uma LB com dependência de tempo entre atividades 2 e 3**



Fonte: Arditi, Tokdemir e Suh (2002) adaptado pelo autor

Sousa e Monteiro (2011) apontam como necessário estimular a continuidade das tarefas, ou seja, não ter a mesma atividade ocorrendo em diferentes localizações ao mesmo tempo, e sincronizar os ritmos de produção para as várias tarefas, isto é, obter o máximo número de linhas paralelas. Os autores classificam que um diagrama otimizado em LB caracteriza-se pela continuidade das tarefas, pelo ritmo de produção constante, pelos períodos temporais e espaciais adicionais para compensar eventuais atrasos, pelas folgas no início e fim das tarefas e pela divisão equitativa dos trabalhos no tempo (SOUSA; MONTEIRO, 2011).

## 2.5 Simulação

De acordo com Banks et al. (2005), simulação corresponde à cópia de uma situação do mundo real ou de um sistema fornecida por meio da coleta de dados. Envolve a representação de um sistema e pode propor interferências sobre este sistema. É o processo de se construir um modelo lógico-matemático de um sistema real e de experimentá-lo, normalmente com auxílio de um computador (PRITSKER, 1986).

A simulação auxilia no dimensionamento de recursos físicos e de mão de obra, na determinação de capacidade de produção e do tempo de ciclo, na identificação de gargalos e, por último, nas decisões operacionais (LAW; KELTON, 2007). Para Banks et al. (2005), entre as utilidades da simulação na construção civil e na gestão de projetos, estão a importância na aplicação dos conceitos *Lean*, na simulação da dinâmica do fluxo de trabalho e na elaboração de modelos virtuais.

O modelo de simulação permite o estudo do seu comportamento, inclusive sua evolução ao longo do tempo e a realização de suposições matemáticas e/ou lógicas a respeito da operação deste sistema que podem ser simuladas, com o objetivo de prever o impacto resultante no desempenho deste sistema (BANKS et al., 2005).

A simulação ainda permite o estudo de sistemas e subsistemas, possibilita a melhoria de sistemas submetidos a observações a partir de um conhecimento acumulado, a verificação de soluções analíticas e pode orientar novas formas de trabalho (BANKS et al., 2005).

Adotando-se como referência Law e Kelton (2007) e Banks et al., (2005), a classificação dos modelos de simulação pode ser feita em três dimensões:

a) Modelos de simulação estático e dinâmico: caracteriza-se como estático quando o modelo representa um sistema que não se altera com o tempo, e como dinâmico quando sofre alterações no decorrer do tempo.

b) Modelo de simulação determinístico e estocástico: modelo que não contém elemento probabilístico é chamado determinístico, mas se o modelo contém incertezas é chamado de estocástico.

c) Modelo de simulação contínuo e discreto: quando mudanças no estado do modelo ocorrem instantaneamente e em momentos específicos no tempo, é um modelo discreto, mas se estas mudanças ocorrem a todo instante e de forma contínua no tempo, o modelo é chamado contínuo.

### **2.5.1 Vantagens da simulação**

Law e Kelton (2007) listam as seguintes vantagens de utilizar simulação para o estudo de sistema:

- Sistemas complexos que contenham elementos estocásticos que não conseguem ser descritos perfeitamente por modelos matemáticos resolvidos analiticamente podem ser estudados pela simulação;
- Fornece um melhor controle sobre as condições experimentais do que seria possível no real, pois podem ser feitas várias replicações no modelo designando-se os valores que se deseja para os parâmetros;
- Permite a replicação precisa dos experimentos, podendo-se, assim, testar alternativas diferentes para o sistema;
- Permite simular longos períodos em um tempo reduzido;
- Em geral, é mais econômico que testar o sistema real, e evita gastos inúteis na compra de equipamentos desnecessários.

Pegden, Shannon, e Sadowski (1995) enumeram algumas vantagens da simulação. Reiteram que novas políticas, fluxos de informações, processos operacionais e processos organizacionais podem ser definidos através deste modelo, sem que haja interferência no andamento de determinada operação, novos hardwares, layouts e sistemas de transporte podem ser testados sem que haja a necessidade de aquisição de novos recursos, gera hipóteses de como ocorrem alguns fenômenos, permite o ajuste do tempo para a realização de uma determinada ação submetida a uma investigação conforme for conveniente, fornece dados a partir da interação de variáveis, permite a análise de fila para avaliação de atraso em alguns setores, como o de materiais ou informações e auxilia na análise de como os indivíduos enxergam o funcionamento do sistema.

### **2.5.2 Definições de elementos de simulação**

De acordo com Banks et al. (2005), para entender e analisar um sistema, alguns termos precisam ser definidos. A entidade corresponde a uma unidade deste sistema, o

atributo é uma propriedade desta entidade e a atividade está associada a um período de tempo específico. O evento corresponde a uma situação pontual que pode modificar o estado do sistema, que pode ser definido como o conjunto de variáveis necessárias para descrever o sistema relativo ao objeto em estudo.

Em relação à construção com característica industrial, vista como um processo produtivo, é possível inferir que as máquinas representam as entidades e seus atributos são representados por sua capacidade de produção, velocidade de funcionamento e necessidade de manutenção. Sua atividade poderia ser exemplificada pela concretagem e, possíveis eventos seriam representados pela manutenção em caso de defeitos ou danos, e as variáveis de estado pela ocupação e ociosidade desta máquina (BANKS et al., 2005).

### **2.5.3 Componentes do processo de simulação**

Há três elementos que constituem o processo de simulação. Para Law e Kelton (2007) e Banks et al., (2005) o primeiro deles é o sistema, que pode ser definido como um conjunto de componentes ou entidades que interagem e que atuam integradamente para atingir determinado objetivo.

Teorias do sistema descrevem as características e eventuais relações e, possivelmente, seu comportamento. Dados e resultados são obtidos através de experimentos. Teorias do sistema são obtidas por modelagem sobre o que se tem observado, compatibilizando-a aos dados e resultados. Se o modelo de simulação existe para este sistema, então as adequações às teorias podem ser feitas a partir dos resultados e dados da simulação. No mundo da simulação, um modelo deve ser desenvolvido com objetivos muito bem definidos (SARGENT, 2005).

O segundo elemento fundamental de um processo de simulação é o modelo. Para que um sistema possa ser simulado é preciso determinar um conjunto de suposições a respeito do funcionamento deste sistema, geralmente por meio de interações lógicas ou matemáticas. Este conjunto de suposições constitui o modelo utilizado para representar o sistema em estudo (LAW; KELTON, 2007; BANKS et al., 2005).

Banks et al., (2005) complementa que modelo é a representação e simplificação do sistema em estudo. Para sua elaboração faz-se importante uma abordagem exclusiva dos aspectos do sistema que afetam diretamente o problema submetido à

investigação e podem ser utilizados tanto como uma ferramenta de análise para prever os efeitos em alterações em sistemas pré-existentes, como uma ferramenta para prever seu desempenho em novos sistemas submetidos a diversas situações.

Sargent (2005) acrescenta que o modelo conceitual é a representação matemática/lógica do sistema desenvolvido para o objetivo do estudo em questão. É desenvolvido pela modelagem do sistema para os objetivos do estudo da simulação. O modelo de simulação corresponde à transposição do modelo conceitual em um computador de tal forma que os experimentos, dados e resultados possam ser conduzidos. É obtido através da implantação do modelo em um sistema computacional específico, que inclui a programação do modelo conceitual cujas especificações estão contidas na especificação do modelo de simulação. A especificação do modelo de simulação é uma descrição detalhada da especificação e projeto do software para a programação e implantação do modelo conceitual no sistema computacional. Inferências a respeito do sistema são feitas a partir de dados obtidos pela condução de experimentos computacionais no modelo de simulação (SARGENT, 2005).

O terceiro elemento necessário é o computador. Law e Kelton (2007) e Banks et al., (2005) definem que a simulação pode ser realizada através de cálculos manuais, entretanto, devido ao elevado número de operações, é recomendado que seu desenvolvimento seja realizado por meio do uso de um computador.

Tem implicância em situações da vida real que não podem ser facilmente resolvidas através de parâmetros exclusivamente matemáticos e, assim, através de modelos computacionais, imita o comportamento de um sistema (BANKS et al., 2005).

A partir dos elementos citados (sistema, modelo e computador), surgem duas relações: a relação de modelagem, entre o sistema do mundo real e o modelo, e a relação de simulação, entre o modelo e o computador. A modelagem preocupa-se com a representação do mundo real tendo em vista determinado objetivo. Em contrapartida, simulação é uma forma particular de interagir com o modelo. Em outras palavras, na simulação utiliza-se um computador para avaliar o modelo numericamente, e os resultados deste processo são coletados com vistas a estimar corretamente determinada característica do modelo (LAW; KELTON, 2007).

### 2.5.4 Etapas de simulação

Timm e Lorig (2015) compararam o procedimento utilizado por diversos autores para criação do modelo de simulação, esta comparação está apresentada por meio do Quadro 5. As etapas estão numeradas consecutivamente em ordem cronológica e as letras adicionais implicam a execução combinada dos passos.

**Quadro 5 - Comparação de procedimento para diferentes modelos de simulação**

	(Balci 1990)	(Banks 1996)	(Carson 2004)	(Centeno 1996)	(Friedman, 1996)	(Law & Kelton 1982)	(Maria 1997)	(Montgomery 2001)	(Musselman 1994)	(Pegden 1995)	(Pritsker 1999)	(Sadowski 1992)	(Schmidt 1984)	(Shannon 1975)
Definir o problema	1	1	1a	1	1a	1a	1	1a	1a	1a	1a	1	1	1a
Formular objetivos	2a	2	1 b	2/4	1 b	1 b		1 b	1 b	1 b	1 b	2	2	1 b
Planejar o projeto / estudo		3	1 c			1 c		1 c		2	1 c	3		2
Coletar dados do sistema real	2 b	5	3/4	3	2a	2a	2a	2	2	3	3 b	4a	3	3
Criar modelo conceitual	3a	4	2		3a	2 b	3		3	4	2	4 b	4/6	4
Validar modelo conceitual					3 b	3						5	5	
Identificar / coletar dados de entrada	3 b				2 b		2 b		4	6			7	6
Selecionar variáveis de resposta					2 c			3						
Traduzir o modelo em linguagem de simulação	4	6	3/4	5	4a	4a	4a		5	7	3a	6	8	7
Verificar o modelo	*	7	5a	6a	4 b	4 b	4 b		6a	8a	4a		9	8a
Validar o modelo	*	8	5 b	6 b	4 c	6	5		6 b	8 b	4 b		10	8 b
Delineamento experimental	5	9	6a		5a	7	7	4		5/9	3 c			5/9
Conduzir experimentos	6a	10	6 b	7a	6	5/8a	8	5	10a	10	5	7	11a	10a
Número de execuções suficiente		12			5 b	8 b			10 b					10 b
Análise de dados de saída	6 b	11	7	7 b	7	9	9	6	7	11	6	8	11 b	11
Documentação dos resultados	8	13	8	8		10	6		8	12	7	9		12
A validação dos resultados, revalidação do modelo	7							7					12	

Fonte: Timm e Lorig (2015)

### 2.5.5 Verificação e validação da simulação

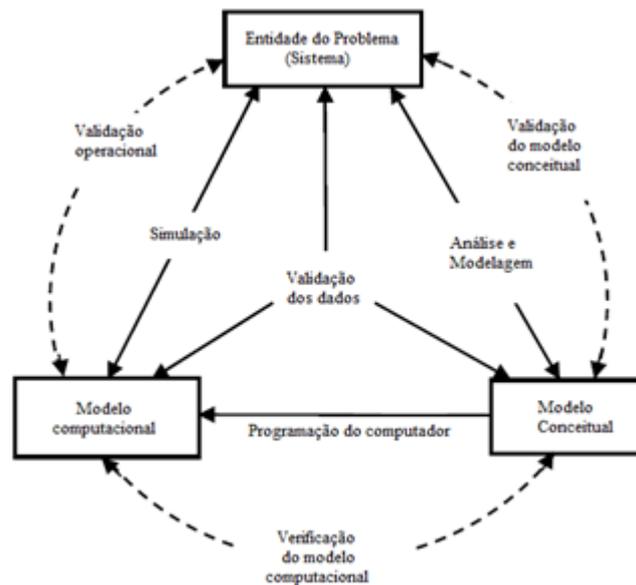
Sargent (2005) discute paradigmas que relacionam a verificação e a validação ao modelo de desenvolvimento do processo. Existem duas maneiras de visualizar esta relação: de uma maneira simples ou de uma maneira complexa. Considerando-se o modelo simplificado, a entidade do problema corresponde ao sistema a ser modelado. O modelo conceitual é a representação matemática/lógica da entidade do problema desenvolvida para o estudo em questão; e o modelo computacional corresponde à implantação do modelo conceitual em um computador.

O modelo conceitual é desenvolvido a partir de uma fase de análise e modelagem, o modelo computacional a partir de uma fase de programação e posterior implantação e inferências a respeito da entidade do problema são obtidas após a elaboração de

experimentos computacionais no modelo computacional na fase de experimentação. Na Figura 11, a seguir, (modelo simples), é demonstrada a relação da validação e da verificação com a versão simples do processo de modelagem (SARGENT, 2005). O mesmo autor reitera que a validação operacional é garantida quando a eficiência do modelo é suficiente para que o objetivo proposto pelo modelo supere a aplicabilidade pretendida por este modelo. Validade de dados é definida pela certificação de que os dados necessários para a construção do modelo, o teste e a avaliação do modelo e a condução dos experimentos para resolver o problema são adequados e corretos.

Seguindo o raciocínio do mesmo autor, um modelo iterativo é utilizado para desenvolver um modelo de simulação. O modelo conceitual é desenvolvido e validado. Este processo é repetido até que o modelo conceitual seja satisfatório. Então, o modelo computacional é desenvolvido. Este processo é repetido até que o modelo computacional seja satisfatório. Qualquer alteração no processo de validade operacional pode gerar novos processos de validação e verificação. Normalmente, vários modelos são previamente desenvolvidos para que se alcance um modelo válido de simulação.

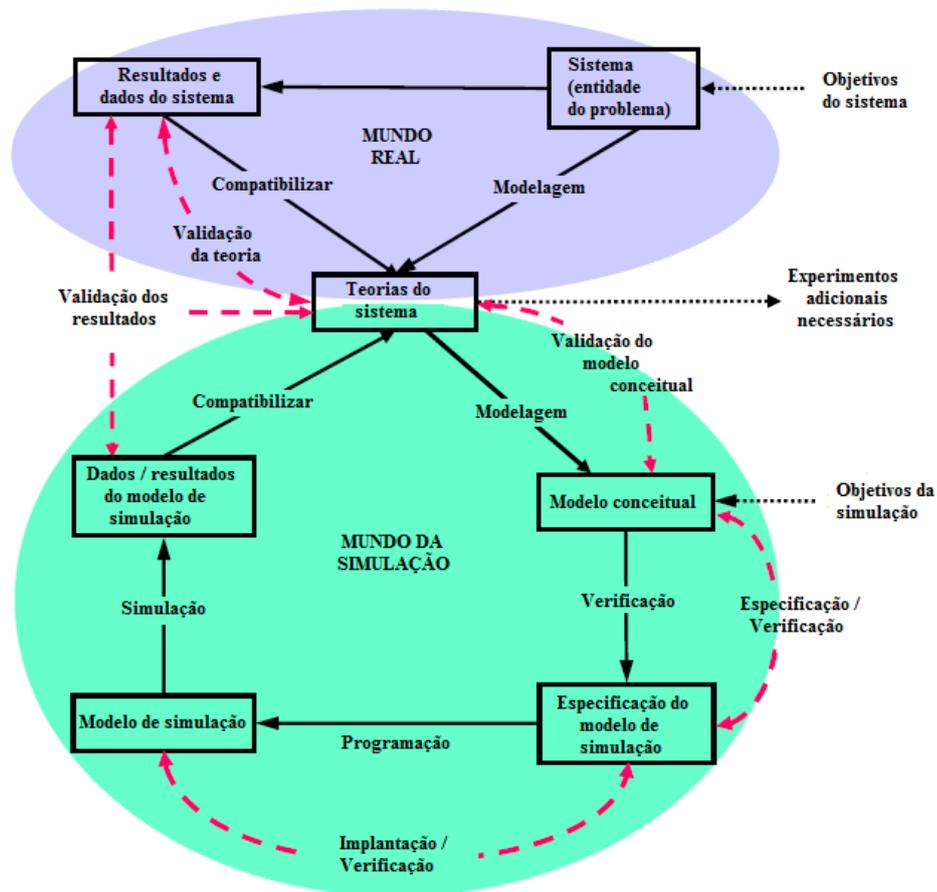
**Figura 11 - Versão simplificada do processo de modelagem**



**Fonte: Sargent, (2005) adaptado pelo autor**

A Figura 12, a seguir, mostra de uma maneira detalhada a relação de validação e a verificação com os modelos de simulação desenvolvidos e as teorias do sistema tanto no mundo real quanto no mundo da simulação.

Figura 12 - Relação do mundo real e simulação com verificação e validação



Fonte: Sargent, (2005) adaptado pelo autor

A validação do modelo conceitual é definida considerando-se que as teorias e assuntos correlacionados ao modelo conceitual são compatíveis com as contidas nas teorias do sistema e que o modelo de representação do sistema é razoável para a proposta pretendida pelo modelo de simulação. Especificação/verificação é definida como a garantia de que o projeto do software e a especificação para a implantação e programação do modelo conceitual no sistema computacional específico são satisfatórios. Implantação/verificação é definida como a garantia de que o modelo de simulação tem sido implantado de acordo com a especificação do modelo de simulação. Validação operacional é estabelecida quando o resultado do modelo tem acurácia suficiente para que o objetivo proposto supere a aplicabilidade apresentada.

## 2.6 Considerações sobre o capítulo

Este capítulo apresentou a conceituação do Sistema Toyota de produção, conceitos de desperdício, abordagens da produção e pensamento enxuto, os quatorze princípios de Liker e as quatro regras apresentadas por Spear e Bowen para se entender o STP. Apresentou também os conceitos e princípios da *Lean Construction*.

As vantagens de se modelar uma situação real utilizando-se de simulação, situação esta que é possível por meio de um modelo computacional, pode ser observada e experimentada. A simulação pode auxiliar a dimensionar recursos físicos e de mão-de-obra, determinar a capacidade de produção, tempo de ciclo, identificar gargalos, tomar decisões operacionais, aplicar conceitos *Lean* na dinâmica do fluxo de trabalho e prever o impacto resultante no desempenho deste sistema, sem que haja interferência no andamento de determinada operação ou a necessidade de aquisição de novos recursos, entre outros benefícios.

Por fim, este capítulo apresentou os elementos necessários para um modelo de simulação juntamente com sua validação.

### 3 MÉTODO

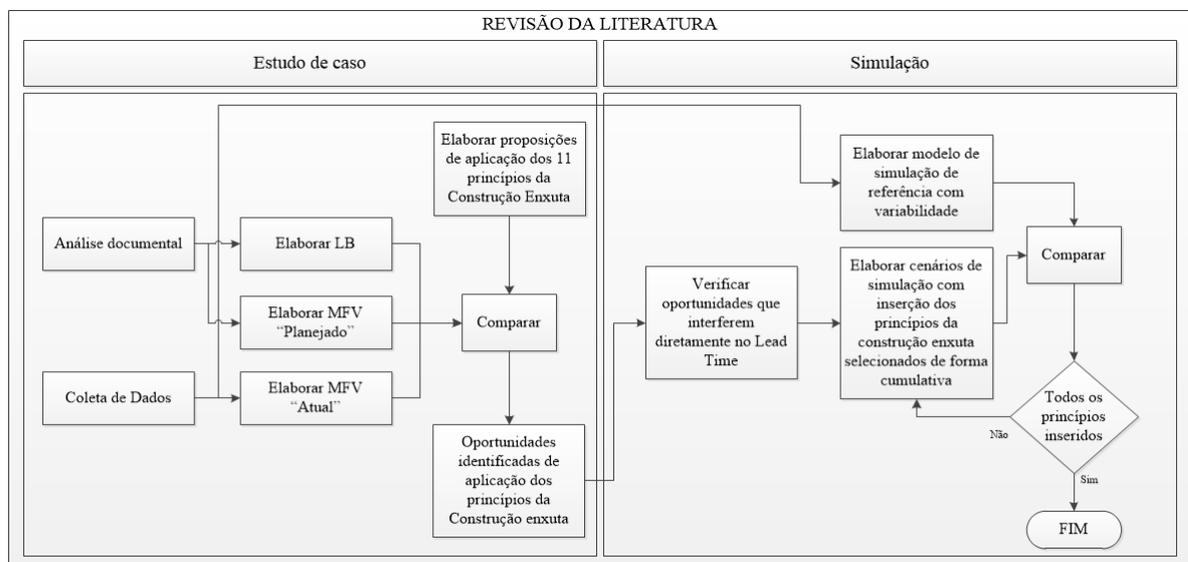
Este capítulo aborda a estratégia de pesquisa adotada, apresentação do objeto de estudo, o delineamento da pesquisa, os procedimentos operacionais e como os dados obtidos foram analisados.

#### 3.1 Estratégias de pesquisa

As estratégias de pesquisa para alcançar o objetivo proposto são compostas pela pesquisa bibliográfica seguida pelo estudo de caso e finalizada com a simulação. Esta pesquisa pretende explorar a aplicação dos princípios da Construção Enxuta na fase de estrutura de um edifício.

Na figura 13 está apresentado o fluxograma que mostra as diversas etapas que compõem as estratégias de pesquisa adotada.

**Figura 13 - Fluxograma das estratégias adotadas nesta pesquisa**



Fonte: Autor (2016)

##### 3.1.1 Classificação da pesquisa com base em seus objetivos

Gil (2002) define as pesquisas exploratórias como pesquisas que têm por objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a constituir hipóteses. Pode-se dizer que estas pesquisas têm como objetivo principal o aprimoramento de ideias ou a descoberta de intuições. Seu planejamento é,

portanto, bastante flexível, de modo que possibilite a consideração dos mais variados aspectos relativos ao fato estudado. Embora o planejamento da pesquisa exploratória seja bastante flexível, na maioria dos casos assume a forma de pesquisa bibliográfica ou de estudo de caso (GIL, 2002).

A pesquisa conglomerada os diversos aspectos considerando a definição citada anteriormente. Portanto, com base nos objetivos, a pesquisa é classificada como uma pesquisa exploratória.

### 3.1.2 Classificação da pesquisa com base nos procedimentos técnicos

Os procedimentos técnicos que melhor se enquadraram nesta pesquisa e que foram utilizados de acordo com suas necessidades estão listados no Quadro 6.

**Quadro 6 - Atividades desenvolvidas e seus respectivos procedimentos técnicos adotados**

<b>Etapa</b>	<b>Atividade</b>	<b>Procedimento técnico</b>
1.	Revisão sistemática e referencial teórico básico;	Pesquisa bibliográfica
2.	Identificação das oportunidades de aplicação dos princípios da <i>Lean Construction</i> ;	Estudo de caso
3.	Construção do modelo computacional que represente a obra estudada, e os cenários que testou o <i>Lead Time</i> ;	Simulação

**Fonte: Autor (2016)**

### 3.1.3 Pesquisa bibliográfica

A pesquisa bibliográfica foi desenvolvida principalmente com base em livros e artigos científicos. Desta maneira buscou-se o conhecimento teórico para embasar o trabalho que versa sobre a aplicação da Construção Enxuta. Investigou-se, portanto, o conhecimento desde suas raízes no sistema Toyota de produção até suas variações atuais. Posteriormente, pesquisou-se sobre simulação, ferramenta esta que possibilitou testar os diversos cenários propostos.

### 3.1.4 Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS)

Segundo Gil (2002), a pesquisa bibliográfica possui caráter exploratório, pois permite maior familiaridade com o problema, aprimoramento de ideias ou descoberta de intuições. E acrescenta que deve ser desenvolvida com base em material já elaborado como livros, artigos e teses.

Conforto, Amaral e Silva (2011) retratam que uma maneira de se obter maior rigor e melhores níveis de confiabilidade em uma revisão bibliográfica é adotar uma abordagem sistemática. Isso significa definir uma estratégia e um método sistemático para realizar buscas e analisar resultados que permita a repetição por meio de ciclos contínuos até que os objetivos da revisão sejam alcançados.

Estes autores elaboraram um roteiro intitulado como Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) Roadmap e foi desenvolvido a partir das melhores práticas preconizadas em áreas do conhecimento que fazem uso dessa estratégia, combinada com uma pesquisa-ação em pesquisas científicas na área de gerenciamento de projetos.

O resultado de uma RBS para Levy e Ellis (2006) deve estabelecer o “estado da arte” e comprovar que a pesquisa em questão contribui com algo novo para o corpo de conhecimento existente.

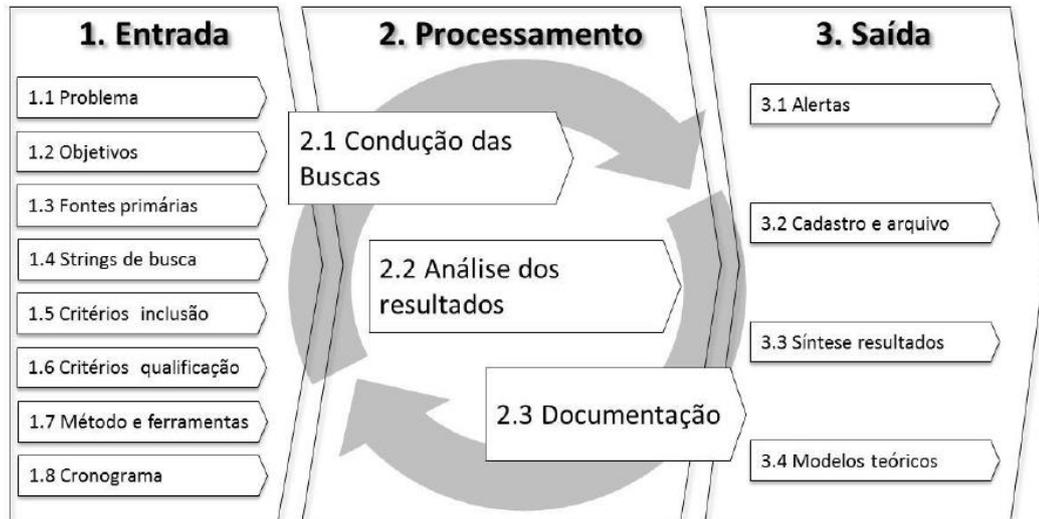
Levy e Ellis (2006) complementam que conhecer o atual estágio do conhecimento sobre o assunto que se pretende estudar é o primeiro passo em um projeto de pesquisa. Assim, uma revisão bibliográfica sistemática é útil para:

- Ajudar o pesquisador no dimensionamento e compreensão do corpo de conhecimento referente a um determinado assunto, incluindo identificar pesquisas que já foram realizadas, o que falta pesquisar e quais são as lacunas;
- Prover um embasamento teórico sólido para o estudo proposto, como complemento ao item anterior;
- Prover evidência e o devido embasamento para o problema de pesquisa que guiará a investigação;
- Apresentar as devidas justificativas para a condução do estudo e qual a contribuição original para o corpo de conhecimento e/ou teoria;
- Contribuir para melhor definir e estruturar o método de pesquisa, objetivos e questões para o estudo proposto.

## Modelo para RBS

A Figura 14 apresenta a sequência de execução da revisão bibliográfica sistemática.

Figura 14 - Modelo para realização da revisão bibliográfica sistemática



Fonte: Conforto, Amaral e Silva (2011)

### Etapa 1 – Entrada

- **Problema:** considerando o problema de pesquisa desta dissertação e os objetivos da revisão, o problema será descrito no formato de pergunta e busca respostas para refutar ou corroborar com estudos já publicados. Para os autores, esta etapa é o ponto de partida para realização da RBS e a pergunta realizada nesta condição é: qual a lacuna do conhecimento que esclarece o uso do MFV associado ao modelo de simulação para implementação dos princípios da Lean Construction?

- **Objetivos:** Esta etapa tem por objetivo verificar por meio da RBS: as publicações que abordam o uso do MFV associado à simulação para implementação da Construção Enxuta aplicada em canteiros de obras e identificar o estado da arte acerca do tema que envolve o problema de pesquisa;

- **Fontes primárias:** Alguns periódicos são de especial importância. Dentre eles, resalta-se: Winter Simulation Conference (WSC) e International Group for Lean Construction (IGLC). As bases de dados utilizadas para elaboração desta RBS foram:

Engineering Village (www.engineeringvillage.com) e Science Direct (www.sciencedirect.com) como principais fontes primárias.

- Strings de busca: Conforto, Amaral e Silva (2011) destacam que a construção da String segue um processo de definição, teste e adaptação. É preciso testar a combinação das palavras e termos e a forma de como foram utilizados os operadores lógicos da busca booleana.

Desta maneira ficam definidas as palavras-chave, cujas descrições encontram-se no Quadro 7, que aborda as palavras utilizadas para a realização da busca pelos principais trabalhos que versam sobre o tema desta dissertação.

**Quadro 7 - Descrição das palavras chave para realização do RBS**

<b>PALAVRA</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>
<i>Value Stream Mapping</i>	Diagrama simples de todas as etapas envolvidas no fluxo de material e informações, necessárias para atender aos clientes do pedido à entrega. Os mapas do fluxo de valor podem ser desenhados em diferentes momentos, a fim de revelar as oportunidades de melhoria (LEAN ENTERPRISE INSTITUTE, 2011).
<i>Lean Construction</i>	A Construção Enxuta iniciou-se com a percepção da reprodutibilidade dos conceitos desenvolvidos pelo sistema Toyota de produção para o ambiente da construção civil (BALLARD; HOWELL, 1998).
<i>Simulation</i>	De acordo com Banks et al. (2005), simulação corresponde à cópia de uma situação do mundo real ou de um sistema fornecida por meio da coleta de dados. Envolve a representação de um sistema e pode propor interferências sobre este sistema. É o processo de se construir um modelo lógico-matemático de um sistema real e de experimentá-lo, normalmente com auxílio de um computador (PRITSKER, 1986).

**Fonte: Autor (2016)**

Assim, no Quadro 8 são apresentadas as strings consideradas importantes para o problema de pesquisa desta dissertação.

**Quadro 8 - String utilizada na RBS**

<b>STRING</b>	<b>COMPOSIÇÃO</b>
<b>1</b>	<i>Lean Construction (AND); Value Stream Mapping (AND); Simulation</i>

**Fonte: Autor (2016)**

- Critérios de inclusão: para a definição dos critérios de inclusão dos artigos é preciso levar em conta os objetivos da pesquisa (CONFORTO; AMARAL; SILVA, 2011).

Nesta etapa buscou-se encontrar o que há de mais recente em publicações e, conseqüentemente, as lacunas do conhecimento a respeito do uso da construção enxuta na produção de unidades habitacionais. Assim sendo, os critérios de inclusão são:

1) Publicações que contenham o uso do MFV para diagnóstico da aplicação dos princípios da Construção Enxuta no canteiro de obras;

2) E o primeiro critério associado ao uso de simulação para validação das propostas de melhoria;

A verificação dos critérios foi confirmada com a leitura das publicações. A leitura respeitou a sequência proposta por Conforto, Amaral e Silva (2011) por meio dos filtros listados a seguir:

Filtro 1: Leitura do título, resumo e palavras-chave;

Filtro 2: Leitura, introdução e conclusão;

Filtro 3: Leitura completa;

Caso pelo menos um dos critérios de inclusão não seja verificado na sequência de leitura, os respectivos artigos serão descartados.

- Critérios de qualificação: Conforto, Amaral e Silva (2011) definem que o uso de critérios de qualificação dos artigos é especialmente útil para avaliar a importância

do artigo para o estudo. Os critérios de qualificação adotados foram o método de pesquisa utilizado e a quantidade de citações do artigo.

- Método e ferramentas: devem ser definidas algumas etapas para a condução das buscas (CONFORTO; AMARAL; SILVA, 2011), que para esta dissertação estão expostas a seguir:

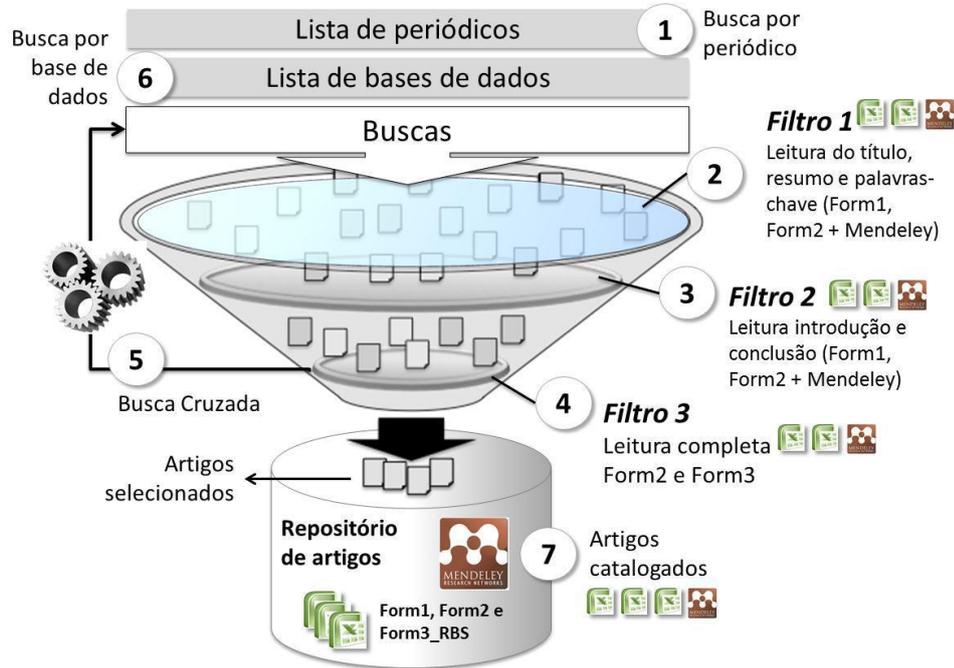
1. Acessar as bases de dados e buscar as strings;
2. Restringir os mecanismos de buscas para pesquisa de artigos publicados num período de cinco anos (2011-2016);
3. Filtrar os resultados;
4. Qualificar os periódicos;
5. Armazenar os resultados.

- Cronograma: Para esta dissertação, o prazo estabelecido para a conclusão foi de dois meses.

#### Etapa 2 - Processamento:

As etapas de busca, análise dos resultados e documentação segue um processo iterativo contendo sete passos. Esse processo está ilustrado na Figura 15.

**Figura 15 - Procedimento iterativo da fase de processamento da RBS**



Fonte: Conforto, Amaral e Silva (2011)

- **Condução das buscas:** nesta etapa são realizadas as buscas por periódicos, a busca cruzada e a busca por base de dados. Os artigos selecionados como principais foram aqueles que passaram pelos três filtros e atenderam ao menos um critério de inclusão.

### 3.1.5 Estudo de caso

Yin (2001) apresenta de maneira geral que o estudo de caso representa a estratégia preferida quando se colocam questões do tipo "como" e "por que", quando o pesquisador tem pouco controle sobre os eventos e quando o foco se encontra em fenômenos contemporâneos inseridos em algum contexto da vida real. Complementa que o estudo de caso é a estratégia escolhida ao se examinarem acontecimentos contemporâneos, mas quando não se podem manipular comportamentos relevantes (YIN, 2001).

Gil (2002) complementa que o estudo de caso consiste no estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos, de maneira que permita seu amplo e detalhado conhecimento, tarefa praticamente impossível mediante outros delineamentos já considerados. E considera adequado para diferentes propósitos, tais como:

- a) explorar situações da vida real cujos limites não estão claramente definidos;
- b) preservar o caráter unitário do objeto estudado;
- c) descrever a situação do contexto em que está sendo feita determinada investigação;
- d) formular hipóteses ou desenvolver teorias; e
- e) explicar as variáveis causais de determinado fenômeno em situações muito complexas que não possibilitam a utilização de levantamentos e experimentos.

Embasando-se nas características do estudo de caso apresentadas por Yin (2001) e Gil (2002), considerou-se esta a estratégia de pesquisa mais adequada para auxiliar na identificação das possibilidades de aplicação dos princípios da Construção Enxuta no canteiro de obras.

O estudo de caso buscou aproximar a realidade do canteiro de obra à filosofia da Construção Enxuta, sugerindo o diagnóstico da possibilidade de aplicação dos onze princípios propostos por Koskela (1992), e desta maneira alcançar novos patamares de produtividade.

No decorrer do trabalho a estrutura do pavimento tipo foi considerada como um lote de produção, que estará representado por meio do MFV juntamente com a LB, que foram analisados e, a partir de então, se propôs a aplicação dos onze princípios definidos por Koskela (1992).

### **3.1.6 Simulação**

Para Timm e Lorig (2015) simulação computacional pode ser posicionada como um método de pesquisa para delinear novos projetos e pode ser aplicada como metodologia para apoiar problemas de identificação, conceituação e avaliação.

Em um segundo momento o estudo se caracterizará como uma pesquisa de interferência, pois haverá uma variável independente representada pela aplicação das ferramentas do *Lean* no modelo computacional que retrata a situação atual da obra.

A simulação representará a estratégia desta etapa, e permitirá a quantificação do *Lead Time*, que caracteriza a variável dependente e o resultado final.

### 3.2 Sujeito

A obra visitada foi um condomínio residencial composto por dois subsolos e um bloco de doze pavimentos com 40 apartamentos, sendo trinta e seis apartamentos e quatro coberturas duplex. Os apartamentos são compostos por três dormitórios, sala, cozinha, área de serviço, banheiros e varanda gourmet com churrasqueira. O empreendimento totaliza uma área construída de 7.986 m<sup>2</sup>, sendo a área útil de 4.685 m<sup>2</sup> e a área comum de 3.300 m<sup>2</sup>, e está localizado na cidade de São Carlos-SP.

No entanto, o objeto de estudo é caracterizado apenas pelo pavimento-tipo. Na Figura 16 pode se observar a planta baixa do pavimento tipo que ilustra parte desta etapa e aumenta a familiaridade com a obra estudada.

**Figura 16 - Planta baixa pavimento tipo**



Fonte: Autor (2016)

Na Figura 17 pode ser observado o projeto estrutural do pavimento tipo, que representa a delimitação deste trabalho.

**Figura 17 - Projeto estrutural do pavimento tipo**



**Fonte: Autor (2016)**

Dessa maneira foi delimitada como objeto de estudo um pavimento, e serão avaliadas as etapas de execução da estrutura que estão contidas nos pavimentos-tipo, envolvendo as demais atividades associadas (formas, armação, instalações prediais elétricas e hidráulicas e concretagem) que compõem tal estrutura.

### 3.3 Delineamento

A sequência que apresenta o delineamento da pesquisa percorre desde a coleta de tempos de execução da estrutura do pavimento tipo até a simulação dos diversos cenários que testam a implantação dos princípios da Construção Enxuta e interferem no *Lead time*.

Ou seja, será variado o elemento interferente, no caso, os princípios da Construção Enxuta apresentados por Koskela e quantificados os resultados, representados pelo *Lead Time* de produção da estrutura do pavimento-tipo.

### **3.4 Procedimentos operacionais**

Na realização deste estudo, compôs a equipe de pesquisadores, além do autor dessa dissertação, a pesquisadora Adriana Cristina Boni, aluna de doutorado. Ambos os pesquisadores frequentam o Laboratório de Modelagem e Simulação com uso de Informática - LMSI/UFSCar.

As atividades em comum entre os pesquisadores se limitam à coleta de dados e sua respectiva representação por meio das ferramentas LB e MFV.

#### **3.4.1 Elaboração da LB**

Para a melhor compreensão da dinâmica das atividades de execução da estrutura entre os diversos pavimentos, foi realizada a análise documental, que abrange a implantação da obra, o plano de ataque, o cronograma físico, os projetos específicos, os quantitativos e outros documentos a serem solicitados ao longo do desenvolvimento da pesquisa e da obra. As informações pertinentes à pesquisa serão representadas utilizando-se como ferramenta a LB.

Em um primeiro momento foi realizada reunião em 09/03/2016 com os principais envolvidos no planejamento e no sistema de produção da empresa, e teve por objetivo o esclarecimento da pesquisa e suas metas. Participaram desta reunião a engenheira de planejamento, o gerente do setor de suprimentos da empresa, os pesquisadores de mestrado e doutorado, e o orientador responsável pelos envolvidos nesta pesquisa.

Nesta ocasião foram solicitados os primeiros dados documentais: cronograma físico e projetos preliminares da obra. Ressalta-se que a reunião ocorreu no momento em que a obra encontrava-se na fase de implementação do canteiro.

Pode-se observar por meio de análise do cronograma que o processo de estrutura representou a restrição para execução do processo crítico, pois sua antecipação

realocaria a atividade de revestimento externo previamente ao período de chuvas. Esta condição justificou a escolha da atividade a ser estudada.

Para criação da LB foi utilizado o software MS Project 2010®. Os dados utilizados neste momento foram extraídos do planejamento da obra e representavam as atividades com repetição do pavimento-tipo. Foram consideradas as datas de início e as durações destas atividades, que foram organizadas por pavimento. A quantidade de atividades contidas no projeto dificulta sua visualização. Desta maneira, o objetivo é considerar a estrutura que foi elaborada no gráfico de Gantt e demonstrá-la por meio da LB utilizando-se apenas as tarefas de resumo, recurso este pertencente ao software utilizado.

Na sequência foi inserida e ativada a coluna de sinalizadores no MS Project 2010®, que são campos lógicos vinculados com cada atividade. O mesmo procedimento ocorreu para as diversas atividades.

Assim, serão preservadas as tarefas de resumo e ocultadas as tarefas de execução. O modo de exibição que deve ser configurado é a representação acumulada.

O próximo passo é a configuração do estilo de barra vinculado a cada atividade, que deve associar a representação acumulada ao sinalizador, definindo a forma e a cor diferente da barra para cada atividade. Deste modo, permite uma melhor visualização dos tempos de espera entre o agendamento das mesmas atividades nos diversos pavimentos.

Para facilitar a identificação das atividades foi inserida uma coluna de texto com as respectivas abreviações, que serão exibidas nas barras da LB.

### **3.4.2 Elaboração do MFV “planejado” do pavimento-tipo**

Para elaboração dos diversos Mapas de Fluxo de Valor foram seguidas as etapas descritas no manual “Aprendendo a Enxergar: mapeando o fluxo de valor para agregar valor e eliminar o desperdício” elaborado por Rother e Shook (1998).

De posse dos dados de planejamento, foi escolhido, de maneira aleatória, o sétimo pavimento para representação do MFV “planejado”. Com a escolha estabelecida, foram excluídas as informações dos outros pavimentos juntamente com as atividades sem repetição. As informações restantes compuseram as caixas de processo e estoques intermediários.

Em seguida foi realizada reunião com os envolvidos no planejamento e suprimentos da empresa, reunião essa em que foi mapeado o fluxo de informação e materiais e finalizado o MFV “planejado”.

### **3.4.3 Coleta de dados**

O estudo individual da estrutura de um pavimento foi efetuado por meio de observação direta da execução dos serviços e preenchimento de planilhas específicas, registro fotográfico, filmagens, entrevistas casuais com equipe de produção e, posteriormente, foi realizada cronoanálise das atividades. Com posse das informações obtidas, foi elaborado o MFV.

Posteriormente, a partir do dia 6 de abril os pesquisadores foram inseridos ao ambiente de canteiro de obras, no qual se buscou observar os documentos (projetos, memorial descritivo, memória de cálculo, diário de obras, plano de concretagem, ata de reunião, ficha de verificação de serviço, lista de presença, rastreabilidade e romaneio) referentes ao processo escolhido, na busca por um melhor entendimento do processo.

Na continuidade, foi acompanhada a execução do segundo e terceiro pavimentos, buscando-se entender o fluxo de trabalho, sequência de atividades, distribuição de equipes e as dificuldades que poderiam ser encontradas posteriormente.

Na sequência, foi realizada uma observação direta no quarto pavimento entre os dias 05 e 16/05/2016, e foi elaborada uma ficha de coleta de dados, na qual foram registradas as atividades em execução durante o período especificado, suas respectivas datas de execução com horas de início e de fim, bem como a composição da equipe que realizava determinadas atividades. A escolha pelo quarto pavimento ocorreu pelo fato de que o mesmo deveria ter alcançado a estabilidade do processo de acordo com as observações realizadas durante a análise documental. A ficha de coleta de dados utilizada neste momento da pesquisa estará representada no Apêndice I.

### **3.4.4 Elaboração do MFV “atual” da estrutura do pavimento-tipo**

Para elaboração do MFV “atual” foi observada a execução do quarto pavimento, local em que se detalhou o conjunto de estrutura reticulada. Durante a análise do planejamento, identificou-se a necessidade da execução desta estrutura em sete dias. Entretanto, a execução da mesma ocorreu em onze dias.

Como se pôde observar no MFV “planejado” do pavimento tipo ilustrado na Figura 37, o cliente interno da tarefa estrutura é representado pela tarefa de contrapiso. Complementando o MFV, foram apresentados o lote de análise, a demanda e o turno trabalhado.

Para continuidade da elaboração do MFV “atual” foram utilizados os dados cronometrados da estrutura do pavimento-tipo e as atividades que acontecem em paralelismo foram agrupadas por retângulos. A representação das atividades que acontecem em paralelo na linha do tempo foi uma proporção entre a soma das atividades de conversão e do tempo total, conforme cálculo apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1 - Cálculo da linha do tempo do MFV**

Atividade	Ativ. de conversão	Tempo Total	Soma do tempo total	TAV	TAV (%)	DESP (%)	tav para 11 dias	Tempo disponível
Montar forma pilar	8:42:00	10:30:00	29:30:00	14:52:00	50,40%	49,60%	09:04:16	18:00:00
Armar pilar	6:10:00	19:00:00						
Montar forma viga	19:38:00	38:03:00	303:43:00	174:09:00	57,34%	42,66%	32:41:01	57:00:00
Escorar	14:07:00	44:20:00						
Montar assoalho	16:06:00	27:45:00						
Montar forma escada	11:05:00	36:15:00						
Concretar pilar	3:38:00	4:35:00						
Armar viga	6:25:00	13:10:00						
Elétrica	28:05:00	35:45:00						
Armar positivo laje	4:25:00	4:30:00						
Hidráulica	28:10:00	42:00:00						
Armar escada	3:30:00	3:30:00						
Armar laje (treliça/espaçadores)	9:30:00	10:30:00						
Montar forma sacadas	17:21:00	18:20:00						
Armar negativo laje	12:09:00	25:00:00						
Concretar laje / viga	7:36:00	9:20:00	7:36:00	9:20:00	81%	19%	07:19:43	09:00:00
							49:05:00	84:00:00

**Fonte: Autor (2016)**

O fluxo de informação deste MFV foi montado com dados levantados juntamente com o engenheiro da obra, responsável pelo setor de suprimentos e de planejamento.

### **3.4.5 Identificação de oportunidades de aplicação dos princípios da Construção Enxuta**

A próxima etapa ocorreu a partir da avaliação da aplicação dos onze princípios da Construção Enxuta, com embasamento nos dados representados na LB e no MFV.

Na busca de uma lógica para unir os dados às proposições, Yin (2001) sugere que cada proposição deve se destinar ao atendimento de uma premissa a ser examinada dentro do escopo do estudo.

Desta forma, para que haja uma correlação adequada entre as proposições elaboradas e os dados obtidos, se torna necessário que os onze princípios da Construção Enxuta sejam devidamente respeitados. Desta maneira foram elaboradas as proposições no sentido de examinar cada um dos onze princípios apresentados por Koskela (1992). A seguir podem-se observar as proposições formuladas para análise dos dados:

01. Eliminar atividades processadas que não são necessárias;
02. Permitir a sequência das atividades de maneira eficaz;
03. Reduzir a variabilidade no processo;
04. Eliminar atividades de fluxo (transporte, espera e inspeção);
05. Eliminar estoque em processamento;
06. Permitir flexibilidade no layout dos apartamentos;
07. Implantar gestão visual e 5S;
08. Criar indicadores globais;
09. Atuar na causa raiz dos problemas;
10. Manter equilíbrio entre melhoria nos fluxos e nas conversões;
11. Estabelecer metas de melhorias baseadas nos melhores resultados do mercado.

### **3.4.6 Simulação**

Para elaboração dos cenários de simulação se torna necessário identificar, dentre as oportunidades de aplicação dos princípios da Construção Enxuta, aquelas que interferem diretamente no *Lead Time* de produção da tarefa estrutura do pavimento-tipo.

Deste modo, no quadro 9, são apresentados os princípios passíveis de simulação no contexto desta pesquisa. Vale destacar que a análise considera apenas os princípios que possibilitaram a geração de um novo cenário de simulação.

**Quadro 9 - Princípios da CE que interferem diretamente no *Lead Time***

<b>Princípios da CE</b>	<b>Interfere diretamente na redução do <i>Lead Time</i> de produção?</b>	
	<b>Sim</b>	<b>Não</b>
<b>1. Reduzir a parcela das atividades que não agregam valor</b>	<b>X</b>	
<b>2. Aumentar o valor do produto considerando as necessidades dos clientes</b>		<b>X</b>
<b>3. Reduzir a variabilidade</b>	<b>X</b>	
<b>4. Reduzir o tempo de ciclo</b>	<b>X</b>	
<b>5. Simplificar por meio da redução do número de etapas</b>	<b>X</b>	
<b>6. Aumentar a flexibilidade de saída</b>		<b>X</b>
<b>7. Aumentar a transparência do processo</b>		<b>X</b>
<b>8. Focar o controle no processo completo</b>		<b>X</b>
<b>9. Introduzir melhoria contínua no processo</b>		<b>X</b>
<b>10. Manter o equilíbrio entre melhorias nos fluxos e nas conversões</b>		<b>X</b>
<b>11. Benchmarking</b>		<b>X</b>

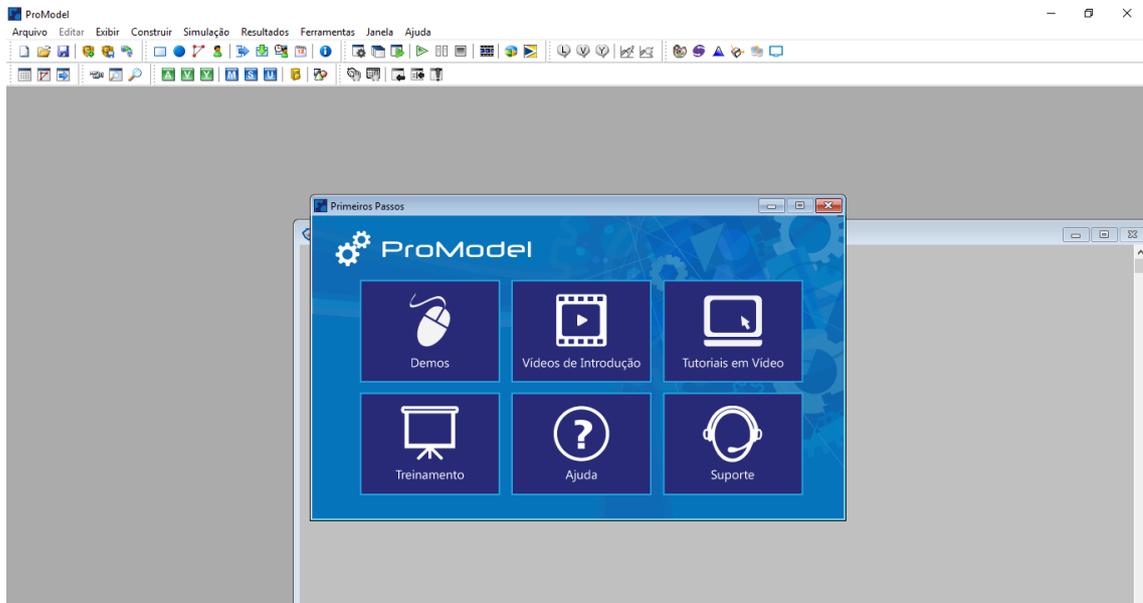
**Fonte: Autor (2016)**

Vale ressaltar que os princípios que não interferem diretamente no *Lead Time* de produção podem assumir duas vertentes distintas: ou realmente não atuam neste contexto, ou o influenciam de tal forma, que impossibilitam sua mensuração no *Lead Time*.

O software ProModel®, utilizado neste estudo, é uma ferramenta designada para modelagem de simulação e permite ao usuário a definição de diversos cenários no

decorrer do estudo. O modelo de simulação elaborado pelo autor representou o que se pôde observar no canteiro de obras. A Figura 18 apresenta a tela inicial do software ProModel®.

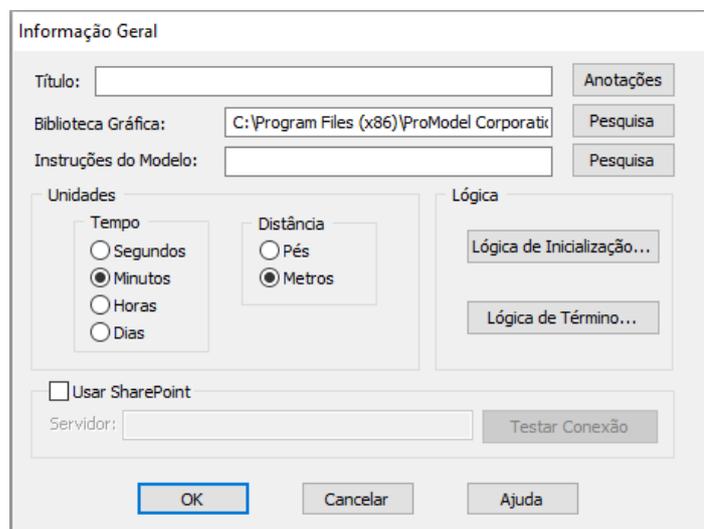
**Figura 18 - Software ProModel®**



**Fonte: Autor (2016)**

A janela de informação geral permite configurar as unidades de tempo e distância padrões e mudá-las de acordo com o escopo do modelo. No modelo elaborado pelo autor foi definida a unidade de tempo em minutos e a distância em metros.

**Figura 19 - Janela para definir unidade de tempo e distância no software ProModel®**

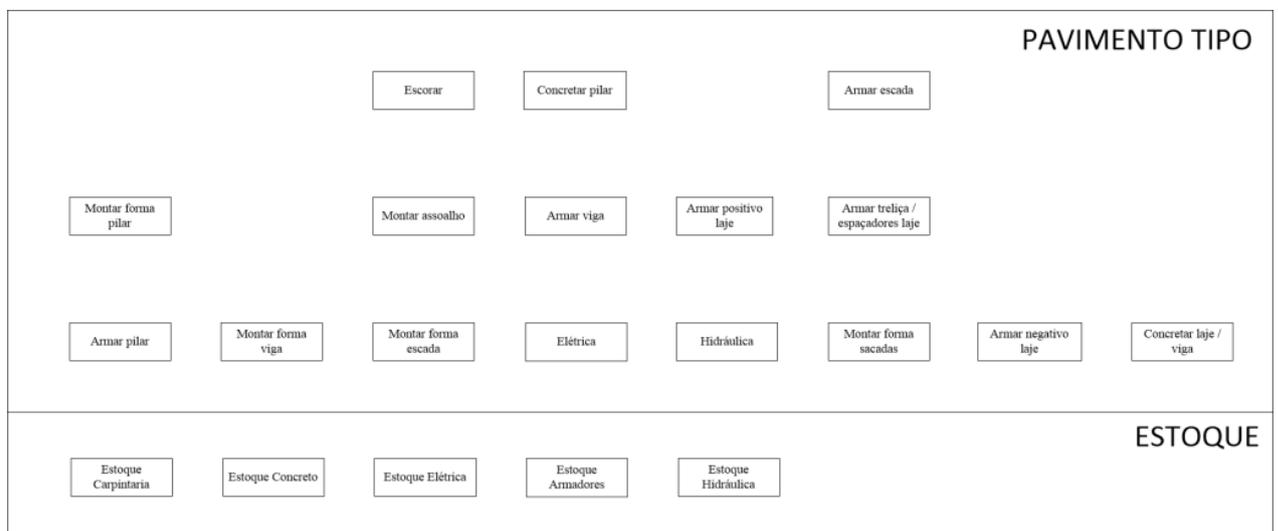


**Fonte: Autor (2016)**

Para elaboração de um modelo existem elementos obrigatórios, que são representados pelos locais, entidades, processos e chegadas. De maneira breve, serão apresentados a seguir.

Os locais são os lugares para onde os objetos são direcionados a fim de que determinadas operações pré-definidas sejam realizadas sobre eles. É também onde se define o número máximo de entidades que o local suporta processar em um mesmo momento. Para a elaboração do modelo de simulação, foram utilizadas como *layout* de fundo as caixas de processo do MFV. O posicionamento de cada local do modelo será de acordo com as caixas de processo apresentadas da Figura 20.

**Figura 20 - Layout utilizado para modelagem de simulação**



**Fonte: Autor (2016)**

As entidades são os elementos que serão processados no sistema. Neste modelo as entidades estão representadas pelas atividades observadas no canteiro de obras.

Os processos definem o que acontece com a entidade no determinado local e o próximo local para onde a entidade deve ser direcionada. Então, por meio deste elemento se define as curvas estatísticas que melhor representam o tempo de processamento de tal atividade e como as entidades irão se movimentar.

E por fim, a chegada, que indica a primeira vez e o local em que uma entidade irá alcançar o sistema.

### 3.4.7 Tempos de processamento

Os valores cronometrados no canteiro de obras foram considerados como o valor padrão de cada atividade. Buscando-se aproximar o modelo de simulação de uma situação ao mais próximo da realidade, foram utilizados os dados de variabilidade apresentados por Souza (2001) conforme apresentado na Tabela 2.

**Tabela 2 - Variabilidade obtidas dos resultados de Souza (2001)**

Serviço	Mínimo (Hh/m <sup>2</sup> )	Máximo (Hh/m <sup>2</sup> )	Mediana (Hh/m <sup>2</sup> )	(máx-mín) /min (%)	Desvio mínimo em relação à mediana	Desvio máximo em relação à mediana
Fôrmas	0,61	1,6	0,81	162	24,7	97,5
Armação	0,05	0,1	0,06	100	16,7	66,7
Concretagem	2,17	4,55	3,24	110	33,0	40,4
Alvenaria	0,88	2,56	1,61	191	45,3	59,0
Revestimento de fachada com argamassa – emboço ou massa única	1,23	5,13	1,62	317	24,1	216,7
Revestimento interno de paredes com argamassa – emboço ou massa única	0,35	1,53	0,77	337	54,5	98,7
Contrapiso	0,32	1,53	0,89	378	64,0	71,9
Revestimento com gesso	0,35	1,27	0,74	263	52,7	71,6
Revestimento cerâmico	0,43	1,75	0,66	307	34,8	165,2
	<b>Média</b>				<b>38,9</b>	<b>98,6</b>
	<b>Mediana</b>				<b>34,8</b>	<b>71,9</b>

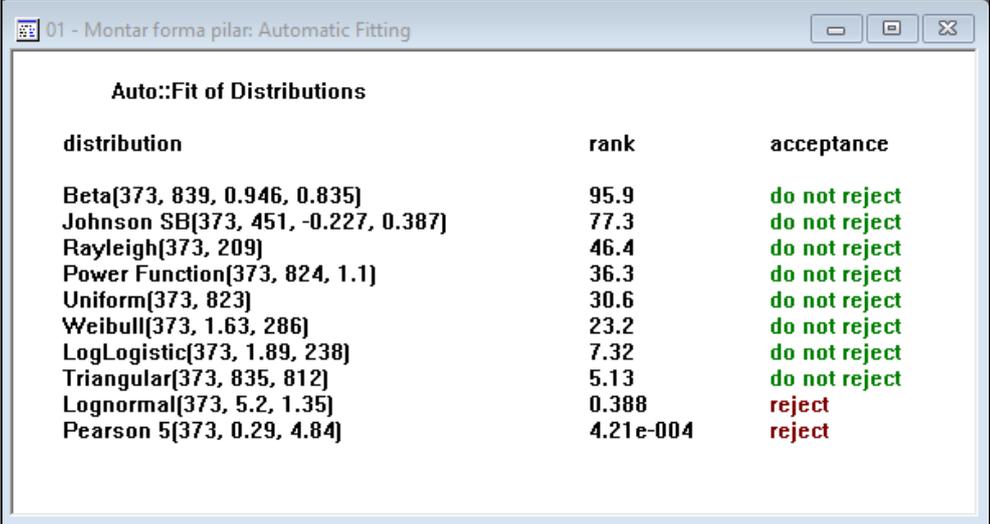
Fonte: Adaptado de Souza (2001)

A partir da coleta dos tempos referentes às atividades executadas no canteiro de obras foram inseridas variações sobre os mesmos, considerando o intervalo compreendido entre -35% a 72%, que foi extraído da Tabela 2. Utilizou-se o *software* MS Excel® para a obtenção das variações, que foram distribuídas de maneira aleatória dentro do intervalo mencionado anteriormente.

Para definição da melhor curva estatística, considerando o conjunto de dados que o MS Excel® retornou de maneira aleatória, foi utilizado o software StatFit®. A curva melhor classificada entre as diversas analisadas é transportada para o elemento processo do software ProModel®.

Pode-se observar na Figura 21 as distribuições estatísticas com sua respectiva classificação.

Figura 21 - Software StatFit® para definição da curva estatística a ser utilizar no software ProModel®

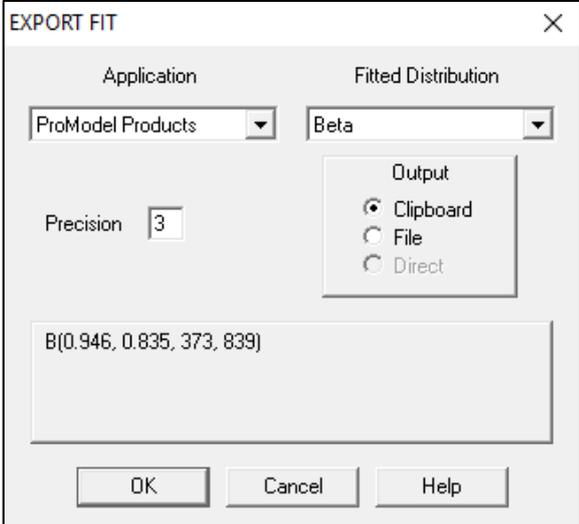


distribution	rank	acceptance
Beta(373, 839, 0.946, 0.835)	95.9	do not reject
Johnson SB(373, 451, -0.227, 0.387)	77.3	do not reject
Rayleigh(373, 209)	46.4	do not reject
Power Function(373, 824, 1.1)	36.3	do not reject
Uniform(373, 823)	30.6	do not reject
Weibull(373, 1.63, 286)	23.2	do not reject
LogLogistic(373, 1.89, 238)	7.32	do not reject
Triangular(373, 835, 812)	5.13	do not reject
Lognormal(373, 5.2, 1.35)	0.388	reject
Pearson 5(373, 0.29, 4.84)	4.21e-004	reject

Fonte: Autor (2016)

A Figura 22 apresenta a configuração de exportação da curva que melhor se adequa a condição de estudo e o software que estará recebendo os dados. Neste estudo, é transportada para o software ProModel®.

Figura 22 - Exportação da curva estatística adequada para o software ProModel®



EXPORT FIT

Application: ProModel Products

Fitted Distribution: Beta

Precision: 3

Output:  Clipboard,  File,  Direct

B(0.946, 0.835, 373, 839)

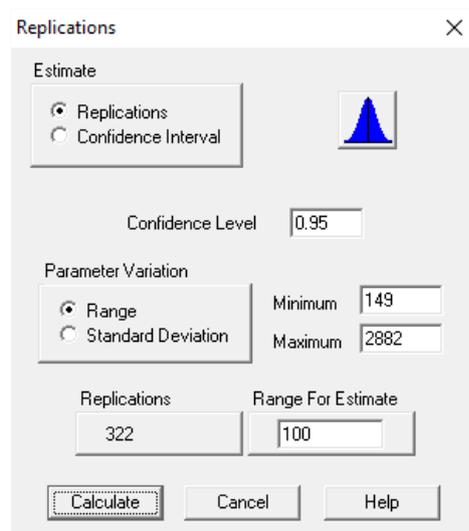
OK Cancel Help

Fonte: Autor (2016)

### 3.4.8 Número de repetições de simulação

O software StatFit® também define o número de repetições necessárias para que o valor retornado seja confiável dentro de um nível de confiança desejado. Com a inserção dos valores mínimo e máximo, o software retorna o número necessário de repetições.

**Figura 23 - Definição do número de repetições por meio do software StatFit®**



Fonte: Autor (2016)

### 3.4.9 Caracterização dos cenários

O primeiro cenário proposto embasou os demais, considerando-se apenas os tempos cronometrados no canteiro de obras associados à variabilidade característica da construção civil. Torna-se importante ressaltar que a este cenário não foi vinculado qualquer princípio. Para a elaboração dos cenários seguintes, os princípios que interferem diretamente no *Lead Time* de produção foram aplicados de maneira sequencial e cumulativa.

### 3.4.10 Modelagem do primeiro cenário

Este primeiro modelo de simulação tem por objetivo a representação no software de simulação do que se pôde observar no canteiro de obras. Na Tabela 3 são apresentadas as variações de tempo para a modelagem do primeiro cenário.

**Tabela 3 - Variações de tempo do cenário 1 de simulação**

	Atividades	Tempos (minutos)		
		Mín.	Padrão <sup>1</sup>	Máx.
01	Montar forma pilar	339,30	522,00	897,84
02	Armar pilar	240,50	370,00	636,40
03	Montar forma viga	765,70	1.178,00	2.026,16
04	Escorar	550,55	847,00	1.456,84
05	Montar assoalho	627,90	966,00	1.661,52
06	Montar forma escada	432,25	665,00	1.143,80
07	Concretar pilar	141,70	218,00	374,96
08	Armar viga	250,25	385,00	662,20
09	Elétrica	1.095,25	1.685,00	2.898,20
10	Armar positivo laje	172,25	265,00	455,80
11	Hidráulica	1.098,50	1.690,00	2.906,80
12	Armar escada	136,50	210,00	361,20
13	Armar laje (treliça/espaçadores)	370,50	570,00	980,40
14	Montar forma sacadas	676,65	1.041,00	1.790,52
15	Armar negativo laje	473,85	729,00	1.253,88
16	Concretar laje / viga	296,40	456,00	784,32

**Fonte: Autor (2016)**

Além dos tempos de simulação, outra informação relevante para a pesquisa é o momento e o local em que as entidades serão incluídas no sistema pela primeira vez. Essas informações são apresentadas no Quadro 10.

A denominação “primeira vez” apresentada no quadro, significa o momento em que a entidade foi processada em determinado local pela primeira vez, considerando-se uma representação na linha temporal. Tal representação está embasada nas ocorrências observadas no canteiro.

<sup>1</sup>Padrão: tempo das atividades observadas no canteiro de obra alcançado por meio de coleta de dados

**Quadro 10 - Momento que a entidade entra no cenário 1**

Entidade	Local	Primeira Vez
Forma_Pilar	Loc_Estoque_Carpintaria	0 hr
Armação_Pilar	Loc_Estoque_Armadores	0 hr
Forma_Viga	Loc_Estoque_Carpintaria	18 hr
Escora	Loc_Estoque_Carpintaria	24 hr
Assoalho	Loc_Estoque_Carpintaria	24 hr
Forma_Escada	Loc_Estoque_Carpintaria	24 hr
Concreto_Pilar	Loc_Estoque_Concreto	33 hr
Armação_Viga	Loc_Estoque_Armadores	38 hr
Elétrica	Loc_Estoque_Elétrica	33 hr
Armação_Positivo_Laje	Loc_Estoque_Armadores	47 hr
Hidráulica	Loc_Estoque_Hidráulica	42 hr
Armação_Escada	Loc_Estoque_Armadores	52 hr
Armação_Treliça_Espaçadores_Laje	Loc_Estoque_Armadores	47 hr
Forma_Sacada	Loc_Estoque_Carpintaria	51 hr
Armação_Negativo_Laje	Loc_Estoque_Armadores	60 hr
Concreto_Laje_Viga	Loc_Estoque_Concreto	76 hr

**Fonte: Autor (2016)**

No Apêndice II está representado o algoritmo de programação do modelo computacional que compõe o cenário 1 de simulação.

### **3.4.11 Modelagem do segundo cenário**

O segundo cenário buscou reduzir a parcela das atividades que não agregam valor. Para que os requisitos do primeiro princípio sejam atendidos, foram eliminadas as atividades de retrabalho, ou seja, as chapas de compensado que compõem a fôrma de assoalho não possuíam uma posição definida durante sua montagem, e para ajustá-las nos diversos pavimentos eram realizadas emendas ou recortes.

Na Tabela 4 são apresentadas as variações de tempo necessárias para a modelagem do segundo cenário, considerando-se a eliminação dos tempos de emendas e cortes.

**Tabela 4 - Variações de tempo do cenário 2 de simulação**

	Atividades	Tempos (minutos)		
		Mín.	Padrão	Máx.
01	Montar forma pilar	339,30	522,00	897,84
02	Armar pilar	240,50	370,00	636,40
03	Montar forma viga	765,70	1.178,00	2.026,16
04	Escorar	550,55	847,00	1.456,84
05	Montar assoalho	343,85	529,00	909,88
06	Montar forma escada	432,25	665,00	1.143,80
07	Concretar pilar	141,70	218,00	374,96
08	Armar viga	250,25	385,00	662,20
09	Elétrica	1.095,25	1.685,00	2.898,20
10	Armar laje (positivo)	172,25	265,00	455,80
11	Hidráulica	1.098,50	1.690,00	2.906,80
12	Armar escada	136,50	210,00	361,20
13	Armar laje (treliça/espaçadores)	370,50	570,00	980,40
14	Montar forma sacadas	676,65	1.041,00	1.790,52
15	Armar laje (negativo)	473,85	729,00	1.253,88
16	Concretar laje / viga	296,40	456,00	784,32

**Fonte: Autor (2016)**

No Quadro 11 é apresentado o momento e o local em que as entidades serão incluídas no segundo cenário pela primeira vez.

**Quadro 11 - Momento que a entidade entra no cenário 2**

Entidade	Local	Primeira Vez
Forma_Pilar	Loc_Estoque_Carpintaria	0 hr
Armação_Pilar	Loc_Estoque_Armadores	0 hr
Forma_Viga	Loc_Estoque_Carpintaria	18 hr
Escora	Loc_Estoque_Carpintaria	24 hr
Assoalho	Loc_Estoque_Carpintaria	24 hr
Forma_Escada	Loc_Estoque_Carpintaria	24 hr
Concreto_Pilar	Loc_Estoque_Concreto	33 hr
Armação_Viga	Loc_Estoque_Armadores	38 hr
Elétrica	Loc_Estoque_Elétrica	33 hr
Armação_Positivo_Laje	Loc_Estoque_Armadores	47 hr
Hidráulica	Loc_Estoque_Hidráulica	42 hr
Armação_Escada	Loc_Estoque_Armadores	52 hr
Armação_Treliça_Espaçadores_La	Loc_Estoque_Armadores	47 hr
Forma_Sacada	Loc_Estoque_Carpintaria	51 hr
Armação_Negativo_Laje	Loc_Estoque_Armadores	60 hr
Concreto_Laje_Viga	Loc_Estoque_Concreto	76 hr

**Fonte: Autor (2016)**

### 3.4.12 Modelagem do terceiro cenário

No terceiro cenário de simulação, a variabilidade inserida no primeiro cenário, modelado com base no trabalho de Souza (2001), foi reduzida em 50%. Considerou-se a execução das atividades deste cenário de maneira padronizada e uma atuação ativa no sentido de corrigir oportunamente eventuais problemas que ocorram durante a execução das mesmas.

Na Tabela 5 são apresentadas as variações de tempo para a modelagem do terceiro cenário.

**Tabela 5 - Variações de tempo do cenário 3 de simulação**

	Atividades	Tempos (minutos)		
		mín	padrão	máx
<b>01</b>	Montar forma pilar	433,26	522,00	709,92
<b>02</b>	Armar pilar	307,10	370,00	503,20
<b>03</b>	Montar forma viga	977,74	1.178,00	1.602,08
<b>04</b>	Escorar	703,01	847,00	1.151,92
<b>05</b>	Montar assoalho	439,07	529,00	719,44
<b>06</b>	Montar forma escada	551,95	665,00	904,40
<b>07</b>	Concretar pilar	180,94	218,00	296,48
<b>08</b>	Armar viga	319,55	385,00	523,60
<b>09</b>	Elétrica	1.398,55	1.685,00	2.291,60
<b>10</b>	Armar positivo laje	219,95	265,00	360,40
<b>11</b>	Hidráulica	1.402,70	1.690,00	2.298,40
<b>12</b>	Armar escada	174,30	210,00	285,60
<b>13</b>	Armar laje (treliça/espacedores)	473,10	570,00	775,20
<b>14</b>	Montar forma sacadas	864,03	1.041,00	1.415,76
<b>15</b>	Armar negativo laje	605,07	729,00	991,44
<b>16</b>	Concretar laje / viga	378,48	456,00	620,16

**Fonte: Autor (2016)**

No Quadro 12 é apresentado o momento e o local em que as entidades irão participar do terceiro cenário pela primeira vez.

**Quadro 12 - Momento que a entidade entra no cenário 3**

Entidade	Local	Primeira Vez
Forma_Pilar	Loc_Estoque_Carpintaria	0 hr
Armação_Pilar	Loc_Estoque_Armadores	0 hr
Forma_Viga	Loc_Estoque_Carpintaria	18 hr
Escora	Loc_Estoque_Carpintaria	24 hr
Assoalho	Loc_Estoque_Carpintaria	24 hr
Forma_Escada	Loc_Estoque_Carpintaria	24 hr
Concreto_Pilar	Loc_Estoque_Concreto	33 hr
Armação_Viga	Loc_Estoque_Armadores	38 hr
Elétrica	Loc_Estoque_Elétrica	33 hr
Armação_Positivo_Laje	Loc_Estoque_Armadores	47 hr
Hidráulica	Loc_Estoque_Hidráulica	42 hr
Armação_Escada	Loc_Estoque_Armadores	52 hr
Armação_Treliça_Espaçadores_La	Loc_Estoque_Armadores	47 hr
Forma_Sacada	Loc_Estoque_Carpintaria	51 hr
Armação_Negativo_Laje	Loc_Estoque_Armadores	60 hr
Concreto_Laje_Viga	Loc_Estoque_Concreto	76 hr

**Fonte: Autor (2016)**

### 3.4.13 Modelagem do quarto cenário

O quarto cenário atuou na redução do tempo de ciclo por meio da execução de apenas uma atividade por cada equipe, permitindo, desta maneira, a execução de atividades paralelas por mãos de obra de equipes distintas. Na sequência, o tamanho do lote processado foi reduzido com vistas à eliminação de grande parcela do tempo de espera resultante do acúmulo de trabalho em progresso. Por fim, atuou-se na alteração da data e hora de início das atividades, com o intuito de eliminar as janelas de tempo isentas de atividades.

Na Tabela 6 são apresentadas as variações de tempo para a modelagem do cenário 4.

**Tabela 6 - Variações de tempo do cenário 4 de simulação**

	Atividades	Tempos (minutos)		
		mín	padrão	máx
01	Montar forma pilar	373,08	449,50	611,32
02	Armar pilar	178,12	214,60	291,86
03	Montar forma viga	473,46	570,43	775,78
04	Escorar	192,49	231,92	315,41
05	Montar assoalho	130,68	157,44	214,12
06	Montar forma escada	386,78	466,00	633,76
07	Concretar pilar	180,94	218,00	296,48
08	Armar viga	111,84	134,75	183,26
09	Elétrica	1.398,55	1.685,00	2.291,60
10	Armar positivo laje	109,98	132,50	180,20
11	Hidráulica	1.402,70	1.690,00	2.298,40
12	Armar escada	87,15	105,00	142,80
13	Armar laje (treliça/espaçadores)	473,10	570,00	775,20
14	Montar forma sacadas	259,21	312,30	424,73
15	Armar negativo laje	484,06	583,20	793,15
16	Concretar laje / viga	378,48	456,00	620,16

**Fonte: Autor (2016)**

No Quadro 13 é apresentado o momento e o local em que as entidades irão ser incluídas no quarto cenário pela primeira vez.

**Quadro 13 - Momento que a entidade entra no cenário 4**

Entidade	Local	Primeira Vez
Forma_Pilar	Loc_Estoque_Carpintaria	0 hr
Armação_Pilar	Loc_Estoque_Armadores	4 hr
Forma_Viga	Loc_Estoque_Carpintaria	8 hr
Escora	Loc_Estoque_Carpintaria	18 hr
Assoalho	Loc_Estoque_Carpintaria	22 hr
Forma_Escada	Loc_Estoque_Carpintaria	0 hr
Concreto_Pilar	Loc_Estoque_Concreto	25 hr
Armação_Viga	Loc_Estoque_Armadores	15 hr
Elétrica	Loc_Estoque_Elétrica	25 hr
Armação_Positivo_Laje	Loc_Estoque_Armadores	25 hr
Hidráulica	Loc_Estoque_Hidráulica	25 hr
Armação_Escada	Loc_Estoque_Armadores	6 hr
Armação_Treliça_Espaçadores_La	Loc_Estoque_Armadores	28 hr
Forma_Sacada	Loc_Estoque_Carpintaria	25 hr
Armação_Negativo_Laje	Loc_Estoque_Armadores	37 hr
Concreto_Laje_Viga	Loc_Estoque_Concreto	51 hr

**Fonte: Autor (2016)**

### 3.4.14 Modelagem do quinto cenário

O quinto cenário de simulação atuou no sentido de simplificar por meio da redução do número de etapas. O processo de armação positiva, espaçadores e armação negativa da laje resultaram na junção das três atividades em uma única, assim como escoramento, assoalho e sacada, que passaram a ocorrer de maneira contínua. Na Tabela 7 são apresentadas as variações de tempo para modelagem do cenário 5.

**Tabela 7 - Variações de tempo do cenário 5 de simulação**

	Atividades	Tempos (minutos)		
		mín	padrão	máx
<b>01</b>	Forma pilar	373,08	449,50	611,32
<b>02</b>	Armação pilar	178,12	214,60	291,86
<b>03</b>	Forma viga	473,46	570,43	775,78
<b>04/05/14</b>	Escora / Assoalho/Forma sacada	582,66	702,00	954,72
<b>06</b>	Forma escada	386,37	465,50	633,08
<b>07</b>	Concretar pilar	180,94	218,00	296,48
<b>08</b>	Armação viga	111,84	134,75	183,26
<b>10/13/15</b>	Armação laje	1.004,30	1.210,00	1.645,60
<b>09</b>	Elétrica	559,42	674,00	916,64
<b>11</b>	Hidráulica	740,31	891,94	1.213,04
<b>12</b>	Armação escada	87,15	105,00	142,80
<b>16</b>	Concretar laje / viga	378,48	456,00	620,16

**Fonte: Autor (2016)**

No Quadro 14 é apresentado o momento e o local em que as entidades irão ingressar no quinto cenário pela primeira vez.

**Quadro 14 - Momento que a entidade entra no cenário 5**

Entidade	Local	Primeira Vez
Forma_Pilar	Loc_Estoque_Carpintaria	0 hr
Armação_Pilar	Loc_Estoque_Armadores	3 hr
Forma_Viga	Loc_Estoque_Carpintaria	7 hr
Escora_Asoalho forma sacada	Loc_Estoque_Carpintaria	17 hr
Forma_Escada	Loc_Estoque_Carpintaria	7 hr
Concreto_Pilar	Loc_Estoque_Concreto	25 hr
Armação_Viga	Loc_Estoque_Armadores	15 hr
Elétrica	Loc_Estoque_Elétrica	17 hr
Armação_Laje	Loc_Estoque_Armadores	17 hr
Hidráulica	Loc_Estoque_Hidráulica	17 hr
Armação_Escada	Loc_Estoque_Armadores	13 hr
Concreto_Laje_Viga	Loc_Estoque_Concreto	37 hr

**Fonte: Autor (2016)**

### 3.5 Análise dos dados

As análises dos dados obtidos ocorreram por meio da representação do MFV e da LB e tiveram caráter qualitativo, no qual se enfatizou a interpretação sobre o fenômeno estudado, possibilitando a identificação dos princípios da Construção Enxuta.

Posteriormente, para avaliação parcial e acompanhamento da evolução, os modelos de simulação foram analisados por meio da comparação entre o valor médio do tempo de ciclo, movimentação, espera e conversão do primeiro cenário com relação aos próximos, valores estes retornados por meio do software.

Para verificação do atendimento ao objetivo proposto, foi comparado o *Lead Time* de produção à necessidade de produção da estrutura do pavimento-tipo em sete dias.

## 4 RESULTADOS OBTIDOS

Serão apresentados neste capítulo os resultados obtidos por meio da análise da LB “planejada”, dados cronometrados no canteiro de obras referente à estrutura do pavimento tipo, MFV “macro” que apresenta o pavimento-tipo e posiciona a atividade de estrutura que é o principal objeto de estudo, o MFV “atual” da estrutura do pavimento-tipo, as oportunidades identificadas de aplicação dos princípios da Construção Enxuta no canteiro e os resultados dos diversos cenários de simulação que avaliam as oportunidades de aplicação da Construção Enxuta identificadas que reduzem o *Lead Time* de produção.

### 4.1 Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS)

- Análise dos resultados: A seguir serão apresentados os artigos selecionados que representam os principais resultados desta revisão.

1) Simulation guided value stream mapping and lean improvement: A case study of a tubular machining facility (XIA e SUN, 2013). Artigo publicado pelo Journal of Industrial Engineering and Management em que os autores descrevem a aplicação do mapeamento de fluxo de valor tradicional associado à simulação de eventos discretos dedicados a um processo de manufatura de tubulação. O modelo apresentado pelos autores abrange o processo de fabricação tubular, e os cenários de simulação distintos são propostos para descobrir o estado futuro ideal do processo. Seus resultados de simulação correspondem aos dados de produção real.

2) Simulation of construction processes: traditional practices versus lean principles (AL-SUDAIRI; DIEKMANN; SONGER e BROWN, 1999). Artigo publicado durante o IGLC-7, realizado em Berkeley (USA), em que os autores deste estudo implementam os cinco princípios da Produção Enxuta para um processo de armação tradicional utilizando simulação computacional. Os princípios simulados melhorou o desempenho do projeto e do processo de armação e se mostrou eficiente quando aplicados simultaneamente.

3) Simulation as a tool for production system design in construction (ALVES; TOMMELEIN e GLENN BALLARD, 2006). Artigo publicado durante o IGLC-14, realizado em Santiago (Chile), em que os autores utilizam um modelo de simulação desenvolvido para representar cinco cenários diferentes para o planejamento, fabricação, transporte e instalação de dutos de chapa, a fim de ilustrar como escolhas do projeto do sistema de produção podem afetar o tempo necessário para entregar um projeto. Os dados usados para desenvolver o modelo foram obtidos a partir de estudos de tempo realizados pelos autores, bem como a partir de entrevistas.

4) The role of conceptual modeling in lean construction simulation (POSHDAR; GONZÁLEZ; O'SULLIVAN; HAHBAZPOUR; WALKER e GOLZARPOOR, 2016). Artigo publicado durante o IGLC-24, realizado em Boston (USA), em que os autores investigam as implicações da modelagem conceitual na pesquisa de simulação de Construção Enxuta. Demonstraram ainda que a realização de um estágio de modelagem conceitual pode proporcionar um bom nível de transparência sobre os elementos que são necessários para abstrair a realidade do projeto.

5) Simulating a construction supply chain - preliminary case study of precast elements (FONTANINI; PICCHI; LOUREIRO; JÚNIOR e FOLCH, 2008). Este artigo publicado durante o IGLC-16, realizado em Manchester (UK), apresentou um estudo de caso preliminar de simulação na cadeia produtiva da construção, adotando uma empresa com foco em elementos pré-fabricados. Os dados de análise foram fornecidos por um mapeamento de fluxo de valor macro, e dependem de dois agentes do sistema: o fabricante de barras de aço e os projetistas estruturais. A coleta das informações ocorreu por meio do sistema de informação da empresa e de entrevistas com representantes. Os dados foram compilados em uma primeira simulação, que representou o estado atual, utilizando-se o software iThink, e gerando a saída de parâmetros selecionados para análise. Em estudo futuros, será sugerida uma segunda simulação utilizando ferramentas Lean.

6) Using discrete-event simulation to support decision-makers in production system design and operations (SCHRAMM; SILVEIRA; PAEZ; MESA; FORMOSO e

ECHEVERRY, 2008). Neste artigo publicado durante o IGLC-16, realizado em Manchester (UK), os autores descrevem em um estudo de caso que, com base no modelo de simulação, uma série de recomendações foram feitas com o intuito de reduzir o tempo total de construção, permitindo a avaliação de diferentes cenários e o estabelecimento de uma melhor sequência de construção, a fim de reduzir atividades sem valor agregado. Demonstrou ainda, em um segundo estudo, o desenvolvimento de um novo projeto do sistema de produção, a fim de mudar a produção padronizada para produção personalizada de habitações, usando uma estratégia de customização em massa.

7) Discrete-event simulation of lean construction processes (TOMMELEIN, 1997). Neste artigo publicado durante o IGLC-5, realizado em Gold Coast (Austrália), o autor descreve o uso de software de computador para simulação de eventos discretos para representar diferentes características do processo de construção relevantes para a Produção Enxuta. Os exemplos apresentados mostram que tipos de informações em nível de sistema podem ser gerados utilizando a simulação de eventos discretos e como esta informação pode ser usada para redesenhar processos de construção, a fim de torná-los mais enxutos.

8) Using the line of balance for production system design (KEMMER; HEINECK e ALVES, 2008). Neste artigo publicado durante o IGLC-16, realizado em Manchester (UK), os autores utilizaram a LB na fase inicial de planejamento de um projeto residencial. Com base nas informações fornecidas por diferentes linhas de balanço, foram representados diferentes cenários. O artigo apresenta pontos de vista sobre os diferentes cenários e respectivos indicadores, e discute as implicações do cenário escolhido do grupo para o projeto como um todo.

Os artigos citados anteriormente passaram pelos filtros de seleção, e foram documentados e armazenados no software Mendeley<sup>2</sup>.

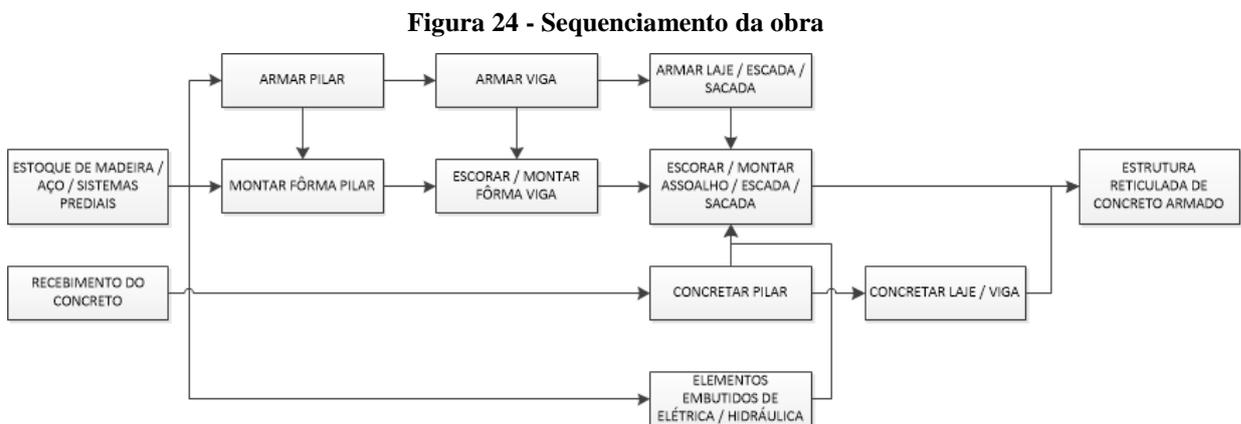
---

<sup>2</sup> Mendeley é um software de utilização livre e auxilia no gerenciamento de referências. É possível fazer o download no endereço eletrônico: < <https://www.mendeley.com/>>

## 4.2 Caracterização tecnológica

A sequência de atividades vigentes para a execução de um pavimento tipo da obra estudada está apresentada na Figura 24. A execução do ciclo estudado ocorreu entre os dias 05 e 16/05/2016. Para tal sequenciamento, foram contemplados os serviços de formas, armação, passagens e embutidos de sistemas prediais, e concretagem dos pilares, vigas e lajes.

Com o intuito de facilitar a compreensão deste sequenciamento, foram utilizadas as mesmas atividades registradas durante a coleta de dados.



Fonte: Autor (2016)

A locação da obra foi efetuada por empresa contratada, que realizou a conferência dos eixos transferidos para os diversos pavimentos. Foi executada por meio de fios de prumo.

Na sequência, pela equipe de carpinteiros, foram locados os gastalhos de pilar a partir dos eixos posicionados anteriormente, com a função de servir de localização de painéis de formas de pilar e travar os mesmos. Os gastalhos eram compostos por madeira serrada.

**Figura 25 - Representação dos gastalhos executados na obra visitada**



Fonte: Autor (2016)

Na próxima fase iniciou-se a colocação e travamento dos três painéis dos pilares conforme representado na Figura 26. O prumo do pilar foi realizado após a montagem completa das formas.

**Figura 26 - Forma do pilar com as três faces colocadas**



**Fonte: Autor (2016)**

As barras de aço para execução da armação dos pilares eram entregues no canteiro previamente cortadas e dobradas. A pré-montagem das armaduras era realizada no pavimento térreo, obedecendo ao projeto estrutural. Posteriormente, as armaduras eram transportadas para o pavimento em execução e posicionadas conforme o projeto.

**Figura 27 - Pré-montagem das armaduras realizadas no pavimento térreo**



**Fonte: Autor (2016)**

Após o posicionamento e conferência das armaduras, iniciou-se a montagem do quarto painel. Na Figura 28 pode-se observar a conclusão de uma armação para a locação da quarta face. Com o fechamento do pilar, realizou-se a conferência do prumo para a realização de ajustes, caso necessário. A obra utilizou um jogo de formas compatível com a execução dos pilares de um pavimento.

**Figura 28 - Fôrma do pilar com as quatro faces colocadas**



**Fonte: Autor (2016)**

A desforma do fundo de viga aconteceu a cada três pavimentos. A forma mais antiga era montada na viga do próximo pavimento a ser executado. Para atender a essa necessidade a obra utilizou três conjuntos de forma para o fundo de viga.

As desformas do assoalho e parcela lateral da viga ocorreram a cada pavimento concluído, permanecendo apenas no assoalho uma faixa da fôrma, condição esta necessária para a permanência das escoras pontuais, conforme apresentado na Figura 29.

**Figura 29 - Desforma de viga e pilar**



**Fonte: Autor (2016)**

Na sequência, posicionaram-se as escoras que fizeram a sustentação para o molde das vigas. Os painéis de fundo e laterais de viga foram colocados e se apoiaram nos escoramentos e nos painéis dos pilares. A Figura 30 representa as escoras de viga.

**Figura 30 - Escoras de sustentação para o molde das vigas**



**Fonte: Autor (2016)**

Para a montagem do escoramento e do assoalho da laje foram estabelecidas as posições das escoras metálicas, sobre as quais foram posicionadas os vigamentos superiores e inferiores. Após o término de determinada área, iniciou-se o assoalhamento da laje com chapas de compensado.

**Figura 31 - Montagem do escoramento de assoalho**



**Fonte: Autor (2016)**

Para montagem da forma da escada, inicialmente posicionaram-se as escoras que apoiaram o patamar e, na sequência, alocaram-se os painéis do assoalho, que foram alinhados e nivelados. Desta mesma forma e em seguida, foi executado o trecho inclinado. Posteriormente, foram colocadas as armaduras e posicionados os espelhos.

**Figura 32 - Forma e armação da escada**



**Fonte: Autor (2016)**

A concretagem dos pilares aconteceu após o posicionamento das chapas de compensado no assoalho. A empresa utilizou-se do concreto pré-misturado entregue na obra por caminhões betoneira. Para alcançar o pavimento em execução, o concreto foi bombeado por meio de mangueiras adequadas.

**Figura 33 - Mangueira utilizada para bombeamento do concreto**



**Fonte: Autor (2016)**

A pré-montagem das armaduras das vigas, o transporte e o posicionamento das mesmas foram correspondentes à sequência das armações dos pilares.

A armação da laje foi executada em três etapas sequentes: a armação negativa, o posicionamento de espaçadores e, por fim, a armação positiva. As armações foram montadas no pavimento em execução e conforme o projeto.

Concomitantemente à execução da armação da laje, foram executadas as marcações de passagens hidrossanitárias, eletrodutos e caixas elétricas conforme seus respectivos projetos. Posteriormente às marcações, foram executadas as passagens hidrossanitárias no assoalho, distribuídos os eletrodutos e alocadas as caixas elétricas.

**Figura 34 - Representação da armação da laje, passagens e embutidos no concreto**



**Fonte: Autor (2016)**

A estrutura foi finalizada com a concretagem das vigas e laje. Para execução deste serviço foram realocadas as equipes de carpinteiros e armadores. O transporte do concreto para o piso em execução ocorreu de forma semelhante ao descrito durante a concretagem do pilar. O lançamento do concreto sobre as vigas, lajes e escadas foi realizado diretamente sobre a peça.

**Figura 35 - Concretagem da laje**

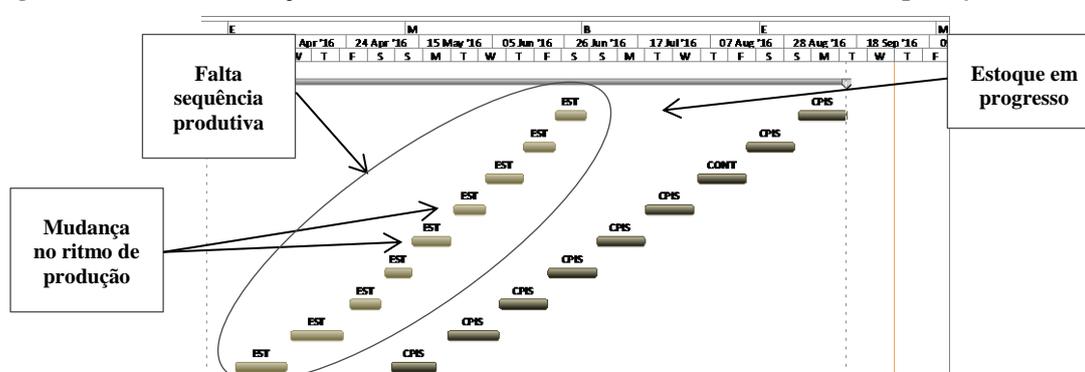


**Fonte: Autor (2016)**

### 4.3 Linha de balanço (LB)

A LB elaborada representa um recorte das tarefas que foram estudadas, sendo a estrutura o objeto principal deste estudo e o contrapiso o cliente interno que recebe o serviço de estrutura para execução da próxima fase. A análise da linha de balanço buscou identificar a ausência dos princípios da Construção Enxuta na fase de planejamento, e para sua realização foram utilizados conceitos de desperdício. Por meio desta análise foi possível observar que melhorias no ritmo de produção da estrutura dos pavimentos-tipo poderiam ser propostas à empresa. A LB elaborada está representada na Figura 36.

Figura 36 - Linha de balanço das atividades estudadas considerando os dados de planejamento da obra



Fonte: Autor (2016)

As mudanças de ritmo de produção identificadas na LB dificultam o controle de produção por falta de padrão e a definição de equipe necessária para execução da atividade. O segundo ponto avaliado, o estoque em progresso, significa um investimento com antecedência ou um investimento sem a necessidade no momento. E, por fim, a falta de sequência produtiva não permite a sincronização dos serviços, aumenta os tempos de espera e necessita de estoques maiores para absorverem as variações de produção ocasionadas pela oportunidade identificada.

### 4.4 Dados coletados

As informações coletadas foram agrupadas por atividades, somatório de tempo necessário para a execução das mesmas e o número de funcionários envolvidos. A síntese dos dados coletados está apresentada na Tabela 8.

**Tabela 8 - Síntese dos dados coletados no canteiro de obra**

Atividade	Data início	Hora início	Ativ. de conversão		Transporte		Espera		Inspeção		Total (min)
			Tempo (min)	n° func.	Tempo (min)	n° func.	Tempo (min)	n° func.	Tempo (min)	n° func.	
Montar forma pilar	05/05/2016	07:00:00	522	10	360	5	108	10	0	0	990
Armar pilar	05/05/2016	07:00:00	370	6	430	5	770	6	0	0	1570
Montar forma viga	07/05/2016	07:15:00	1.178	6	398	4	1105	6	218	1	2899
Escorar	09/05/2016	07:10:00	847	3	420	4	1813	3	0	0	3080
Montar assoalho	09/05/2016	07:15:00	966	4	298	5	699	4	0	0	1963
Montar forma escada	09/05/2016	07:15:00	665	1	2	0	1510	1	0	0	2177
Concretar pilar	10/05/2016	07:15:00	218	4	2	0	57	4	0	0	277
Armar viga	10/05/2016	13:00:00	385	4	325	4	405	4	0	0	1115
Elétrica	10/05/2016	07:15:00	1.685	5	75	2	460	5	325	1	2545
Armar positivo laje	11/05/2016	13:00:00	265	5	301	3	5	5	0	0	571
Hidráulica	11/05/2016	07:00:00	1.690	2	160	2	830	2	0	0	2680
Armar escada	12/05/2016	08:30:00	210	1	2	0	0	1	0	0	212
Armar laje (treliça/espaçadores)	12/05/2016	07:00:00	570	9	375	2	60	9	0	0	1005
Montar forma sacadas	12/05/2016	07:10:00	1.041	4	87	2	59	4	0	0	1187
Armar negativo laje	13/05/2016	07:00:00	729	8	210	2	771	8	0	0	1710
Concretar laje / viga	16/05/2016	08:00:00	456	10	2	0	104	10	135	1	697
Σ			11.797		3.447		8.756		678		24.678

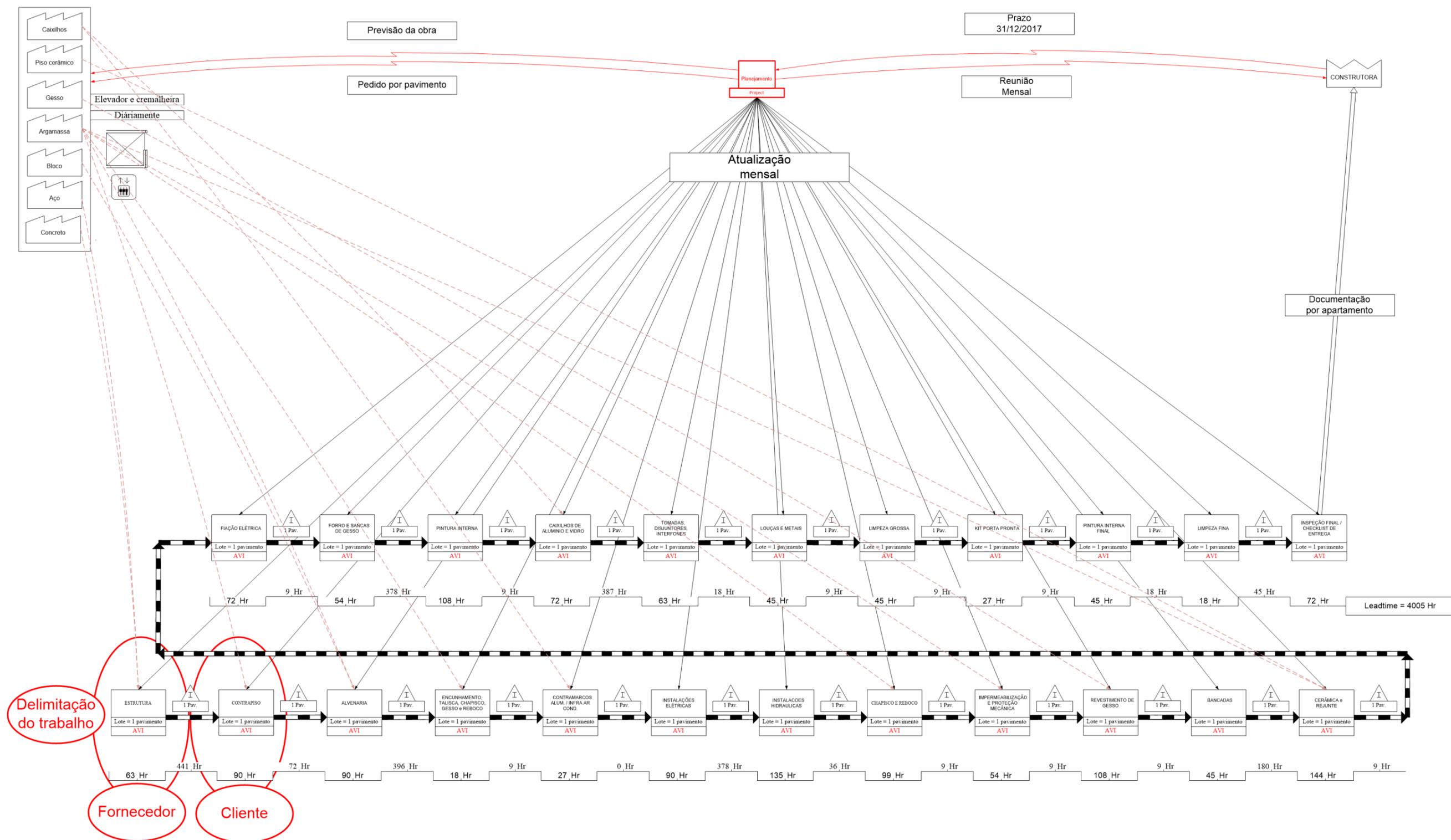
Fonte: Autor (2016)

#### 4.5 MFV “planejado” do pavimento-tipo

O MFV “planejado” que é apresentado pela Figura 37 foi elaborado para representar o pavimento-tipo e delimitar o trabalho. O principal ponto que deve ser destacado avaliando este MFV é o estoque intermediário entre a tarefa de estrutura e contrapiso, considerado seu cliente interno.

Após a adequada análise do planejamento constatou-se que deveriam ter sido reservados 28 dias entre as atividades de execuções de estrutura e contrapiso para a garantia de que o concreto atingisse a resistência ideal e não ocorresse a retração do mesmo. Porém, observou-se, no sétimo pavimento, que este intervalo foi de 49 dias.

Figura 37 - MFV “planejado” do pavimento-tipo



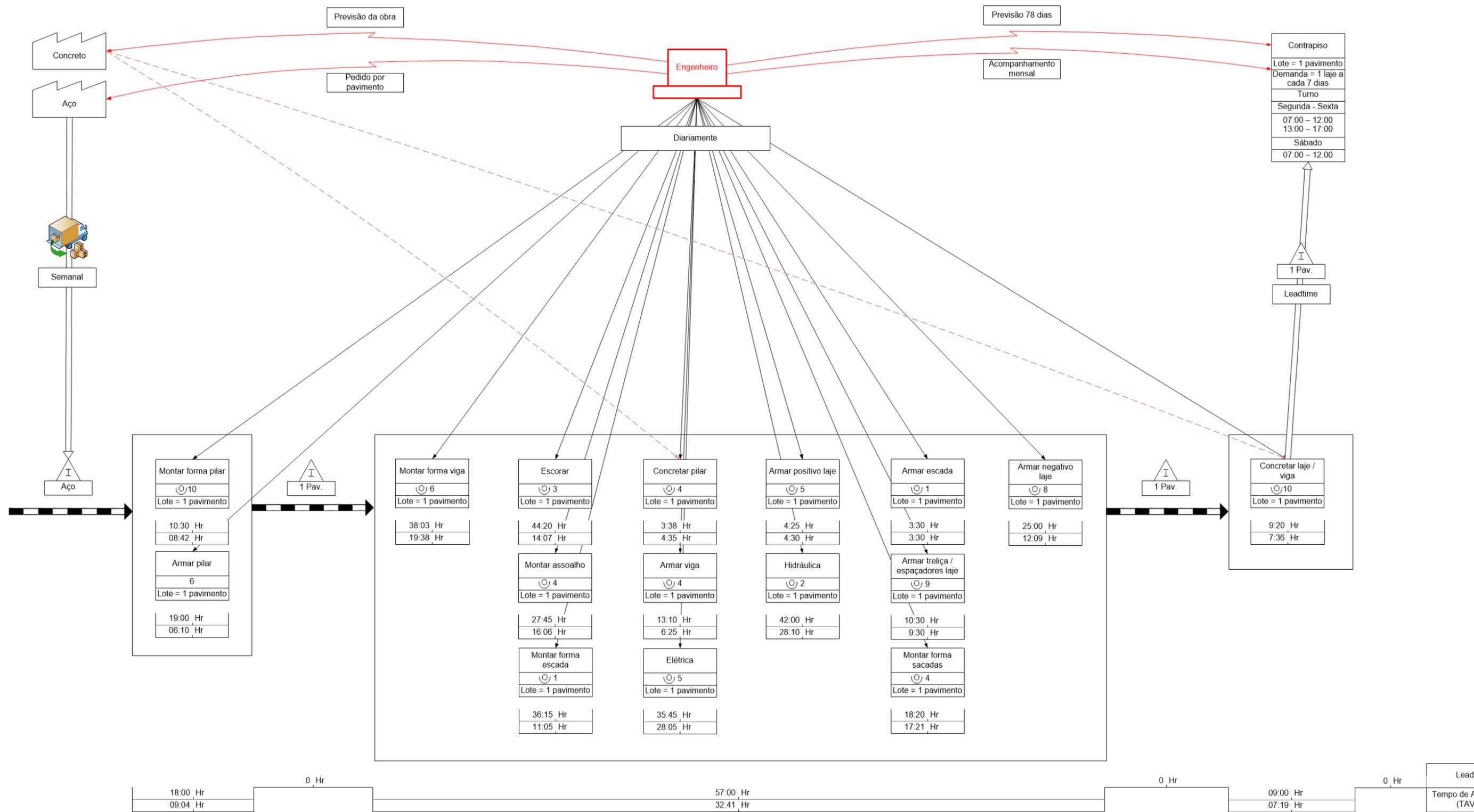
Fonte: Autor (2016)

#### **4.6 MFV “atual” da tarefa estrutura do pavimento-tipo**

Com o propósito de melhorar a visualização dos dados coletados, os mesmos foram representados no MFV, que posiciona a sequência de atividades e permite enxergar os diversos processos, o fluxo de materiais e de informações. A Figura 38 representa o MFV elaborado com os dados do quarto pavimento da obra em estudo.

O MFV possibilitou a identificação das atividades que não agregam valor, aplicação dos princípios da Construção Enxuta e outros desperdícios.

Figura 38 - Mapa de fluxo de valor da estrutura do pavimento-tipo



Fonte: Elaborado pelo autor em conjunto com pesquisadores do Laboratório de Modelagem e Simulação com uso de Informática – LMSI/UFSCar.

## 4.7 Oportunidades de aplicação da Lean Construction

Para que haja uma correlação adequada entre as proposições elaboradas e os dados obtidos, é necessário que os onze princípios da Construção Enxuta sejam devidamente respeitados, conforme enumerado e ilustrado a seguir:

**Primeiro princípio:** Reduzir a parcela das atividades que não agregam valor.

Pôde-se observar no período em que o pesquisador esteve no canteiro de obras que, durante a execução da montagem da fôrma do assoalho em cada pavimento, as peças que a compõem não possuíam uma posição definida para montagem. Desta maneira, tornavam-se necessários o recorte e a emenda das chapas de compensado em cada pavimento, caracterizando, assim, uma atividade que não agrega valor, e conseqüentemente, causando a redução da vida útil da fôrma. Para que haja a correlação do primeiro princípio com a respectiva proposição, sugere-se que seja feito o projeto da forma do assoalho. Desta forma, a mesma será utilizada sempre na mesma posição e não haverá necessidade da reforma da mesma.

**Figura 39 – Montagem do assoalho da obra visitada**



**Fonte: Autor (2016)**

**Segundo princípio:** Aumentar o valor do produto considerando as necessidades dos clientes.

Este princípio se caracteriza pelo valor gerado por meio do cumprimento dos requisitos do cliente, neste caso, representado pela próxima atividade, que é a execução do

contrapiso. Pode-se observar grande diferença de níveis de altura durante a concretagem, quando este foi comparado à laje. Buscando-se atender o princípio, propõe-se que, durante a concretagem da laje, seja alcançado o nível zero da laje por meio de adoção de novas tecnologias de construção.

**Figura 40 - Laje da obra estudada**



**Fonte: Autor (2016)**

**Terceiro princípio:** Reduzir a variabilidade.

Na obra em estudo, não houve uniformidade de processamento durante a execução da estrutura. Observou-se uma grande variação de produtividade nas equipes. Por exemplo, durante a montagem das formas das vigas, houve momentos de grande oscilação no tempo de execução. Para que haja a uniformidade é necessário que as frentes de trabalho executem as atividades de maneira padronizada, atuem simultaneamente e desempenhem as atividades de maneira a corrigir oportunamente eventuais problemas que ocorram durante a execução das mesmas e aplicação de dispositivos a prova de erro (poka-yoke).

**Quarto princípio:** Reduzir o tempo de ciclo.

A redução do tempo de ciclo depende principalmente da redução das atividades de fluxo (transporte, espera e inspeção). Observou-se que as atividades de desforma, transporte e montagem da forma, bem como as atividades de montagem, transporte e posicionamento das armações eram totalmente finalizadas, sequenciais e, então, transferidas para o pavimento seguinte. Desta maneira, a redução das atividades de fluxo pode ser

alcançada por meio da redução do tamanho do lote processado e alteração da data de início. Desta forma, impõe-se a necessidade da conclusão de uma frente de trabalho para que a próxima seja iniciada.

**Figura 41 – Estoque de toda armação do pavimento em execução**

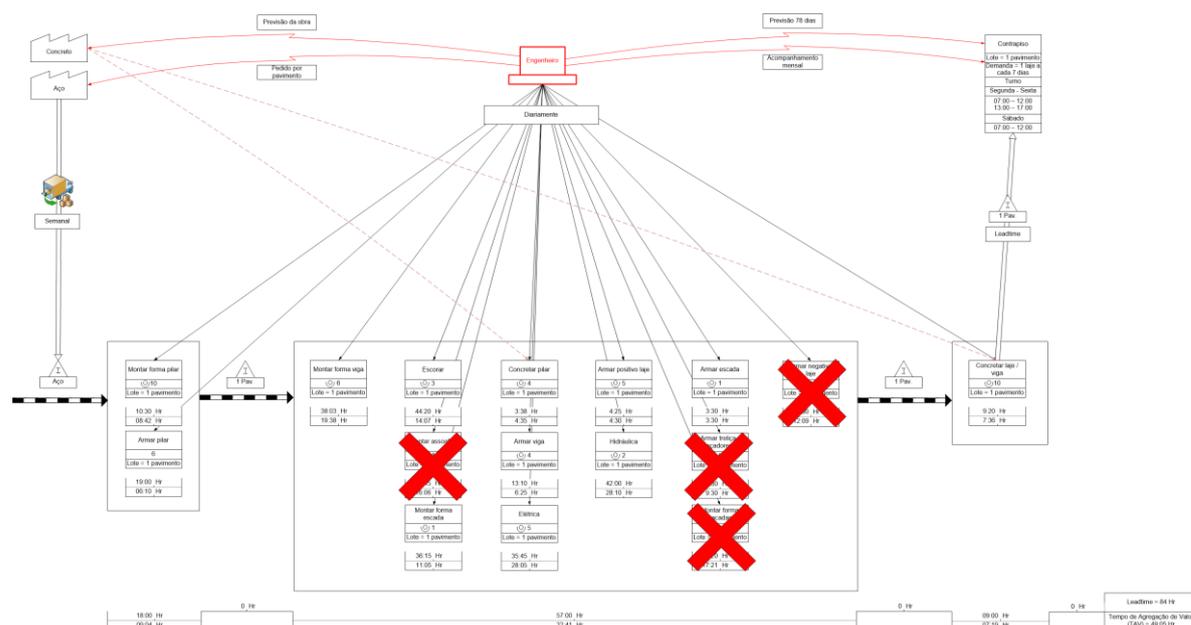


**Fonte: Autor (2016)**

**Quinto princípio:** Simplificar por meio da redução do número de etapas.

A simplificação pode ser realizada por meio da consolidação de partes ou passos. No MFV da Figura 42 pode-se observar que entre cada atividade existe um estoque de produto em processamento, que separa o processo de armação positiva, espaçadores e armação negativa, e sua eliminação resultaria na conversão das três atividades em uma única, que ocorreria de maneira contínua. Escora, assoalho e laje sacada também.

**Figura 42 – MFV com proposta de eliminação de estoque em processamento**



Fonte: Autor (2016)

### Sexto princípio: Aumentar a flexibilidade de saída

Na busca por atender às exigências de diferentes clientes e às suas necessidades individuais, buscou-se identificar diversas possibilidades de configuração do produto. A estrutura reticulada de concreto armado pode ser projetada para tal finalidade, considerando-se espaços livres que permitam diferentes configurações, com aumento da carga sobre a qual a estrutura está exposta. Quem decidirá sobre a divisão e o tamanho dos espaços será o cliente final.

### Sétimo princípio: Aumentar a transparência do processo.

A transparência do processo permite a identificação de eventuais problemas no processo para que os mesmos possam ser oportunamente corrigidos. Conforme ilustrado na Figura 43 a disposição física inadequada dos materiais inviabiliza a percepção desses problemas. O “5S” é uma ferramenta eficaz no que diz respeito à transparência de processo.

**Figura 43 - Oportunidade de aplicação de "5S"**



**Fonte: Autor (2016)**

**Oitavo princípio:** Focar o controle no processo completo.

Para atendimento deste item sugere-se a implantação do sistema de planejamento Last Planner como ferramenta de acompanhamento de curto, médio e longo prazos, a fim de garantir os prazos contratuais da obra.

Os seguintes e últimos princípios não puderam ser observados na pesquisa durante o levantamento de campo, apesar de suas inquestionáveis relevâncias.

**Nono princípio:** Introduzir melhoria contínua no processo.

Acaso ocorra alguma intercorrência no decorrer da obra, uma equipe multidisciplinar deve ser acionada para que, no ato do acontecimento, analise a causa raiz do problema e promova a padronização da atividade, para que não haja reincidência.

**Décimo princípio:** Manter o equilíbrio entre melhorias nos fluxos e nas conversões.

Faz-se necessário um equilíbrio entre a introdução de novas tecnologias construtivas para melhoria das atividades de conversão e o aprimoramento das atividades de fluxo (espera, transporte e inspeção), que se mostra mais atraente pela menor necessidade de

investimentos, apesar de apresentar um maior tempo de implantação quando comparado às melhorias de conversão.

**Décimo primeiro princípio: Benchmarking**

Com base neste princípio, sugere-se a identificação das melhores práticas no mercado e de um referencial para inclusão de metas e ações necessárias para alcançá-las.

**4.7.1 MFV com as oportunidades de aplicação dos princípios da Construção Enxuta**

Após a identificação dos princípios da Construção Enxuta expostos no item 5.5 deste trabalho, foram consolidados os resultados no MFV apresentado na Figura 44.

Conforme apresentado na figura mencionada, as áreas destacadas referem-se aos princípios da construção enxuta, bem como as descrições de suas aplicabilidades no momento oportuno.

Na mesma figura, as áreas circuladas serão agrupadas em atividades únicas de acordo com suas respectivas numerações.



## 4.8 Simulação

Para a calibração do modelo computacional foram inseridos os dados coletados no canteiro de obras e os resultados obtidos corresponderam ao que foi observado. O quadro 15 sintetiza os cenários simulados e define suas estratégias.

**Quadro 15 - Cenários simulados e suas respectivas estratégias**

Cenários	Característica
1	Foram inseridos os tempos de produção coletados no canteiro de obras no modelo de simulação, e estes foram associados a uma faixa de variações de produtividade extraída da tese de Souza (2001).
2	Este cenário foi elaborado a partir do cenário anterior e caracterizou-se pela redução em 90% das atividades de retrabalho realizadas durante a montagem das formas do assoalho, compostas pelo recorte e emenda das chapas de compensado.
3	Somou-se ao cenário anterior a padronização das atividades que compõem a execução da estrutura, resultando na diminuição da faixa de variação de produtividade em 50%.
4	A partir do cenário anteriormente descrito, foram associados a redução do tamanho dos lotes processados e a alteração das datas de início das atividades.
5	Este cenário resultou da conjunção dos cenários anteriores e teve por estratégia a conversão de atividades em comum em uma única atividade.

**Fonte: Autor (2016)**

### 4.8.1 Resultados do primeiro cenário

O modelo, de acordo com o conceito da ferramenta, deve representar o desempenho do sistema de produção. Os mesmos processos do MFV apresentado na Figura 24 foram inseridos no software e alimentados pelos seus respectivos tempos de produção conforme coletado no canteiro de obras. Com base nesta representação, foi inserida uma faixa de variações de produtividade, considerando a tese de Souza (2001), para que o objeto de análise se aproxime ao máximo da realidade. Além destes dados, o modelo também contou com a inserção dos tempos de espera, transporte e inspeção. Destaca-se, neste contexto, que os tempos de inspeção inseridos no modelo computacional estão somados aos tempos de espera.

A Tabela 9 apresenta os resultados referentes ao primeiro cenário de simulação, que tem uma importância ímpar por ser o valor de referência para comparação como os próximos cenários.

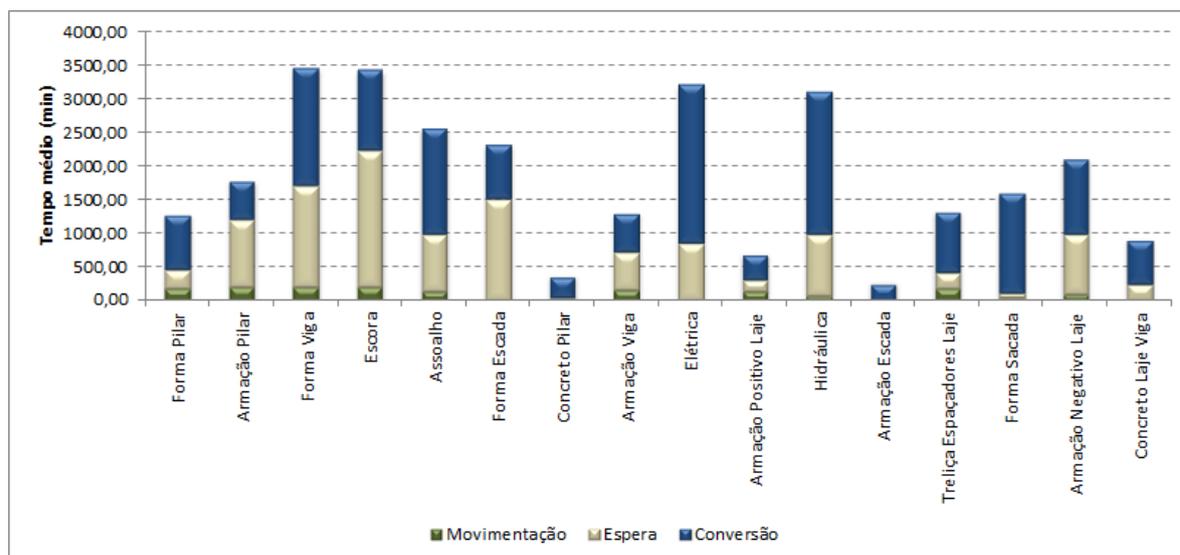
**Tabela 9 - Resultados do cenário 1**

<b>N</b>	<b>Cenário 1</b>	<b>TC</b>	<b>Movimentação</b>	<b>Espera</b>	<b>Conversão</b>
<b>01</b>	Forma Pilar	1276,71	180,00	288,00	808,71
<b>02</b>	Armação Pilar	1782,96	215,00	985,00	582,96
<b>03</b>	Forma Viga	3455,05	199,00	1522,00	1734,05
<b>04</b>	Escora	3429,26	210,00	2023,00	1196,26
<b>05</b>	Assoalho	2565,14	149,00	848,00	1568,14
<b>06</b>	Forma Escada	2320,15	1,00	1511,00	808,15
<b>07</b>	Concreto Pilar	355,79	1,00	58,00	296,79
<b>08</b>	Armação Viga	1298,95	162,50	567,50	568,95
<b>09</b>	Elétrica	3212,10	37,50	822,50	2352,10
<b>10</b>	Armação Positivo Laje	682,05	150,50	155,50	376,05
<b>11</b>	Hidráulica	3111,70	80,00	910,00	2121,70
<b>12</b>	Armação Escada	261,22	20,78	0,31	240,13
<b>13</b>	Treliça Espaçadores Laje	1315,36	187,50	232,36	895,50
<b>14</b>	Forma Sacada	1600,76	49,44	79,80	1471,52
<b>15</b>	Armação Negativo Laje	2110,29	105,00	876,00	1129,29
<b>16</b>	Concreto Laje Viga	908,25	1,00	240,00	667,25
	<b>Valor médio</b>	<b>1855,36</b>	<b>109,33</b>	<b>694,94</b>	<b>1051,10</b>

**Fonte: Autor (2016)**

A Figura 45 ilustra os resultados que o software retornou referentes ao primeiro cenário de simulação, e os valores utilizados para elaboração do gráfico estão apresentados na Tabela 9.

Figura 45 - Resultado do cenário 1 de simulação



Fonte: Autor (2016)

#### 4.8.2 Resultados do segundo cenário

O segundo cenário de simulação atuou no sentido de reduzir a parcela das atividades que não agregam valor. Deste modo, as atividades de retrabalho ou reforma de assoalho foram eliminadas considerando apenas dez por cento de possíveis reparos inerentes da atividade, e não mais como parte da atividade.

A Tabela 10 apresenta os resultados referentes ao segundo cenário de simulação.

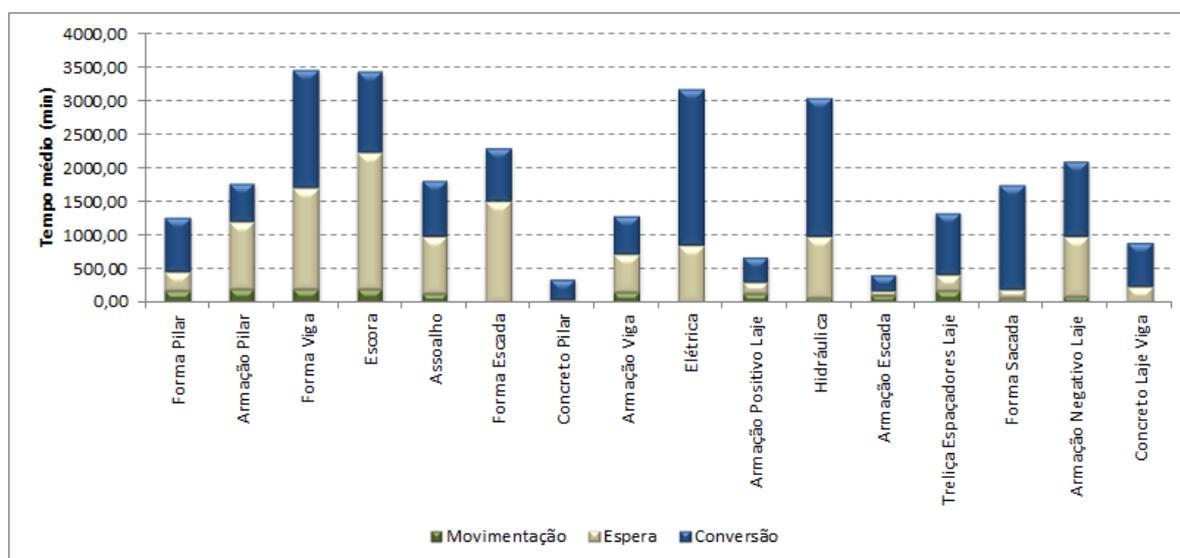
Tabela 10 - Resultados do cenário 2

N	Cenário 2	TC	Movimentação	Espera	Conversão
01	Forma Pilar	1274,81	180,00	288,00	806,81
02	Armação Pilar	1775,59	215,00	985,00	575,59
03	Forma Viga	3455,49	199,00	1522,00	1734,49
04	Escora	3436,12	210,00	2023,00	1203,12
05	Assoalho	1816,25	149,00	848,00	819,25
06	Forma Escada	2291,71	1,00	1511,00	779,71
07	Concreto Pilar	353,04	1,00	58,00	294,04
08	Armação Viga	1302,31	162,50	567,50	572,31
09	Elétrica	3173,64	37,50	822,50	2313,64
10	Armação Positivo Laje	689,53	150,50	155,50	383,53
11	Hidráulica	3045,83	80,00	910,00	2055,83
12	Armação Escada	426,36	124,11	60,29	241,96
13	Treliça Espaçadores Laje	1336,69	187,50	247,50	901,69
14	Forma Sacada	1752,94	81,47	115,14	1556,33
15	Armação Negativo Laje	2111,81	105,00	876,00	1130,81
16	Concreto Laje Viga	911,98	1,00	240,00	670,98
	<b>Valor médio</b>	<b>1822,13</b>	<b>117,79</b>	<b>701,84</b>	<b>1002,50</b>

Fonte: Autor (2016)

A Figura 46 ilustra os resultados que o software retornou referentes ao segundo cenário de simulação, e os valores utilizados para elaboração do gráfico estão apresentados na Tabela 10.

Figura 46 - Resultado do cenário 2 de simulação



Fonte: Autor (2016)

Quando comparados os resultados entre o primeiro e segundo cenários, vale destacar os resultados da atividade de montagem do assoalho (Atividade 5), no qual foram eliminadas as atividades de retrabalho oriundas da reforma de assoalho, com a implantação do projeto de assoalho. O tempo de ciclo retornou uma melhora de 29 %, enquanto a atividade de conversão obteve uma melhora ainda maior, na ordem de 48%.

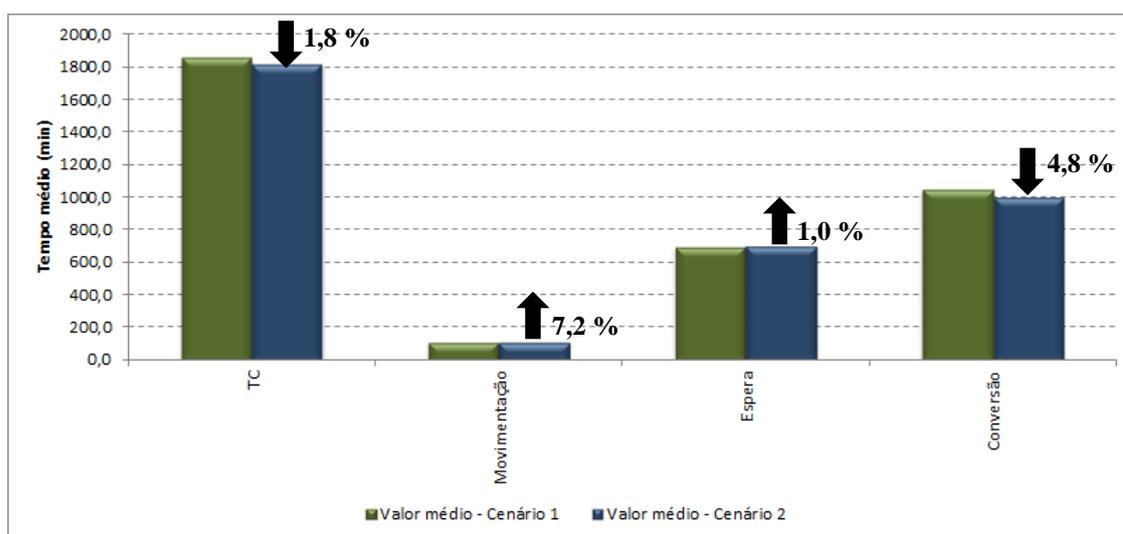
**Tabela 11 - Associação entre o valor médio dos resultados do cenário 1 e cenário 2**

	Valor médio - Cenário 1 (min.)	%	Valor médio - Cenário 2 (min.)	%	Cenário 1/ Cenário 2 (%)
<b>TC</b>	1855,4	100,0	1822,1	100,0	1,8
<b>Movimentação</b>	109,3	5,9	117,8	6,5	-7,2
<b>Espera</b>	694,9	37,5	701,8	38,5	-1,0
<b>Conversão</b>	1051,1	56,7	1002,5	55,0	4,8

Fonte: Autor (2016)

A Figura 47 ilustra a relação do valor médio dos tempos de ciclo, movimentação, espera e conversão entre os cenários 1 e 2. Quando comparados os tempos, o tempo de ciclo obteve uma redução na ordem de 2%, a movimentação aumentou em 7,2%, a espera aumentou em 1% e o tempo de conversão foi reduzido em 4,8%. Os valores utilizados para elaboração do gráfico estão apresentados na Tabela 11.

**Figura 47 - Associação entre o valor médio dos resultados do cenário 1 e cenário 2**



Fonte: Autor (2016)

### 4.8.3 Resultados do terceiro cenário

O terceiro cenário de simulação atuou para redução da variabilidade que foi efetivada por meio de um efeito de aprendizado natural, padronização do trabalho, implantação de dispositivos a prova de erro (poka-yoke) e detalhamento de sequenciamento de trabalho.

A Tabela 12 apresenta os resultados referentes ao terceiro cenário de simulação.

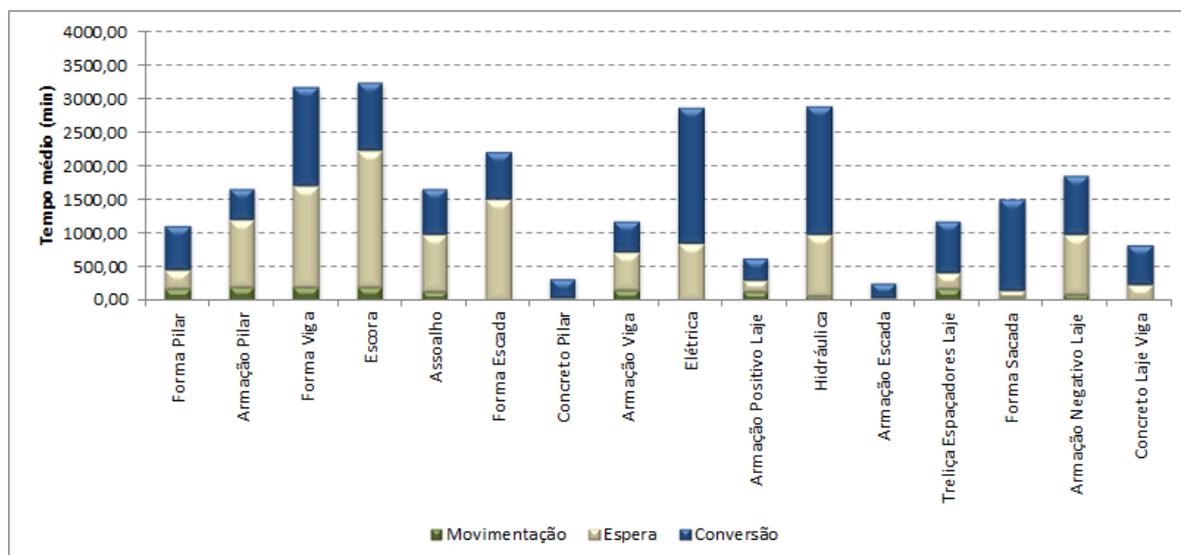
**Tabela 12 - Resultados do cenário 3**

<b>N</b>	<b>Cenário 3</b>	<b>TC</b>	<b>Movimentação</b>	<b>Espera</b>	<b>Conversão</b>
<b>01</b>	Forma Pilar	1133,12	180,00	288,00	665,12
<b>02</b>	Armação Pilar	1667,21	215,00	985,00	467,21
<b>03</b>	Forma Viga	3176,04	199,00	1522,00	1455,04
<b>04</b>	Escora	3242,88	210,00	2023,00	1009,88
<b>05</b>	Assoalho	1673,92	149,00	848,00	676,92
<b>06</b>	Forma Escada	2220,35	1,00	1511,00	708,35
<b>07</b>	Concreto Pilar	337,69	1,00	58,00	278,69
<b>08</b>	Armação Viga	1198,92	162,50	567,50	468,92
<b>09</b>	Elétrica	2864,23	37,50	822,50	2004,23
<b>10</b>	Armação Positivo Laje	640,65	150,50	155,50	334,65
<b>11</b>	Hidráulica	2885,14	80,00	910,00	1895,14
<b>12</b>	Armação Escada	280,77	27,78	16,08	236,91
<b>13</b>	Treliça Espaçadores Laje	1189,41	187,50	247,50	754,41
<b>14</b>	Forma Sacada	1510,26	56,68	104,78	1348,80
<b>15</b>	Armação Negativo Laje	1867,27	105,00	876,00	886,27
<b>16</b>	Concreto Laje Viga	836,66	1,00	240,00	595,66
	<b>Valor médio</b>	<b>1670,28</b>	<b>110,22</b>	<b>698,43</b>	<b>861,64</b>

**Fonte: Autor (2016)**

A Figura 48 ilustra os resultados que o software retornou, referente ao segundo cenário de simulação, e os valores utilizados para elaboração do gráfico estão apresentados na Tabela 12.

Figura 48 - Resultado do cenário 3 de simulação



Fonte: Autor (2016)

Quando comparados os resultados entre o primeiro e terceiro cenários. O ganho passa a ser representativo para o tempo de ciclo e atividade de conversão.

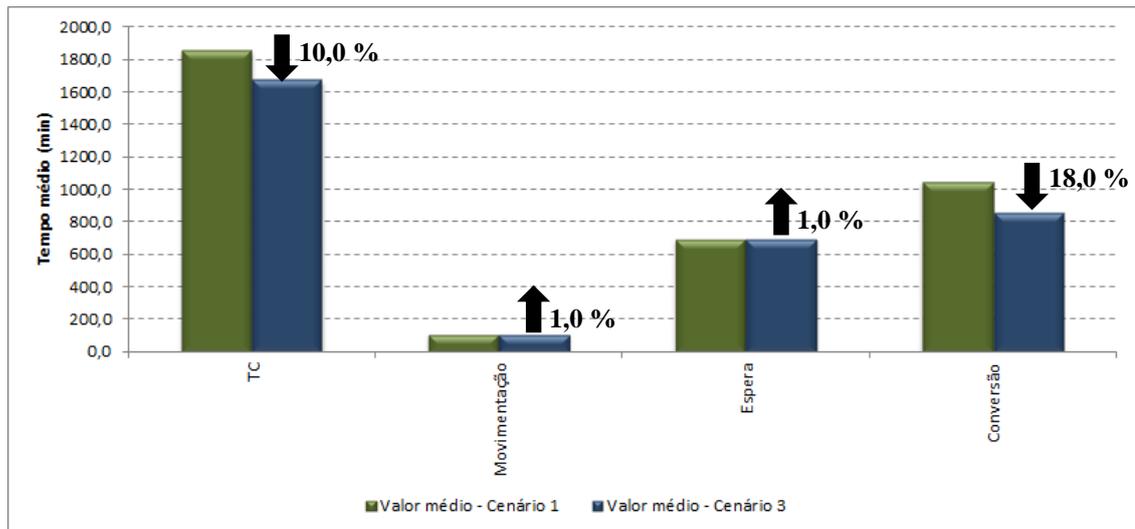
Tabela 13 - Associação entre o valor médio dos resultados do cenário 1 e cenário 3

	Valor médio - Cenário 1 (min.)	%	Valor médio - Cenário 3 (min.)	%	Cenário 1/ Cenário 3 (%)
<b>TC</b>	1855,4	100,0	1670,3	100,0	10,0
<b>Movimentação</b>	109,3	5,9	110,2	6,0	-1,0
<b>Espera</b>	694,9	37,5	698,4	41,8	-1,0
<b>Conversão</b>	1051,1	56,7	861,6	51,6	18,0

Fonte: Autor (2016)

A Figura 49 ilustra a relação do valor médio dos tempos de ciclo, movimentação, espera e conversão entre os cenários 1 e 3, quando comparados os tempos, o tempo de ciclo obteve uma redução na ordem de 10%, a movimentação aumentou em 1%, a espera aumentou em 1% e o tempo de conversão reduziu 18%. Os valores utilizados para elaboração do gráfico estão apresentados na Tabela 13.

**Figura 49 - Associação entre o valor médio dos resultados do cenário 1 e cenário 3**



Fonte: Autor (2016)

#### 4.8.4 Resultados do quarto cenário

O quarto cenário atuou na busca pela redução do tempo de ciclo. Por meio da execução de apenas uma atividade por equipe, realocação de equipes, redução do tamanho do lote processado e alteração da data de início.

A Tabela 14 apresenta os resultados referentes ao quarto cenário de simulação.

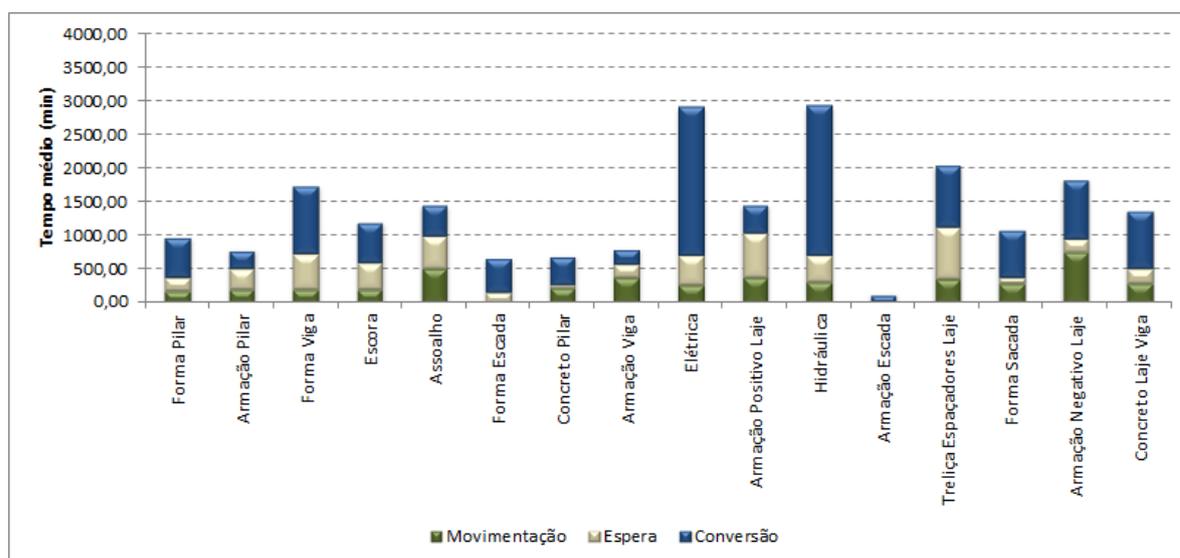
Tabela 14 - Resultados do cenário 4

N	Cenário 4	TC	Movimentação	Espera	Conversão
01	Forma Pilar	961,47	180,00	190,80	590,67
02	Armação Pilar	784,44	215,00	292,00	277,44
03	Forma Viga	1732,55	199,00	528,00	1005,55
04	Escora	1194,41	210,01	395,84	588,56
05	Assoalho	1439,02	518,00	464,27	456,75
06	Forma Escada	654,82	1,00	152,00	501,82
07	Concreto Pilar	686,69	223,67	59,16	403,86
08	Armação Viga	790,56	371,01	214,98	204,58
09	Elétrica	2913,25	263,64	437,66	2211,95
10	Armação Positivo Laje	1449,24	381,85	650,22	417,17
11	Hidráulica	2921,29	316,76	399,32	2205,21
12	Armação Escada	122,77	1,00	1,00	120,77
13	Treliça Espaçadores Laje	2027,42	362,95	749,73	914,74
14	Forma Sacada	1070,29	284,63	95,42	690,23
15	Armação Negativo Laje	1829,82	761,67	193,79	874,36
16	Concreto Laje Viga	1359,10	293,23	214,48	851,39
	<b>Valor médio</b>	<b>1371,07</b>	<b>286,46</b>	<b>314,92</b>	<b>769,69</b>

Fonte: Autor (2016)

A Figura 50 ilustra os resultados que o software retornou, referente ao segundo cenário de simulação, e os valores utilizados para elaboração do gráfico estão apresentados na Tabela 14.

Figura 50 - Resultado do cenário 4 de simulação



Fonte: Autor (2016)

Quando comparados os resultados entre o primeiro e quarto cenários. Existe uma redução do tempo de ciclo, espera e atividade de conversão.

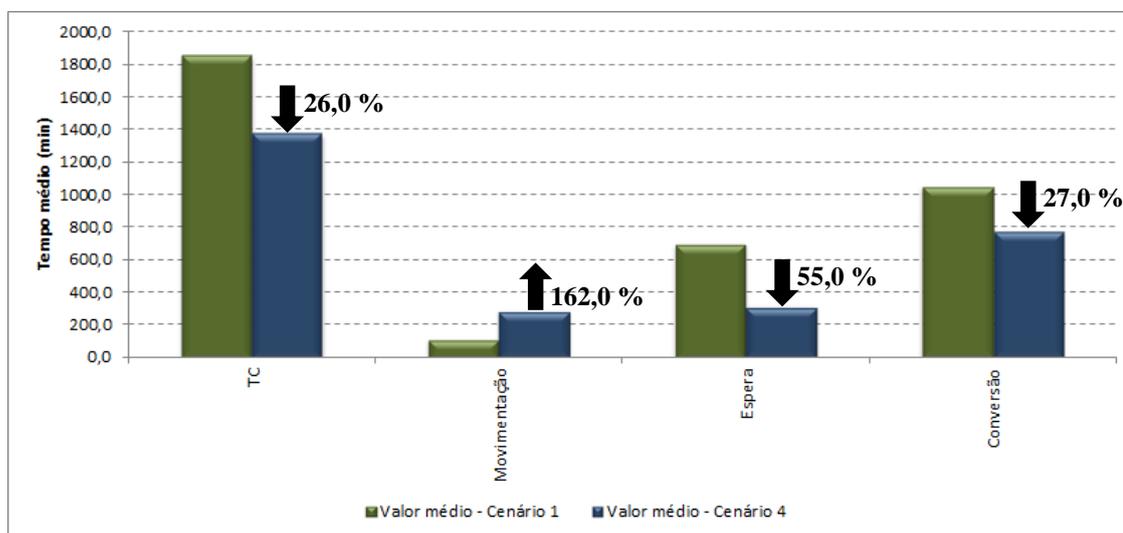
**Tabela 15 - Associação entre o valor médio dos resultados do cenário 1 e cenário 4**

	Valor médio - Cenário 1 (min.)	%	Valor médio - Cenário 4 (min.)	%	Cenário 1/ Cenário 4 (%)
<b>TC</b>	1855,4	100,0	1371,1	100,0	26
<b>Movimentação</b>	109,3	5,9	286,5	20,9	-162
<b>Espera</b>	694,9	37,5	314,9	23,0	55
<b>Conversão</b>	1051,1	56,7	769,7	56,1	27

Fonte: Autor (2016)

A Figura 51 ilustra a relação do valor médio dos tempos de ciclo, movimentação, espera e conversão entre os cenários 1 e 4, quando comparados os tempos, o tempo de ciclo obteve uma redução na ordem de 26%, a movimentação aumentou em 162%, a espera reduziu em 55% e o tempo de conversão reduziu 27%. Os valores utilizados para elaboração do gráfico estão apresentados na Tabela 15.

**Figura 51 - Associação entre o valor médio dos resultados do cenário 1 e cenário 4**



Fonte: Autor (2016)

#### 4.8.5 Resultados do quinto cenário

O quinto cenário de simulação atuou no sentido de simplificar por meio da redução do número de etapas. O processo de armação positiva, espaçadores e armação negativa da laje resultaram na conversão das três atividades em uma única, assim como escoramento, assoalho e sacada, que passaram a ocorrer de maneira contínua.

A Tabela 16 apresenta os resultados referentes ao quinto cenário de simulação.

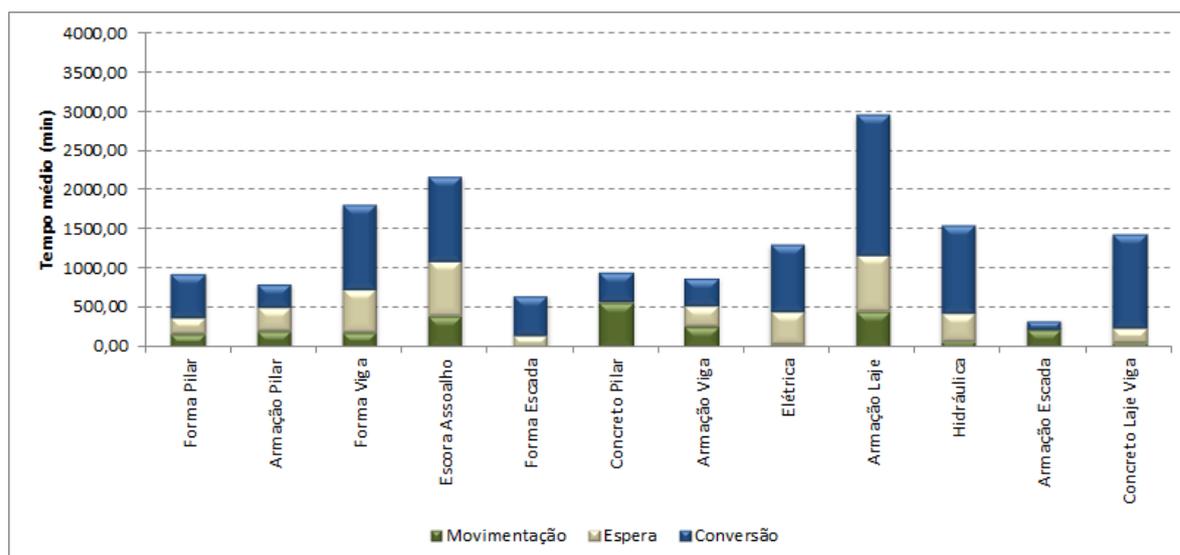
**Tabela 16 - Resultados do cenário 5**

N	Cenário 5	TC	Movimentação	Espera	Conversão
01	Forma Pilar	934,74	180,00	190,80	563,94
02	Armação Pilar	798,24	215,00	292,00	291,24
03	Forma Viga	1816,04	199,00	528,00	1089,04
04/05/14	Escora Assoalho	2167,01	402,86	679,06	1085,09
06	Forma Escada	656,97	1,00	152,00	503,97
07	Concreto Pilar	961,31	564,77	22,62	373,92
08	Armação Viga	886,32	267,80	263,22	355,30
10/13/15	Elétrica	1305,41	39,32	410,98	855,12
09	Armação Laje	2950,72	447,49	715,01	1788,22
11	Hidráulica	1551,81	88,57	351,56	1111,68
12	Armação Escada	341,15	226,87	6,92	107,36
16	Concreto Laje Viga	1439,51	56,97	187,22	1195,32
	<b>Valor médio</b>	<b>1317,44</b>	<b>224,14</b>	<b>316,62</b>	<b>776,68</b>

Fonte: Autor (2016)

A Figura 52 ilustra os resultados que o software retornou, referente ao segundo cenário de simulação, e os valores utilizados para elaboração do gráfico estão apresentados na Tabela 16.

**Figura 52 - Resultado do cenário 5 de simulação**



Fonte: Autor (2016)

Quando comparados os resultados entre o primeiro e quarto cenários. Existe uma redução do tempo de ciclo, espera e atividade de conversão (Tabela 17).

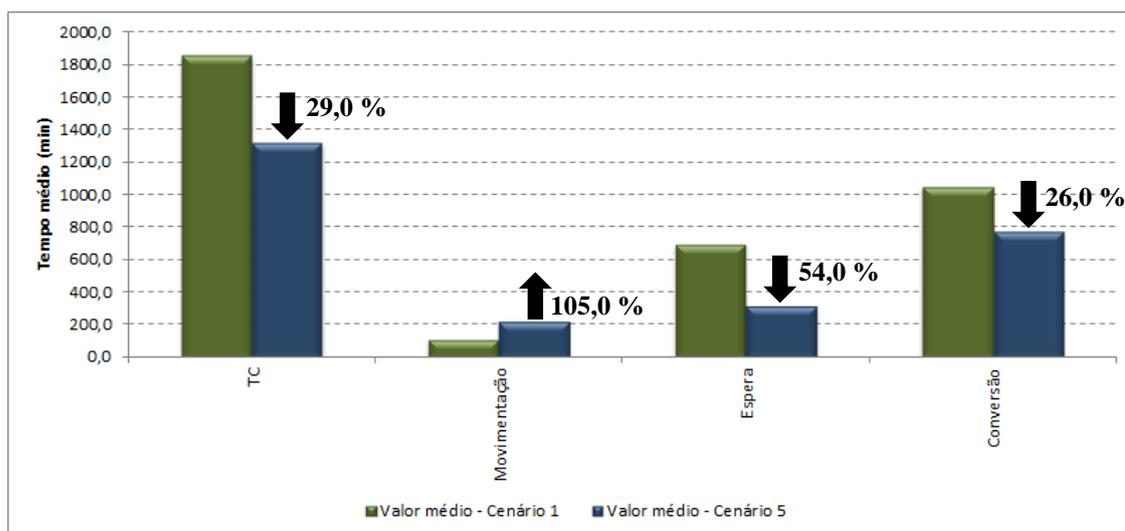
Tabela 17 - Associação entre o valor médio dos resultados do cenário 1 e cenário 5

	Valor médio - Cenário 1 (min.)	%	Valor médio - Cenário 5 (min.)	%	Cenário 1/ Cenário 5 (%)
<b>TC</b>	1855,4	100,0	1317,4	100,0	29,0
<b>Movimentação</b>	109,3	5,9	224,1	17,0	-105,0
<b>Espera</b>	694,9	37,5	316,6	24,0	54,0
<b>Conversão</b>	1051,1	56,7	776,7	59,0	26,0

Fonte: Autor (2016)

A Figura 53 ilustra a relação do valor médio dos tempos de ciclo, movimentação, espera e conversão entre os cenários 1 e 5, quando comparados os tempos, o tempo de ciclo obteve uma redução na ordem de 29%, a movimentação aumentou em 105%, a espera reduziu em 54% e o tempo de conversão reduziu 26%. Os valores utilizados para elaboração do gráfico estão apresentados na Tabela 17.

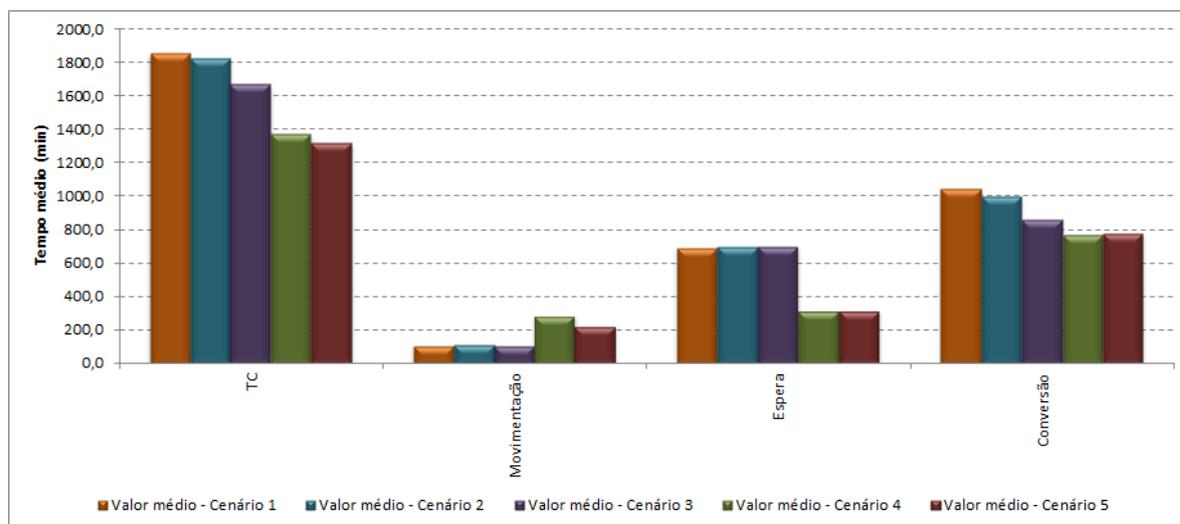
Figura 53 - Associação entre o valor médio dos resultados do cenário 1 e cenário 5



Fonte: Autor (2016)

A Figura 54 ilustra o comportamento e a comparação entre os diferentes cenários elaborados em função dos parâmetros utilizados.

**Figura 54 - Associação entre o valor médio dos resultados dos diversos cenários simulados**



Fonte: Autor (2016)

#### 4.9 Comportamento do Lead Time no decorrer da simulação

O principal objetivo deste trabalho, considerando a estrutura do pavimento-tipo, é adequar o Lead Time de produção à necessidade de produzir um lote a cada 63 horas, referencial este extraído do setor de planejamento da construtora.

**Quadro 16 - Evolução do Lead Time ao longo dos diversos cenários de simulação**

Cenários	Lead Time de Produção	
	Horas	Minutos
1	98,6	5916
2	97,9	5874
3	92,1	5526
4	77,2	4632
5	66,2	3972

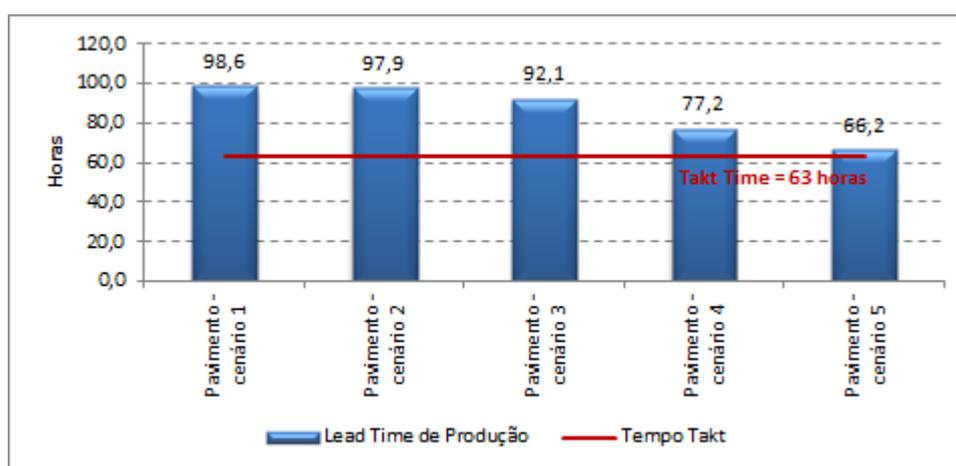
Fonte: Autor (2016)

Observou-se que no primeiro, segundo, terceiro, quarto e quinto cenários de simulação, o modelo retornou um Lead Time de, respectivamente, 98,6 horas, 97,9 horas, 92,1 horas, 77,2 horas e 66,2 horas.

Considerando-se o primeiro cenário como referência, ficou explícita a necessidade de uma redução de 36,1% no Lead Time para o atendimento à necessidade da construtora. Com vistas ao segundo cenário de simulação, constatou-se que, apesar de haver a necessidade de melhora de 35,7% no Lead Time, já ocorreram melhoras nos tempos de

conversão. Com o intuito de atender à necessidade da construtora, o terceiro cenário de simulação demanda uma redução 31,6% no Lead Time. Entretanto, retornou melhoras significativas na variabilidade do processo. O quarto cenário de simulação atuou na redução das atividades de fluxo, porém retornou um Lead Time 18,4% acima do parâmetro de referência. O Lead Time do quinto e último cenário de simulação superou em 4,9% o referencial proposto.

**Figura 55 - Evolução do Lead Time ao longo dos diversos cenários de simulação**



Fonte: Autor (2016)

#### 4.10 Considerações sobre o capítulo

Por meio da avaliação do MFV do estado atual juntamente com a LB foi possível visualizar todo o processo produtivo e identificar as oportunidades de aplicação dos onze princípios definidos por Koskela (1992) e as fontes de desperdícios do canteiro de obra.

A aplicação confirmou a literatura permitindo reafirmar que esta técnica é de extrema importância para a melhor compreensão do processo como um todo, além de adotar uma linguagem comum para representar as atividades.

A simulação permitiu por meio tentativa e erro alcançar a melhor condição futura para cada cenário que retornou o melhor Lead Time, validando e embasando cada mudança proposta.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 Discussão geral

Este trabalho teve como principal objetivo diagnosticar ineficiências de produção, avaliando aspectos de planejamento por meio da LB e execução dos serviços de canteiro de obras utilizando-se do MFV. E desta maneira, propor soluções à luz da Construção Enxuta, a fim de proporcionar a produção de um conjunto de estrutura (pilar, viga e laje) em sete dias, e, deste modo, atender à necessidade da construtora.

No decorrer da atividade de campo observaram-se realidades distintas entre os dados referentes ao planejamento que constavam da análise documental e as atividades desempenhadas no canteiro de obra.

A LB é, por origem, uma ferramenta para planejamento e controle que proporciona grande visibilidade para os fluxos de trabalho em canteiros de obra, porém, pôde-se observar que, com a identificação do tamanho do lote de cada atividade, ritmo e amortecedores entre diferentes equipes, esta ferramenta se mostrou eficiente no sentido de contribuir com o diagnóstico de ineficiência de produção.

Em contrapartida, o MFV já faz parte do portfólio das ferramentas *Lean* e cumpriu com seu papel proposto neste trabalho, de atuar como uma ferramenta de diagnóstico, além de destacar ineficiências de processo, operações desunidas, falhas de comunicação e orientações de projetos de melhoria.

As ferramentas utilizadas para diagnóstico obtiveram sucesso na identificação dos problemas de fluxo de processo, complexidade, falta de transparência e controle segmentado. E, desta maneira, possibilitou a avaliação de como atender os onze princípios da *Lean Construction* propostos por Koskela (1992).

Pôde-se observar durante realização do estudo de caso certa facilidade na identificação dos princípios. Porém, a familiaridade com as tecnologias construtivas adotadas na obra, maneira de trabalhar da construtora entre outros fatores, possibilitam facilitar ainda mais esta identificação.

Por outro lado, algumas deficiências devem ser destacadas. O MFV, por representar um retrato momentâneo do processo, pode capturar a representação errada nesse caso particular e induzir os tomadores de decisão em erros, dificultando a representação do

estado atual de um processo por intermédio do MFV e na concepção de um estado futuro desejado.

A ferramenta MFV se tornou uma condição necessária, mas não uma abordagem suficiente para analisar os problemas do sistema de produção analisado.

Assim sendo, buscou-se na simulação reduzir incertezas, criar consenso, figurar visualizações dinâmicas no processo e proporcionar características mais dinâmicas na elaboração do MFV estado futuro antes de sua implementação.

O modelo de simulação elaborado para realização deste trabalho visa replicar o funcionamento da tarefa estrutura do pavimento-tipo com suas prováveis variabilidades para se aproximar ao máximo da realidade. E como proposta, modifica a condição atual do sistema de produção para incorporar os princípios da *Lean Construction*.

A primeira questão de pesquisa buscou responder a “Por que aplicar os princípios da construção enxuta em um canteiro de obras?”. Para responder a esse questionamento, destacam-se as oportunidades de melhoria e a eliminação dos desperdícios identificados na obra visitada e, por meio dos pontos avaliados, explicitaram-se os novos patamares de produtividade que foram alcançados no modelo computacional.

Na sequência, a segunda questão de pesquisa buscou responder a “Como identificar oportunidades de aplicação dos princípios da construção enxuta em um canteiro de obras?”. Para identificar as oportunidades foram elaboradas proposições que examinaram cada um dos onze princípios apresentados por Koskela (1992), e cada proposição buscou atender a determinadas premissas, por meio da avaliação da LB e do MFV.

E, por fim, a terceira e última questão de pesquisa buscou responder a “Qual o melhor cenário de simulação utilizando-se de ferramentas Lean que trará o menor Lead Time na obra estudada?”. Respondendo à questão, o cenário que retornou o melhor *Lead time* foi o quinto cenário, que acumulou os seguintes princípios: redução da parcela das atividades que não agregam valor, redução da variabilidade, redução do tempo de ciclo e simplificação das atividades por meio da diminuição do número de etapas. Desta forma, representou o cenário que convergiu para o objetivo da pesquisa.

Assim, a simulação surge como uma ferramenta complementar ao MFV para fornecer justificativas suficientes e evidências quantificáveis que auxiliam na tomada de decisões quanto à aplicação de abordagens enxutas.

A interação entre o MFV e a simulação permite uma comunicação clara e concisa entre a aplicação dos princípios da Construção Enxuta e o canteiro de obras.

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Com base no estudo realizado, apresentam-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- 1) Avaliar e refinar o modelo de simulação desenvolvido à partir de sua aplicação em outros contextos e tipos de empreendimentos;
- 2) Implementar as propostas de melhoria e eliminação de desperdícios identificados nesta pesquisa em uma obra com características similares.

## REFERÊNCIAS

AL-SUDAIRI, A. A., DIEKMANN, J. E., SONGER, A. D. e BROWN, H. M. (1999, July). Simulation of construction processes: Traditional practices versus lean principles. In: **Proceedings IGLC-7**, Berkeley, CA, USA. 1999.

ALARCON, L.F., SEGUEL, L. Developing incentive strategies for implementation of Lean Construction. In: INTERNACIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION, nº. 10, 2002, Gramado. **Proceedings...** Gramado: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002. P. 6-8.

ALVES, T.C.L.; TOMMELEIN, I.D.; BALLARD, G. Simulation as a Tool for Production System Design in Construction. In: **Proceedings...** IGLC-14, Santiago, Chile. 341-353. 2006.

ARAUJO, A. V.; VIVAN, A. L.; ORTIZ, F. A. H.; Paliari, J. C. Análise de canteiros de obras com o uso de simulação computacional e mapeamento de fluxo. In IX SIBRAGEC e do VI ELAGEC, 2015, **Anais...** São Carlos: UFSCar, 2015. p. 150-157.

ARBULU, R., BALLARD, G., HARPER, N. Kanban in Construction. In: INTERNACIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION, nº.11, 2003, Blacksburg. **Proceedings...** Blacksburg, Virginia: IGLC, 2003. p. 1-12.

ARDITI, D; TOKDEMIR, O; SUH K. Challenges in Line-of-Balance Scheduling. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 128, n.6, p. 545 – 556, 2002.

BALLARD, G.; HOWELL, G. Shielding production: an essential step in production control. **Journal of Construction Engineering and Management**, 1 Jan 1998. v. 124, p. 11-17.

BALLARD, G., HOWELL, G. An update on last planner. In: INTERNACIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION, nº.11, 2003, Blacksburg. **Proceedings...** Blacksburg, Virginia: IGLC, 2003.

BANKS, J.; CARSON, J.S.; NELSON, B.L.; NICOL, D.M. **Discrete-event system simulation**. 4.ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2005.

CONFORTO, E. C.; AMARAL, D. C.; SILVA, S. L. Roteiro Para Revisão Bibliográfica Sistemática: Aplicação no Desenvolvimento de Produtos e Gerenciamento de Projetos. In: 8o. Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto – CBGDP Porto Alegre, RS, Brasil, 2011. Instituto de Gestão de Desenvolvimento do Produto – IGDP. **Anais...** Porto Alegre: IGDP, 2011.

DE LIMA, D. F. S. et al. **Mapeamento do fluxo de valor e simulação para implementação de práticas lean em uma empresa calçadista.** Revista Produção Online, Florianópolis, v. 16, n. 1, p. 366-392, mar. 2016. ISSN 16761901. Disponível em: <<https://producaoonline.org.br/rpo/article/view/2183>>. Acesso em: 20 jun. 2016.

DOOLEY, K. Simulation research methods. In: BAUM, Joel (Ed.). **Companion to Organizations.** Blackwell. London. 2002.

FONTANINI, P.S.P., PICCHI, F.A., LOUREIRO, S.A., JUNIOR, O.F.L. e FOLCH, A.T. Simulating a Construction Supply Chain– Preliminary Case Study of Precast Elements. In: **Proceedings... IGLC-16, Manchester, UK, 16-18 Jul 2008.** pp 371-380

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 4a Edição. São Paulo: Atlas, 2002. 176 p.

HIROTA, E.H.; FORMOSO, C.T. Implementação da construção enxuta: contribuições da aprendizagem na ação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GESTÃO DA QUALIDADE E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, nº.2., 2001, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ANTAC, 2001.

KEMMER, S.L., HEINECK, L.F.M. e ALVES, T.D.C. Using the Line of Balance for Production System Design. In: **Proceedings... IGLC-16, Manchester, UK, 16-18 Jul 2008.** pp 299-308

KOSKELA, L. **Application of the new production philosophy to construction.** Stanford, EUA: Stanford University, Center for Integrated Facility Engineering (CIFE), 1992. (Technical Report n. 72).

KOSKELA, L. **An exploration towards a production theory and its application to construction.** Espoo 2000. Technical Research Centre of Finland, VTT Publications 408. 296 p.

LAW, A.M.; KELTON W.D. **Simulation modeling and analysis.** 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2007.

LEAN ENTERPRISE INSTITUTE. **Léxico Lean:** glossário ilustrado para praticantes do Pensamento Lean. 4. ed.. São Paulo: Lean Institute Brasil, 2011. 130 p.

LIKER J.K. **O modelo Toyota:** 14 princípios de gestão do maior fabricante do mundo. Porto Alegre: Bookman, 2005.

LIKER, J. K.; MEIER D. **O modelo Toyota** - Manual de Aplicação. Um guia prático para a implementação dos 4PS da Toyota. Porto Alegre: Bookman, 2007.

OHNO, T. **O Sistema Toyota de Produção: além da produção em larga escala**. Porto Alegre: Bookman, 1997. 131 p.

ORTIZ, F.A.H. **Roteiro para diagnóstico e proposição de melhorias com base em princípios e ferramentas da produção enxuta**. 2013. 179 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas Construtivos) - Programa de pós-graduação em estruturas e construção civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

PASQUALINI, F. Mapeamento do fluxo de valor na construção: Estudo de caso em uma construtora brasileira. In: Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção / Encontro Latino-Americano de Gestão e Economia da Construção, 4., 2005, Porto Alegre, RS **Anais ...** Porto Alegre, RS: UFRGS, 2005.

PEGDEN, C. D, SHANNON, R. E., SADOWSKI, R.P. **Digital computer simulation SIMAN**. 2nd edition, McGraw-Hill New York, P44, 1995.

POSHDAR, M., GONZÁLEZ, V.A., O'SULLIVAN, M., SHAHBAZPOUR, M., WALKER, C.G. e GOLZARPOOR, H. The Role of Conceptual Modeling in Lean Construction Simulation. In: **Proceedings... IGLC-24**, Boston, USA, 20-22 Jul 2016.

PRITSKER, A. A. B.: **Introduction to Simulation and SLAM-II**, 3<sup>a</sup> ed. New York, John Wiley e Sons, 1986.

ROTHER, M.; SHOOK, J. **Aprendendo a Enxergar: mapeando o fluxo de valor para agregar valor e eliminar o desperdício**. São Paulo: Lean Institute Brasil, 1998. 102p.

SALEM, O.; GENAIDY, A.; LUEGRING, M.; PAEZ, O.; SOLOMON, J. The path from Lean Manufacturing to Lean Construction: Implementation and Evaluation of Lean Assembly. In: **Proceedings IGLC-12**, Elsinore, Denmark, 2004.

SARGENT, R.G. Verification and validation of simulation models. In: **Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference**. Winter simulation conference, 2005. p. 130-143.

SCHRAMM, F.K., SILVEIRA, G.L., PAEZ, H., MESA, H., FORMOSO, C.T. e ECHEVERRY, D. Using Discrete-Event Simulation to Support Decision-Makers in Production System Design and Operations. In: **Proceedings... IGLC-16**, Manchester, UK, 16-18 Jul 2008. pp 131-141

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; HARLAND, C.; HARRISON, A.; JOHNSON, R. **Administração da produção**. São Paulo: Atlas, 1999.

SOUZA, U. E. L. **Método para a previsão da produtividade da mão-de-obra e do consumo unitário de materiais para os serviços de fôrmas, armação, concretagem, alvenaria, revestimentos com argamassa, contrapiso, revestimentos com gesso e revestimentos cerâmicos**. 2001. 280 f. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

SOUZA, H.; MONTEIRO, A. Linha de balanço – Uma abordagem ao planeamento e controlo na construção. In: **FÓRUM INTERNACIONAL DE GESTÃO DA CONSTRUÇÃO**, Porto, 2., v.1, n.1 p. 1-12, Outubro. 2011.

SPEAR, S.; BOWEN, H. K. Decoding the DNA of the Toyota Production System. **Harvard Business Review**. V. 77, p. 96–108. 1999.

TIMM, I.J.; LORIG, F. A survey on methodological aspects of computer simulation as research technique. In: **Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference**. Winter simulation conference, 2015. p. 2704-2715.

TOMMELEIN, I.D. Discrete-Event Simulation of Lean Construction Processes. In: **Proceedings IGLC-5**, Gold Coast, Australia, 16-17 Jul 1997. pp 121-136

VIVAN, A. L.; ORTIZ, F. A. H.; PALIARI, J. C.. Parâmetros de Eficácia na Aplicação de Ferramentas Lean a Partir da Análise do Mapeamento do Fluxo de Valor. In: ENTAC, XIV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2012, Juiz de Fora - MG. **Anais...** Juiz de Fora – MG: UFJF, 2012. v. 1. p. 2624 - 2633

WOMACK, J. P.; JONES, D.T. **A mentalidade enxuta nas empresas** - elimine o desperdício e crie riqueza. Rio de Janeiro: Campus, 1998.

WOMACK, J.P.; JONES, D.T.; ROOS, D. **A máquina que mudou o mundo**. Rio de Janeiro: Campus, 1992.

XIA, W.; SUN, J. Simulation guided value stream mapping and lean improvement: a case study of a tubular machining facility. **Journal of Industrial Engineering and Management**, 2013. v. 6, n. 2, p. 456.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

## APÊNDICE I: FOLHA DE COLETA DE DADOS



APÊNDICE II: ALGORITMO DO CENÁRIO 1 EXTRAÍDO DO  
PROMODEL®

```

*****
*
*                               Listagem Formatada do Modelo:                               *
* C:\Users\Alexandre\Desktop\ERGIL\Simulação\Modelo_Estrutura_ERGIL_Cenário_01.mod *
*
*****

```

```

Tempo:                               Minutos
Distância:                           Metros

```

```

*****
*                               Locais                               *
*****

```

Nome	Cap	Unidade	Estatísticas	Regras	Custo
Loc_Estoque_Carpintaria	INF	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
Loc_Montar_Forma_Pilar	1	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
Loc_Estoque_Armadores	INF	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
Loc_Armar_Pilar	1	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
Loc_Montar_Forma_Viga	1	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
Loc_Escorar	1	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
Loc_Montar_Asoalho	1	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
Loc_Forma_Escada	1	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
Loc_Estoque_Concreto	INF	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
Loc_Concretar_Pilar	1	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
Loc_Armar_Viga	1	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
Loc_Estoque_Elétrica	INF	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
Loc_Elétrica	1	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
Loc_Armar_Positivo_Laje	1	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
Loc_Estoque_Hidráulica	INF	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
Loc_Hidráulica	1	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
Loc_Armar_Escada	1	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
Loc_Armar_Treliça_Espaçadores	1	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
Loc_Montar_Forma_Sacada	1	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	

```

Loc_Armar_Negativo_Laje      1  1      Série de Tempo O Mais Velho, ,
Loc_Concretar_Laje_Viga     1  1      Série de Tempo O Mais Velho, ,
    
```

```

*****
*                               Entidades                               *
*****
    
```

Nome	Velocidade (mpm)	Estatísticas	Custo
Forma_Pilar	50	Série de Tempo	
Armação_Pilar	50	Série de Tempo	
Forma_Viga	50	Série de Tempo	
Escora	50	Série de Tempo	
Assoalho	50	Série de Tempo	
Forma_Escada	50	Série de Tempo	
Concreto_Pilar	50	Série de Tempo	
Armação_Viga	50	Série de Tempo	
Elétrica	50	Série de Tempo	
Armação_Positivo_Laje	50	Série de Tempo	
Hidráulica	50	Série de Tempo	
Armação_Escada	50	Série de Tempo	
Armação_Treliça_Espaçadores_La	50	Série de Tempo	
Forma_Sacada	50	Série de Tempo	
Armação_Negativo_Laje	50	Série de Tempo	
Concreto_Laje_Viga	50	Série de Tempo	

```

*****
*                               Redes de Caminho                               *
*****
    
```

Nome	Tipo	T/S	De	Para	BI	String	Fator de Velocidade
Red_Operador	Passante	Tempo	R1	R2	Bi	0 MIN	
			R2	R3	Bi	0 MIN	

R3	R4	Bi	0 MIN
R4	R5	Bi	0 MIN
R5	R6	Bi	0 MIN
R6	R7	Bi	180 MIN
R3	R8	Bi	215 MIN
R6	R9	Bi	199 MIN
R6	R10	Bi	210 MIN
R6	R11	Bi	149 MIN
R6	R12	Bi	1 MIN
R5	R13	Bi	1 MIN
R3	R14	Bi	162.5 MIN
R4	R15	Bi	37.5 MIN
R3	R16	Bi	150.5 MIN
R2	R17	Bi	80 MIN
R3	R18	Bi	1 MIN
R3	R19	Bi	187.5 MIN
R6	R20	Bi	43.5 MIN
R3	R21	Bi	105 MIN
R5	R22	Bi	1 MIN

\*\*\*\*\*  
 \* Interfaces \*

Red	Nó	Local
Red_Operador	R2	Loc_Estoque_Hidráulica
	R3	Loc_Estoque_Armadores
	R4	Loc_Estoque_Elétrica
	R5	Loc_Estoque_Concreto
	R6	Loc_Estoque_Carpintaria
	R7	Loc_Montar_Forma_Pilar
	R8	Loc_Armar_Pilar
	R9	Loc_Montar_Forma_Viga
	R10	Loc_Escorar

```

R11      Loc_Montar_Asoalho
R12      Loc_Forma_Escada
R13      Loc_Concretar_Pilar
R14      Loc_Armaz_Viga
R15      Loc_Elétrica
R16      Loc_Armaz_Positivo_Laje
R17      Loc_Hidráulica
R18      Loc_Armaz_Escada
R19      Loc_Armaz_Treliça_Espaçadores_
R20      Loc_Montar_Forma_Sacada
R21      Loc_Armaz_Negativo_Laje
R22      Loc_Concretar_Laje_Viga
    
```

```

*****
*                                     *
*                                     Mapeamento                                     *
*                                     *
*****
    
```

Red	De	Para	Dest
Red_Operador	R2	R1	
	R3	R2	
	R4	R3	
	R5	R4	
	R6	R5	
	R2	R3	
	R3	R4	
	R4	R5	
	R5	R6	
	R6	R7	
	R3	R8	
	R6	R9	
	R6	R10	
	R6	R11	
	R6	R12	
	R5	R13	

R3	R14
R4	R15
R3	R16
R2	R17
R3	R18
R3	R19
R6	R20
R3	R21
R5	R22

\*\*\*\*\*  
 \* Recursos \*

Nome	Unid	Rec	Ent	Caminho	Movimentação	Custo
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Operador	33	Por Unidade	Mais Próximo	Mais Velha	Red_Operador	Vazio: 50 mpm
					Base: R1	Cheio: 50 mpm
					(Retornar)	

\*\*\*\*\*  
 \* Processamento \*

Roteamento				Processo
Entidade	Local	Operação	B1	Saída
Destino	Regra	Lógica de Movimento	-----	-----
-----	-----	-----	-----	-----
Forma_Pilar	Loc_Estoque_Carpintaria		1	Forma_Pilar
Loc_Montar_Forma_Pilar	FIRST 1	Move With Operador		

Then Free

Forma_Pilar	Loc_Montar_Forma_Pilar	Use 10 Operador For B(0.946, 0.835, 373, 839)
		Free Operador
		1 Forma_Pilar
EXIT	FIRST 1 Wait 108 min	
Armação_Pilar	Loc_Estoque_Armadores	1 Armação_Pilar
Loc_Armar_Pilar	FIRST 1 Move With Operador	

Then Free

Armação_Pilar	Loc_Armar_Pilar	Use 6 Operador For U(440, 194)
		Free Operador
		1 Armação_Pilar
EXIT	FIRST 1 Wait 770 min	
Forma_Viga	Loc_Estoque_Carpintaria	1 Forma_Viga
Loc_Montar_Forma_Viga	FIRST 1 Move With Operador	

Then Free

Forma_Viga	Loc_Montar_Forma_Viga	Use 6 Operador For B(0.591, 0.857, 798,
1.94e+003)		Free Operador
		1 Forma_Viga
EXIT	FIRST 1 Wait 1105 min	

Wait 218 min

Escora	Loc_Estoque_Carpintaria	1 Escora
Loc_Escorar	FIRST 1 Move With Operador	

Then Free

Escora	Loc_Escorar	Use 3 Operador For U(991, 434)
		Free Operador
		1 Escora
EXIT	FIRST 1 Wait 1813 min	
Assoalho	Loc_Estoque_Carpintaria	1 Assoalho
Loc_Montar_Asoalho	FIRST 1 Move With Operador	

Then Free			
Assoalho	Loc_Montar_Asoalho	Use 4 Operador For B(0.692, 0.525, 800,	
1.65e+003)		Free Operador	1 Assoalho
EXIT	FIRST 1 Wait 699 min		
Forma_Escada	Loc_Estoque_Carpintaria		1 Forma_Escada
Loc_Forma_Escada	FIRST 1 Move With Operador		
Then Free			
Forma_Escada	Loc_Forma_Escada	Use 1 Operador For U(806, 330)	
		Free Operador	1 Forma_Escada
EXIT	FIRST 1 Wait 1510 min		
Concreto_Pilar	Loc_Estoque_Concreto		1 Concreto_Pilar
Loc_Concretar_Pilar	FIRST 1 Move With Operador		
Then Free			
Concreto_Pilar	Loc_Concretar_Pilar	Use 4 Operador For B(0.762, 1.,149, 344)	
		Free Operador	1 Concreto_Pilar
EXIT	FIRST 1 Wait 57 min		
Armação_Viga	Loc_Estoque_Armadores		1 Armação_Viga
Loc_Armar_Viga	FIRST 1 Move With Operador		
Then Free			
Armação_Viga	Loc_Armar_Viga	Use 4 Operador For B(0.795, 1.,259, 664)	
		Free Operador	1 Armação_Viga
EXIT	FIRST 1 Wait 405 min		
Elétrica	Loc_Estoque_Elétrica		1 Elétrica
Loc_Elétrica	FIRST 1 Move With Operador		
Then Free			
Elétrica	Loc_Elétrica	Use 2 Operador For U(2.04e+003, 845)	
		Free Operador	1 Elétrica
EXIT	FIRST 1 Wait 460 min		
Wait 325 min			

Armação_Positivo_Laje Loc_Armar_Positivo_Laje	Loc_Estoque_Armadores FIRST 1 Move With Operador	1	Armação_Positivo_Laje
Then Free			
Armação_Positivo_Laje	Loc_Armar_Positivo_Laje	Use 5 Operador For B(0.848, 1.28, 182, 449)	
		Free Operador	1 Armação_Positivo_Laje
EXIT	FIRST 1 Wait 5 min		
Hidráulica Loc_Hidráulica	Loc_Estoque_Hidráulica FIRST 1 Move With Operador	1	Hidráulica
Then Free			
Hidráulica	Loc_Hidráulica	Use 2 Operador For 1.12e+003+W(1.3, 745)	
		Free Operador	1 Hidráulica
EXIT	FIRST 1 Wait 830 min		
Armação_Escada Loc_Armar_Escada	Loc_Estoque_Armadores FIRST 1 Move With Operador	1	Armação_Escada
Then Free			
Armação_Escada	Loc_Armar_Escada	Use 1 Operador For B(0.923, 1.7, 157, 405)	
		Free Operador	1 Armação_Escada
EXIT	FIRST 1		
Armação_Treliça_Espaçadores_La Armação_Treliça_Espaçadores_La	Loc_Estoque_Armadores Loc_Armar_Treliça_Espaçadores_	1	
	FIRST 1 Move With Operador		
Then Free			
Armação_Treliça_Espaçadores_La	Loc_Armar_Treliça_Espaçadores_	Use 9 Operador For B(0.831, 1.,432, 943)	
		Free Operador	1
Armação_Treliça_Espaçadores_La	EXIT	FIRST 1 Wait 60 min	
Forma_Sacada Loc_Montar_Forma_Sacada	Loc_Estoque_Carpintaria FIRST 1 Move With Operador	1	Forma_Sacada
Then Free			
Forma_Sacada	Loc_Montar_Forma_Sacada	Use 4 Operador For B(0.571, 1.,683, 1.81e+003)	
		Free Operador	1 Forma_Sacada
EXIT	FIRST 1 Wait 59 min		

```

Armação_Negativo_Laje          Loc_Estoque_Armadores          1      Armação_Negativo_Laje
Loc_Armar_Negativo_Laje       FIRST 1  Move With Operador

Then Free
Armação_Negativo_Laje          Loc_Armar_Negativo_Laje        Use 8 Operador For B(0.829, 0.795, 478,
1.19e+003)
Free Operador                  1      Armação_Negativo_Laje

EXIT                            FIRST 1  Wait 771 min

Concreto_Laje_Viga            Loc_Estoque_Concreto           1      Concreto_Laje_Viga
Loc_Concretar_Laje_Viga       FIRST 1  Move With Operador

Then Free
Concreto_Laje_Viga            Loc_Concretar_Laje_Viga        Use 10 Operador For B(0.511, 0.698, 297, 696)
Free Operador                  1      Concreto_Laje_Viga

EXIT                            FIRST 1  Wait 104 min

Wait 135 min

```

```

*****
*                               Chegadas                               *
*****

```

Entidade	Local	Quantidade	Primeira Vez	Ocorrências	Frequência	Lógica
Forma_Pilar	Loc_Estoque_Carpintaria	1	0	1		
Armação_Pilar	Loc_Estoque_Armadores	1	0	1		
Forma_Viga	Loc_Estoque_Carpintaria	1	18 hr	1		
Escora	Loc_Estoque_Carpintaria	1	24 hr	1		
Assoalho	Loc_Estoque_Carpintaria	1	24 hr	1		
Forma_Escada	Loc_Estoque_Carpintaria	1	24 hr	1		
Concreto_Pilar	Loc_Estoque_Concreto	1	33 hr	1		
Armação_Viga	Loc_Estoque_Armadores	1	38 hr	1		

Elétrica	Loc_Estoque_Elétrica	1	33 hr	1
Armação_Positivo_Laje	Loc_Estoque_Armadores	1	47 hr	1
Hidráulica	Loc_Estoque_Hidráulica	1	42 hr	1
Armação_Escada	Loc_Estoque_Armadores	1	52 hr	1
Armação_Treliça_Espaçadores_La	Loc_Estoque_Armadores	1	47 hr	1
Forma_Sacada	Loc_Estoque_Carpintaria	1	51 hr	1
Armação_Negativo_Laje	Loc_Estoque_Armadores	1	60 hr	1
Concreto_Laje_Viga	Loc_Estoque_Concreto	1	76 hr	1