

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Projeto de Sistemas de Produção na Construção Civil Utilizando
Simulação Computacional como Ferramenta de Apoio
à Tomada de Decisão**

Fábio Kellermann Schramm

Porto Alegre
2009

FÁBIO KELLERMANN SCHRAMM

**PROJETO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO NA
CONSTRUÇÃO CIVIL UTILIZANDO SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL COMO FERRAMENTA DE APOIO À
TOMADA DE DECISÃO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Orientação: Prof. PhD. Carlos Torres Formoso

Porto Alegre
2009

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação:
Bibliotecária Daiane Schramm – CRB-10/1881

S377p Schramm, Fábio Kellermann
Projeto de Sistemas de Produção na Construção Civil Utilizando
Simulação Computacional como Ferramenta de Apoio à Tomada de Decisão. /
Fábio Kellermann Schramm. – Porto Alegre, 2009.
299f.: il.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de
Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre,
BR-RS, 2009.

Orientação: Prof. Dr. Carlos Torres Formoso

1. Projeto do Sistema de Produção. 2. Simulação Computacional. 3.
Gestão da Construção. I. Formoso, Carlos Torres, orient. II. Título.

CDU 69:658(043)
CDD 658

FÁBIO KELLERMANN SCHRAMM

**PROJETO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO NA CONSTRUÇÃO
CIVIL UTILIZANDO SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COMO
FERRAMENTA DE APOIO À TOMADA DE DECISÃO**

Esta tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, Área de Concentração: Construção, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 23 de dezembro de 2009.

Prof. Carlos Torres Formoso
PhD. pela University of Salford
Orientador

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. João Luiz Becker (UFRGS)
PhD. pela University of California at Los Angeles

Prof. Luis Henrique Rodrigues (UNISINOS)
PhD. pela Lancaster University

Prof. Eduardo Luis Isatto (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Aos meus pais Luiz Carlos (*in memoriam*) e Zilma pelo seu imenso amor e por me proporcionarem formação intelectual e, sobretudo, moral.

À minha esposa Daiane, pelo amor, companheirismo, apoio e compreensão pelas minhas ausências, mesmo quando presente.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Carlos Torres Formoso, pela sua orientação precisa e, sobretudo, pela amizade demonstrada durante este trabalho. Que sua competência e dedicação sirvam de exemplo à minha vida profissional.

Aos bolsistas de iniciação científica que participaram deste trabalho de forma inestimável: Letícia R. Berr, Guilherme L. Silveira e Raquel H. Reck. Aos demais bolsistas que também o apoiaram parcialmente: Marcelle E. Bridi, Cecília Biguelini e Daniela Dietz Viana.

Aos professores Tarcísio Saurin, Luis Henrique Rodrigues, Eduardo Isatto e João Luiz Becker pela participação nas bancas de qualificação e defesa deste trabalho e pela inestimável contribuição à sua realização.

A todos os colegas professores do Departamento de Administração da UFPel, em especial à sua Chefe, professora Maria da Graça Nogueira, pelo apoio incondicional à realização deste curso de pós-graduação.

À CAPES pela concessão de bolsas de estudos do Projeto PQI, à FAPERGS pelo auxílio financeiro, através do edital PROADE3, que possibilitou a aquisição de equipamentos e *software* utilizados no trabalho e ao CNPq (Edital PROSUL) pelos recursos que viabilizaram a missão de estudos.

Às empresas e aos seus profissionais que tomaram parte dos estudos de caso que compuseram esta tese, pela oportunidade de experimentação e pelos conhecimentos adquiridos.

A todos os professores e funcionários do Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE/UFRGS) e do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC) pela oportunidade de fazer parte desta “família”.

Aos meus colegas do Grupo de Gerenciamento e Economia da Construção (GEC): Guilherme Biesek, Juliana Brito, Lisiane Lima, Patrícia A. Tillmann, Cecília Rocha, Adriana O. Santos, Luciana Miron, Cíntia F. Bartz e Bruno Mota.

Aos pequenos Augusto e Francisco por trazer de volta a lembrança da alegria e da espontaneidade da infância que às vezes nos esquecemos de praticar. Ao Lucas, que ainda nem nasceu, mas que já faz parte das nossas vidas.

Aos colegas e grandes companheiros remanescentes da turma de mestrado de 2002 que persistiram na busca pelo doutorado: Daniel Pagnussat, Cristiane Pauletti e Fabrício Cambraia. Obrigado pelo apoio e pelas conversas nos momentos de angústia e incerteza!

Aos amigos Iamara Bulhões, Fernanda Saffaro, Ercilia Hirota, Thaís Alves, Cristóvão Cordeiro, Marcel Trescastro, Renato das Neves, Elvira Lantelme e Henrique Coelho.

Ao Expresso Embaixador, através de seus funcionários e motoristas, pela seriedade e presteza dos serviços prestados nas mais de setecentas e cinquenta viagens que fiz entre Pelotas e Porto Alegre neste período.

Àqueles que, por um lapso de memória, não tenham aqui sido nominados, mas que sabem da importância que tiveram nesta empreitada.

RESUMO

SCHRAMM, Fábio Kellermann. Projeto de Sistemas de Produção na Construção Civil Utilizando Simulação Computacional como Ferramenta de Apoio à Tomada de Decisão. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Embora comum na indústria, o Projeto do Sistema de Produção (PSP) ainda é pouco realizado na construção civil. Estudos anteriores apontaram para a necessidade de empregar ferramentas capazes de modelar e avaliar os efeitos da interdependência, da complexidade e da variabilidade no desempenho dos sistemas de produção na construção, como a simulação computacional, ainda é pouco usada na construção civil. Desta forma, este trabalho teve como objetivo geral propor um modelo para a elaboração do Projeto do Sistema de Produção de empreendimentos da construção civil a partir da utilização da simulação computacional como ferramenta de apoio à tomada de decisão, tendo como ponto de partida o modelo anteriormente desenvolvido. Como estratégia de pesquisa optou-se pela pesquisa construtiva, caracterizada pela implementação de construções inovadoras para a solução de um problema com relevância prática, através do aprendizado baseado na experimentação e na reflexão teórica. A partir de uma revisão de literatura, este trabalho foi dividido em três fases. A fase exploratória consistiu da análise e seleção do *software* de simulação e de um estudo exploratório. A fase de desenvolvimento consistiu na realização de quatro estudos de caso nos quais avaliou-se o emprego da simulação no PSP. Na fase de análise e reflexão, discutiu-se quatro funções básicas do PSP: promover discussões e questionamentos; incentivar a adoção de uma visão sistêmica; sistematizar, formalizar e registrar decisões; e estabelecer um estado futuro a ser alcançado. Quanto à simulação, seu emprego permitiu o teste de diferentes cenários relacionados a mudanças na estratégia de ataque do empreendimento, ao dimensionamento da capacidade dos recursos de produção entre outros. Propôs-se, ainda, a estratégia de reutilização de modelos como forma de reduzir o tempo de desenvolvimento dos estudos. O modelo proposto, que tem seu escopo limitado a decisões de caráter operacional, divide o PSP em duas fases que não são estanques, devendo sobrepor-se: a fase estática, baseada no modelo anterior de elaboração do PSP; e a fase dinâmica, na qual são desenvolvidos os modelos de simulação e testados cenários para apoiar a tomada de decisão.

Palavras-chave: projeto do sistema de produção; simulação computacional; gestão da construção.

ABSTRACT

SCHRAMM, Fábio Kellermann. Projeto de Sistemas de Produção na Construção Civil Utilizando Simulação Computacional como Ferramenta de Apoio à Tomada de Decisão. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Though common in industry, the Production System Design (PSD) is still seldom used by the construction sector. Previous studies have pointed to the need to use tools to model and evaluate the effects of interdependence, complexity and variability in production system performance, such as computer simulation. Thus, this study aimed to propose a model for designing production systems of construction projects based on the use of simulation as a tool to support decision-making, whose starting point is a previously developed model. The constructive research approach is characterized by implementing innovative constructions to solve a specific and practically relevant problem through learning based on experimentation and theoretical reflection. Based on literature review, this study was divided into three phases. The exploratory phase consisted of the analysis and selection of simulation software and an exploratory study. The development phase consisted of four case studies in which the use of simulation in the PSD was evaluated. At the analysis and reflection phase four basic functions of the PSD were discussed: promoting discussion and questions; encouraging the adoption of a systemic view; formalizing and recording decisions; and establishing a state to be reached. The use of simulation allowed the testing of different scenarios related to project installment strategy changes and in the capacity planning of production resource planning capacity among others. A strategy for reusing models was also proposed in order to reduce the development time of the studies. The proposed PSD model, which has its scope limited to decisions of operational nature, is made up of two overlapping phases: the stochastic phase, based on the previously proposed PSD model, and the dynamic phase, in which simulation models are developed and scenarios are tested to support decision-making.

Keywords: production system design, simulation; construction management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: representação do sistema de produção (baseado em: MEREDITH; SHAFER, 2002)	38
Figura 02: matriz volume-variedade de produção (baseado em: SCHMENNER, 1993 <i>apud</i> BALLARD; HOWELL, 1998)	40
Figura 03: comparação entre o gestão de empreendimento utilizando conceitos da Produção Enxuta e tradicionais (baseado em: BALLARD; HOWELL, 2003)	45
Figura 04: gerenciamento de empreendimentos (baseado em: KOSKELA, 2001).....	46
Figura 05: relação entre a atividade de projeto e os custos de produção (baseado em: SLACK <i>et al.</i> , 1997)	47
Figura 06: etapas da elaboração do PSP para EHIS (SCHRAMM, 2004)	53
Figura 07: Linha de balanço utilizada para o estudo do fluxo de trabalho em uma unidade- base.....	54
Figura 08: Modelo de Elaboração do PSP para Empreendimentos Complexos (RODRIGUES, 2006)	58
Figura 09: algumas formas de estudar um sistema (baseado em: BERENDS; ROMME, 1999; LAW; KELTON, 2000)	61
Figura 10: espectro dos enfoques da modelagem de sistemas (baseado em: PIDD, 2004).....	64
Figura 11: etapas do estudo de simulação (baseado em: LAW; MCCOMAS, 1990, 1991; LAW; KELTON, 2000)	70
Figura 12: tipos de ferramentas computacionais utilizadas na simulação	74
Figura 13: espectro de reutilização de modelos (baseado em: PIDD, 2002).....	98
Figura 14: elementos centrais da abordagem de pesquisa construtiva (baseado em KASANEN; LUKKA; SIITONEN, 1993).....	102
Figura 15: delineamento da pesquisa.....	108
Figura 16: avaliação dos <i>softwares</i> pré-selecionados vs critérios de seleção	111
Figura 17: módulos do painel “processos básicos” do Arena.....	111
Figura 18: vista do empreendimento A.....	114
Figura 19: principais materiais e técnicas construtivas utilizadas no empreendimento X1 ...	117
Figura 20: implantação, plantas baixas da unidade habitacional e foto de um bloco do empreendimento X1	118

Figura 21: implantação do empreendimento X2.....	121
Figura 22: principais materiais e técnicas construtivas utilizadas no empreendimento Y1 ...	122
Figura 23: implantação do empreendimento Y1.....	123
Figura 24: vista de duas unidades habitacionais geminadas do empreendimento Y1	123
Figura 25: divisão das fases do empreendimento Y1	124
Figura 26: principais materiais e técnicas construtivas utilizadas no empreendimento Y2 ...	126
Figura 27: implantação do empreendimento Y2.....	126
Figura 28: vista de um bloco do empreendimento Y2.....	127
Figura 29: desdobramento do constructo utilidade.....	129
Figura 30: desdobramento do constructo facilidade de uso.....	130
Figura 31: segunda versão do modelo conceitual desenvolvido.....	136
Figura 32: esforço despendido na elaboração do PSP no empreendimento X1	141
Figura 33: parte do diagrama de precedência elaborado para o empreendimento X1.....	144
Figura 34: diagrama de precedência com a seqüência de execução da unidade-base do empreendimento X1	145
Figura 35: alternativas de customização fornecidas aos clientes no empreendimento X1 (TILLMANN, 2008)	146
Figura 36: opções de customização das unidades básicas a partir da sua aquisição (TILLMANN, 2008)	147
Figura 37: planilha de registro das opções de customização do cliente	148
Figura 38: gráfico de Gantt com a programação da customização (acima) e planilha com as datas-limite para aquisição dos materiais (abaixo)	149
Figura 39: linha de balanço elaborada durante o estudo.....	150
Figura 40: plano de ataque do empreendimento.....	150
Figura 41: modelo conceitual do módulo genérico de simulação proposto	153
Figura 42: estrutura do modelo genérico proposto	154
Figura 43: módulo genérico como visualizado no modelo de simulação (e) e a sua interface com o usuário para o ingresso de dados (d).....	154
Figura 44: modelo construído para o empreendimento X1	156

Figura 45: planilha de ingresso de dados no modelo.....	157
Figura 46: linha de balanço.....	159
Figura 47: gráfico comparativo do gasto nos cenários simulados.....	162
Figura 48: número de mobilizações das diferentes equipes do empreendimento X1.....	163
Figura 49: índice de utilização das equipes do empreendimento X1.....	164
Figura 50: esforço despendido na elaboração do PSP no empreendimento X2.....	175
Figura 51: seqüência de execução dos blocos do empreendimento X2.....	176
Figura 52: alocação de atividades às equipes de eletricitas.....	179
Figura 53: parte do diagrama de seqüência de execução do empreendimento X2 com o detalhamento da execução de <i>radiers</i>	179
Figura 54: linhas de balanço geradas a partir dos dados dos cenários 05 (acima) e 06 (abaixo).....	182
Figura 55: linhas de balanço dos cenários 09 (acima) e 10 (abaixo).....	183
Figura 56: linha de balanço final do empreendimento X2.....	184
Figura 57: diagrama de seqüência do empreendimento X2.....	185
Figura 58: planilha de controle de avanço físico do empreendimento X2.....	187
Figura 59: planilha de monitoramento da aderência ao PSP.....	188
Figura 60: exemplo de gráfico de avanço físico do empreendimento X2.....	189
Figura 61: esforço despendido na elaboração do PSP no empreendimento Y1.....	197
Figura 62: detalhe do diagrama de seqüência de execução padronizada para a unidade-base do empreendimento Y1.....	199
Figura 63: estratégia de ataque do empreendimento Y1.....	200
Figura 64: estudo dos fluxos de trabalho na fase 01 do empreendimento Y1.....	201
Figura 65: linha de balanço da execução das três fases do empreendimento Y1.....	203
Figura 66: estudo de leiaute do canteiro do empreendimento Y1.....	204
Figura 67: parte do modelo de simulação do empreendimento Y1.....	206
Figura 68: linha de balanço gerada para a fase 01 do empreendimento Y1.....	208
Figura 69: gráfico de Gantt da fase 01 do empreendimento Y1.....	209
Figura 70: exemplo de gráfico de controle de avanço físico do empreendimento Y1.....	210

Figura 71: linha de balanço gerada para a fase 02 do empreendimento Y1	210
Figura 72: esforço despendido na elaboração do PSP no empreendimento Y1	218
Figura 73: índices de produtividade considerados para o processo alvenaria nos três primeiros meses de execução	219
Figura 74: parte do diagrama de seqüência de execução elaborado para o empreendimento Y2	220
Figura 75: estratégia de execução do empreendimento Y2	221
Figura 76: estratégia de execução da infraestrutura do empreendimento Y2.....	222
Figura 77: detalhamento da sincronização proposta entre os processos de elevação de alvenaria e montagem de lajes	223
Figura 80: gráfico da necessidade de equipes de alvenaria (a) e blocos estruturais (b)	225
Figura 81: localização das bombas de argamassa industrializada	226
Figura 82: comparativo dos tempos utilizados nos cenários 01 e 02.....	227
Figura 83: linha de balanço do cenário 01 (determinístico)	228
Figura 84: linha de balanço do cenário 02 (estocástico).....	228
Figura 85: alocação dos blocos às equipes de produção no cenário 03.....	229
Figura 86: linha de balanço do cenário 03.....	230
Figura 87: linha de balanço do cenário 04.....	232
Figura 88: componente genérico de simulação proposto para a inserção de <i>buffers</i>	234
Figura 89: novos tempos de ciclo do processo de alvenaria (em dias).....	235
Figura 90: linha de balanço estocástica gerada para todos os processos do empreendimento Y2	235
Figura 91: linha de balanço estocástica para os processos de elevação de alvenaria e montagem de lajes.....	237
Figura 92: linha de balanço com a introdução do conceito de nivelamento.....	238
Figura 93: gráfico de Gantt com programação da montagem de lajes	239
Figura 94: visualização 3D da estratégia de ataque do empreendimento Y2	240
Figura 95: quadro-resumo do esforço despendido para a realização das etapas do PSP nos estudos de caso (EC) desta pesquisa	248
Figura 96: principais informações geradas no PSP nos estudos de caso (EC) desta pesquisa	252

Figura 97: pressões sobre o momento de início do PSP	267
Figura 98: modelo de elaboração do PSP proposto neste trabalho.....	269
Figura 99: estágios para a implementação da simulação no PSP em empresas construtoras.	274

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: cenários simulados.....	137
Tabela 02: duração do empreendimento nos três cenários simulados.....	160
Tabela 03: datas de conclusão média dos blocos do empreendimento no dois cenários simulados (valores para 30 replicações)	165
Tabela 04: lead times parciais e total do empreendimento X2 nos três cenários simulados ..	178
Tabela 05: sumário dos três cenários simulados.....	180
Tabela 06: sumário dos quatro novos cenários simulados.....	182
Tabela 07: comparativo das datas de conclusão nos cenários 01 e 02	229
Tabela 08: comparativo das datas de conclusão nos cenários 02 e 03	231
Tabela 09: comparativo das datas de conclusão nos cenários 02 e 04	233

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 MOTIVAÇÃO DO PESQUISADOR	20
1.2 PROBLEMA DE PESQUISA.....	21
1.2.1 O Projeto do Sistema de Produção na Construção Civil	21
1.2.2 Simulação na Gestão da Produção	25
1.3 QUESTÕES DE PESQUISA	30
1.4 PROPOSIÇÕES	31
1.5 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	32
1.6 CONTEXTO	32
1.7 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	33
1.8 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	33
2 PROJETO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO.....	35
2.1 INTRODUÇÃO.....	35
2.2 SISTEMAS DE PRODUÇÃO	35
2.2.1 Definição e Objetivos dos Sistemas de Produção	35
2.2.2 Classificação dos Sistemas de Produção	38
2.3 SISTEMAS DE PRODUÇÃO POR PROJETO	40
2.3.1 Definição de Sistema de Produção por Projeto	40
2.3.2 Gestão de Projetos	41
2.4 O PROJETO DO SISTEMA DE PRODUÇÃO NA INDÚSTRIA	46
2.4.1 As Atividades de Projeto na Gestão da Produção	46
2.4.2 Escopo de Decisões do Projeto do Sistema de Produção.....	48

2.5 O PROJETO DO SISTEMA DE PRODUÇÃO EM EMPREENDIMENTOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL	50
2.5.1 Modelo de PSP para Empreendimentos Habitacionais com Características Repetitivas	52
2.5.1.1 Definição da Seqüência de Execução e Dimensionamento dos Recursos de Produção da Unidade-Base	53
2.5.1.2 Estudo dos Fluxos de Trabalho da Unidade-Base	54
2.5.1.3 Definição da Estratégia de Execução do Empreendimento	55
2.5.1.4 Estudo dos Fluxos de Trabalho no Empreendimento	55
2.5.1.5 Dimensionamento da Capacidade dos Equipamentos e Mão-de-obra.....	55
2.5.1.6 Identificação e Projeto dos Processos Críticos	56
2.5.2 Modelo de PSP para Empreendimentos Complexos	56
2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
3 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO	60
3.1 INTRODUÇÃO.....	60
3.2 FORMAS DE ESTUDAR UM SISTEMA	60
3.3 MODELAGEM DE SISTEMAS	62
3.4 SIMULAÇÃO DE SISTEMAS.....	67
3.4.1 Classificação dos Estudos de Simulação	67
3.4.1.1 Simulação Determinística ou Estocástica	67
3.4.1.2 Simulação Estática ou Dinâmica	68
3.4.1.3 Simulação Discreta ou Contínua.....	68
3.4.2 Etapas do Processo de Simulação	69
3.4.2.1 Formular o Problema e Planejar o Estudo	70
3.4.2.2 Coletar Dados e Definir um Modelo.....	71
3.4.2.3 O Modelo é Válido?.....	72
3.4.2.4 Desenvolver o Modelo e Verificá-lo e Rodar Testes-piloto	73
3.4.2.5 O Modelo é Válido?.....	75
3.4.2.6 Projetar Experimentos	75
3.4.2.7 Rodar o Modelo e Analisar os Resultados.....	76
3.4.2.8 Documentar e Implementar os Resultados	76
3.4.3 Condições para um Estudo de Simulação Eficaz	77
3.5 MODELAGEM E SIMULAÇÃO INTERATIVA VISUAL.....	78
3.5.1 Vantagens e Desvantagens da Simulação Interativa Visual.....	82
3.5.1.1 Vantagens	82

3.5.1.2 Desvantagens	83
4 SIMULAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	85
4.1 INTRODUÇÃO.....	85
4.2 EMPREGO DA SIMULAÇÃO NA GESTÃO DA CONSTRUÇÃO.....	85
4.2.1 Programas de Simulação Desenvolvidos para a Construção Civil.....	86
4.2.2 Estudos de Simulação na Construção Civil.....	88
4.3 DIFICULDADES PARA O USO DE SIMULAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	90
4.3.1 Estimativas de Probabilidades na Ausência de Dados	90
4.3.2 Tempo de Desenvolvimento do Modelo	95
4.3.2.1 Reutilização de Modelos de Simulação.....	97
4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	99
5 MÉTODO DE PESQUISA	100
5.1 INTRODUÇÃO.....	100
5.2 ESTRATÉGIA DE PESQUISA.....	100
5.3 DELINEAMENTO DA PESQUISA.....	105
5.4 FASE EXPLORATÓRIA.....	109
5.4.1 Seleção do <i>Software</i> de Simulação.....	109
5.4.2 Treinamento do Pesquisador	112
5.4.3 Estudo Exploratório 1	113
5.4.3.1 Descrição da Empresa W	113
5.4.3.2 Descrição do Empreendimento W1	114
5.4.3.3 Descrição das Atividades Realizadas	114
5.5 FASE DE DESENVOLVIMENTO	115
5.5.1 Descrição das Empresas	115
5.5.1.1 Descrição da Empresa X.....	115
5.5.1.2 Descrição da Empresa Y.....	116
5.5.2 Descrição do Estudos de Caso 1.....	117

5.5.2.1 Descrição do Empreendimento X1	117
5.5.2.2 Descrição das Atividades Realizadas	119
5.5.3 Estudo de Caso 2	120
5.5.3.1 Descrição do Empreendimento X2	120
5.5.3.2 Descrição das Atividades Realizadas	121
5.5.4 Estudo de Caso 3	122
5.5.4.1 Descrição do Empreendimento Y1	122
5.5.4.2 Descrição das Atividades Realizadas	124
5.5.5 Estudo de Caso 4	125
5.5.5.1 Descrição do Empreendimento Y2	125
5.5.5.2 Descrição das Atividades Realizadas	127
5.6 FASE DE ANÁLISE E REFLEXÃO	128
5.7 MÉTODOS E TÉCNICAS DE COLETA E ANÁLISE DE DADOS	130
5.7.1 Observação Direta	131
5.7.2 Observação Participante	131
5.7.3 Análise de Documentos	132
5.7.4 Entrevistas	132
6 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA.....	134
6.1 INTRODUÇÃO.....	134
6.2 ESTUDO EXPLORATÓRIO.....	134
6.2.1 Conclusões do Estudo Exploratório	138
6.3 ESTUDO DE CASO 1	140
6.3.1 Elaboração do PSP do empreendimento	140
6.3.2 Descrição Detalhada das Atividades Realizadas	141
6.3.2.1 Desenvolvimento do Modelo de Simulação do Empreendimento X1	150
6.3.2.2 Emprego do Modelo de Simulação do Empreendimento	159
6.3.3 Avaliação do Estudo de Caso 1	166
6.3.3.1 Utilidade	166
6.3.3.2 Facilidade de Uso	171
6.4 ESTUDO DE CASO 2	174
6.4.1 Elaboração do PSP do empreendimento	174

6.4.2	DESCRIÇÃO DETALHADA DAS ATIVIDADES REALIZADAS	175
6.4.2.1	Ferramentas de Apoio à Operacionalização do PSP.....	184
6.4.3	Avaliação do Estudo de Caso 2.....	190
6.4.3.1	Utilidade	190
6.3.3.2	Facilidade de Uso	193
6.5	ESTUDO DE CASO 3	195
6.5.1	Elaboração do PSP do Empreendimento.....	195
6.5.1.1	Desenvolvimento da Fase Determinística do PSP.....	197
6.5.1.2	Desenvolvimento da Fase Dinâmica do PSP.....	205
6.5.2	Avaliação do Estudo de Caso 3.....	211
6.5.2.1	Utilidade	211
6.5.2.2	Facilidade de Uso	215
6.6	ESTUDO DE CASO 4	217
6.6.1	Elaboração do PSP do empreendimento	217
6.5.2.2	Desenvolvimento e Emprego do Modelo de Simulação do Empreendimento Y2	226
6.5.2.3	Elaboração de Ferramentas de Monitoramento	239
6.5.3	Avaliação do Estudo de Caso 4.....	240
6.5.3.1	Utilidade	240
6.5.3.2	Facilidade de Uso	244
7	O PSP E O EMPREGO DA SIMULAÇÃO COMO FERRAMENTA DE APOIO À TOMADA DE DECISÃO	247
7.1	INTRODUÇÃO.....	247
7.2	AVALIAÇÃO DO MODELO DE ELABORAÇÃO DO PROJETO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	247
7.2.1	Aderência ao Escopo de Decisões Previstas no Modelo de Elaboração .	247
7.2.2	Extensão do Processo e Esforço para a Elaboração do PSP.....	250
7.2.3	Informações Geradas Durante a Elaboração do PSP.....	252
7.2.4	Introdução e Discussão de Conceitos de Gestão da Produção na Elaboração do PSP	254
7.2.5	Funções e Produtos do PSP	256
7.3	AVALIAÇÃO DO EMPREGO DA SIMULAÇÃO NA ELABORAÇÃO DO PSP	259

7.3.1 Modelagem e Simulação na Elaboração do PSP	259
7.3.2 Nível de Detalhamento dos Modelos	261
7.3.3 Apoio da Visualização no Processo de Simulação.....	263
7.3.4 Reutilização de Modelos	264
7.3.5 Dificuldades de Implementação da Simulação no PSP	266
7.4 MODELO DE ELABORAÇÃO DO PSP UTILIZANDO SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COMO FERRAMENTA DE APOIO À TOMADA DE DECISÃO.....	268
7.4.1 Estágios de Implementação da Simulação no PSP.....	272
8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	276
8.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES	276
8.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	281
REFERÊNCIAS	283

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil tem sido apontada como um dos setores que menos se desenvolveu ao longo dos últimos anos. Segundo Assumpção (1996), o maior desafio para o setor relaciona-se à sua capacidade de modernizar-se, para que seus produtos tenham qualidade e os custos sejam compatíveis com as exigências do mercado, tornando imperativa a busca de soluções para a modernização tanto seus processos produtivos como procedimentos administrativos e gerenciais.

De acordo com o Plano Estratégico para Ciência, Tecnologia e Inovação na Área de Tecnologia do Ambiente Construído, “a modernização gerencial da construção passará pela compreensão e adaptação ao setor de conceitos e princípios de gestão da produção largamente utilizados em outros setores industriais, considerados mais avançados” (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2002). Neste sentido, segundo Koskela (1992), a industrialização pode oferecer um número de soluções para minimizar problemas crônicos da construção. Dessa forma, a manufatura tem sido um ponto de referência e uma fonte de inovações para a construção por muitas décadas (KOSKELA, 1992).

Contudo, existem dificuldades para adaptar conceitos e ferramentas desenvolvidos em ambientes de manufatura às situações de produção encontradas na construção civil (ASSUMPCÃO, 1996). Para Koskela (1992), a ineficácia na transposição dos princípios desenvolvidos em outros ambientes produtivos ocorre porque estes não foram suficientemente abstraídos e aplicados sob a consideração das peculiaridades intrínsecas do ambiente da construção civil.

De acordo com Bartezzaghi (1999), a partir da ascensão das empresas japonesas no mercado mundial, o chamado sistema de produção japonês tornou-se o ponto de referência para uma mudança radical nos conceitos e critérios para o projeto e a gestão de sistemas de produção, que vieram a estabelecer um novo paradigma de gestão da produção. Em função do impacto

do livro de Womack *et al.* (1992), a Produção Enxuta (*Lean Production*), entendida como uma abstração do Sistema Toyota de Produção, representa esse novo paradigma¹, tornando-se, dessa forma, bastante conhecido no meio acadêmico e profissional (BARTEZZAGHI, 1999).

1.1 MOTIVAÇÃO DO PESQUISADOR

Há alguns anos, os pesquisadores do Grupo de Gerenciamento e Economia da Construção (GEC) do Núcleo Orientado para Inovação da Edificação (NORIE) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) vêm desenvolvendo estudos sobre gestão da produção na construção civil, no sentido de entender e adaptar princípios e conceitos da Produção Enxuta à gestão da construção. Alguns destes estudos focaram-se no desenvolvimento de um modelo de planejamento e controle da produção (PCP), assim como um método para sua implantação, descrito por Bernardes (2001), que é baseado no sistema de controle *Last Planner* desenvolvido por Ballard e Howell (1997). A implementação deste modelo de PCP ao contexto dos empreendimentos habitacionais de interesse social, com características repetitivas, apontaram para a necessidade da antecipação das decisões relacionadas à concepção destes sistemas de produção, de forma semelhante ao que ocorre em outros setores industriais, atividade esta denominada de Projeto do Sistema de Produção (PSP).

Com base nessas evidências, este pesquisador propôs em sua dissertação de mestrado (SCHRAMM, 2004) um modelo para elaboração do Projeto do Sistema de Produção em Empreendimentos Habitacionais de Interesse Social (EHIS). Além da consideração do PSP como um processo anterior à etapa de execução, o modelo prescreveu também um escopo de decisões, uma seqüência de elaboração, além de algumas ferramentas para auxiliar sua consecução.

Posteriormente, Rodrigues (2006) buscou avaliar o emprego do referido modelo adaptando-o ao contexto de empreendimentos com características complexas. Ao contrário dos EHIS, nos quais os sistemas de produção, além da repetitividade, caracterizam-se ainda pelo baixo nível de incerteza quanto às características do produto e à demanda, os empreendimentos

¹ Não existe consenso de que a produção enxuta descreve totalmente o novo paradigma de gestão da produção (FORMOSO, 2000). De acordo com Bartezzaghi (1999), diferentes modelos e práticas de produção têm sido propostos como representativos do novo paradigma, sendo que alguns deles têm contribuído para o desenvolvimento de um conjunto de conceitos e princípios comuns que podem ser utilizados para descrever o novo paradigma. Dessa forma, a produção enxuta pode ser considerada como um desses modelos, não devendo ser confundida com o próprio paradigma de gestão da produção.

complexos caracterizam-se principalmente pela rapidez de execução, aliados à incerteza nos requisitos dos clientes quanto às características do produto e a interdependência entre seus processos.

Entretanto, não houve, desde a publicação destes estudos, outros estudos acadêmicos que avaliassem a utilidade do referido modelo, ou do modelo adaptado, em contextos distintos àqueles a partir dos quais esses modelos foram propostos, embora tenha havido sua implementação prática em diversos empreendimentos, a partir de programas de capacitação e treinamento junto a empresas em diferentes estados brasileiros.

Além disto, uma característica comum aos dois trabalhos é que ambos utilizaram apenas dados de caráter determinístico, ou seja, por uma questão de simplificação na modelagem dos problemas em estudo não foi considerada a variabilidade inerente aos processos produtivos, bem como avaliado o impacto desta. Em função destas limitações, este pesquisador apontou em seu trabalho de 2004 algumas lacunas de conhecimento a serem abordadas em trabalhos futuros: estender a elaboração do PSP a outros empreendimentos, tanto repetitivos como não-repetitivos; avaliar os impactos da variabilidade dos processos de produção, empregando dados estocásticos na elaboração do PSP; e utilizar técnicas de modelagem e simulação de sistemas de produção, especialmente na geração e discussão de alternativas de organização do sistema de produção. Desta forma, o presente trabalho representa uma continuidade natural do desenvolvimento do referido modelo, propondo o uso da simulação como uma ferramenta de apoio à tomada de decisão na elaboração do projeto do sistema de produção em empreendimentos da construção civil.

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

1.2.1 O Projeto do Sistema de Produção na Construção Civil

O Projeto do Sistema de Produção (PSP) representa uma das primeiras tarefas gerenciais a ser realizada no início de qualquer esforço produtivo (BALLARD *et al.*, 2001), consistindo na primeira oportunidade para combater ou atenuar características negativas inerentes aos sistemas de produção, como a variabilidade (KOSKELA, 2000). Para Slack *et al.* (1997), o PSP pode ter um impacto substancial na habilidade da função produção em atender às necessidades de seus consumidores. Segundo os referidos autores, seus objetivos gerais são:

- a) prover recursos adequados, capazes de produzir o produto conforme suas especificações de projeto;
- b) melhorar o fluxo de materiais e informações através do sistema;
- c) fornecer tecnologia e pessoal adequados e confiáveis;
- d) assegurar alta utilização dos recursos e, portanto, processos eficientes e de baixo custo;
- e) promover a flexibilidade do sistema, de forma que seus recursos possam ser rapidamente modificados de forma a criar uma gama de produtos.

No caso da construção civil, o PSP tem geralmente recebido pouca atenção, tanto pela comunidade acadêmica como pelo meio técnico. Do ponto de vista acadêmico, pouco tem sido publicado a respeito do PSP na construção civil. Diversos autores abordam temas referentes ao PSP, sendo que alguns trabalhos versam especificamente sobre o tema (HOWELL; BALLARD, 1999; BALLARD, 1999; BALLARD *et al.*, 2001; 2001a), enquanto outros versam sobre decisões que, isoladamente ou em conjunto, são pertinentes ao seu escopo (BIRREL, 1980; MENDES JR.; HEINECK, 1998; SAFFARO; PAULA, 2002). Paradoxalmente, há mais de três décadas, Halpin e Woodhead (1976) apontavam esta deficiência, afirmando que, tradicionalmente, as decisões que formam o escopo do PSP não são consideradas antecipadamente, mas deixadas a cargo do pessoal operacional durante a fase de execução.

Conforme Martinez (1996), durante o projeto de sistemas de produção da construção torna-se necessário tomar decisões que incluem, por exemplo, a determinação do tamanho de equipes, seleção de equipamentos, definição da lógica da operação e seleção de métodos de construção, considerando todos os cenários possíveis a partir de diferentes combinações dessas decisões. Entretanto, do ponto de vista prático, para que se possa desenvolver um projeto do sistema de produção, qualquer que seja o setor produtivo ao qual pertença, deve-se considerar alguns fatores que caracterizam a natureza dos sistemas de produção e que contribuem para o aumento da sua complexidade. Entre estes fatores, pode-se citar a variabilidade, a incerteza, a interdependência e a interconectividade (BENNET; ORMEROD, 1984; GIDADO, 1996; ROBINSON, 2003).

Wijesundera, Olomolaiye e Harris (1991) e AbouRizk, Halpin e Wilson (1994) afirmam que os processos de construção estão sujeitos a uma ampla variedade de flutuações e interrupções. Variações nas condições climáticas, o efeito aprendizagem em operações repetitivas, quebras de equipamentos, interferência dos gerentes e outros fatores externos podem impactar os processos de construção.

Gidado (1996) ilustra quatro causas para a incerteza na execução de processos da construção: (a) o gerente não está familiarizado com os recursos e o ambiente locais; (b) falta de completa especificação para as atividades de produção no canteiro; (c) falta de uniformidade dos materiais, trabalho e equipes, no que diz respeito a lugar e tempo – todo empreendimento é único; e (d) imprevisibilidade do ambiente.

Segundo Thompson (1967), há três tipos de interdependência: (a) a compartilhada, quando o resultado combinado de duas ou mais entidades é um pouco maior do que a sua soma; (b) a seqüencial, quando o produto de uma operação depende de uma ou mais operações precedentes; e (c) a recíproca, quando o relacionamento de dependência entre duas ou mais operações acontece nos dois sentidos, ou seja, uma operação interdependente reciprocamente afeta e é afetada por uma ou mais operações, requerendo um ajuste mútuo para sua coordenação.

Na construção civil, três fatores estão relacionados à interdependência, na percepção de Gidado (1996): (a) o número de tecnologias e a interdependência entre elas; (b) a rigidez da seqüência entre as várias operações; e (c) a superposição de estágios ou elementos da construção.

Robinson (2003) afirma que os sistemas de produção são também interconectados. Componentes do sistema não trabalham de forma isolada, mas afetam uns aos outros². Qualquer mudança em alguma parte do sistema leva a uma mudança em outra parte desse mesmo sistema. Ainda, segundo Robinson (2003), torna-se difícil prever os efeitos da interconectividade em um sistema, especialmente quando há também variabilidade presente.

Ainda de acordo com Robinson (2003), as interconexões em sistemas de produção não são freqüentemente unidirecionais e, assim, estruturas com *loops* e *feedbacks* são comuns. Por

² Esta característica apontada por Robinson (2003) vai ao encontro do descrito na Teoria dos Sistemas, conforme discutido por Forrester (1990).

exemplo, materiais e informação freqüentemente fluem em direções opostas³. Em alguns casos as estruturas de retroalimentação são muito complexas, envolvendo muitos componentes do sistema (ROBINSON, 2003).

Outro fator que, de certa forma relaciona-se ao demais, é a complexidade⁴. Segundo Robinson (2003), a complexidade pode relacionar-se ao número de componentes do sistema ou ao número de possíveis combinações entre estes componentes, o que representa uma complexidade combinatória, ou surgir a partir da interação entre seus componentes ao longo do tempo, não importando o tamanho do sistema, chamada de complexidade dinâmica. Sistemas altamente interconectados podem apresentar complexidade dinâmica (ROBINSON, 2003).

A natureza complexa dos sistemas de produção da construção civil tem sido apontada e discutida por diversos autores, entre os quais Gidado (1996) e Williams (1999; 2002). Para Gidado (1996) há duas perspectivas, com relação à complexidade na indústria da construção: (a) a perspectiva gerencial, que envolve a tarefa de consolidar numerosas atividades para formar um fluxo de trabalho; e (b) a perspectiva operacional e tecnológica, que se refere às características técnicas ou às dificuldades de execução de cada processo, ocasionadas pelos recursos utilizados ou pelo ambiente no qual o sistema de produção está inserido.

Segundo Williams (1995⁵ *apud* WILLIAMS, 2002), há duas causas concorrentes para o aumento da complexidade dos empreendimentos. A primeira refere-se ao aumento da complexidade dos produtos, que conduz a empreendimentos mais complexos. A segunda é que os empreendimentos têm se tornado cada vez mais restritos em relação ao prazo de execução, tornando a velocidade de execução do empreendimento um elemento importante na concorrência por novos negócios, em um ambiente no qual penalidades e multas por atrasos tornam-se cada vez maiores.

³ Em uma cadeia de suprimentos o fluxo do produto move-se na direção do consumidor enquanto a informação sobre seus pedidos move-se na direção dos produtores.

⁴ É bastante difícil conceituar complexidade, assim como mensurá-la (WILLIAMS, 1999). Neste trabalho, considera-se que complexidade é um construto formado por uma série de variáveis. Entre elas estão a variabilidade, a incerteza, a interdependência, a interconectividade que, isolada ou conjuntamente, concorrem para a maior ou menor complexidade de um sistema de produção.

⁵ WILLIAMS, T. M., *Holistic Methods in Project Management*. In: *Internet Symposium, St. Petesburg, 1995. Proceedings...* St. Petersburg: [s.n.], 1995. p. 332–336.

1.2.2 Simulação na Gestão da Produção

A simulação consiste em uma técnica para avaliar o comportamento dos sistemas de produção, considerando todos os fatores que condicionam o seu comportamento. Refere a um amplo conjunto de métodos e aplicativos utilizados para reproduzir o comportamento de sistemas reais, usualmente em computador e com um *software* apropriado (KELTON; SADOWSKI; STURROCK, 2004).

Martinez (1996) afirma que esta técnica é bastante conveniente para o estudo de sistemas de produção, porque, além de realística, também é rápida, flexível e de baixo custo (se comparada à experimentação com o sistema real). Outra razão para seu uso é que um modelo de simulação pode se tornar complexo se for necessário, enquanto outros métodos podem requerer uma grande simplificação nas premissas sobre o sistema para permitir uma análise, podendo colocar a validade do modelo sob suspeita (KELTON; SADOWSKI; STURROCK, 2004).

Por meio de modelos de simulação pode-se representar a complexidade de um sistema de produção (ROBINSON, 2003). Dessa forma, conforme Welgama e Mills (1995) e Freitas Filho (2008), a simulação é uma importante ferramenta de análise para aqueles responsáveis por projetar e operar sistemas complexos. Segundo Robinson (2003), por se tratar de uma técnica que reproduz o comportamento operacional do sistema sob estudo, torna possível a comparação de projetos alternativos e a determinação do efeito de diferentes políticas no seu desempenho.

Para Law e Kelton (2000), o benefício mais importante do uso da simulação em um ambiente de manufatura é que esta permite a um gerente ou engenheiro obter uma visão sistêmica do efeito que mudanças locais ocasionam no sistema de produção. De acordo com Shi (1999), a simulação de processos de construção é uma técnica efetiva para planejamento e a melhoria de desempenho dos processos de construção. Comparado com os métodos tradicionais de planejamento (como CPM – *critical path method*, por exemplo), a simulação computacional apresenta uma série de vantagens (SHI, 1999):

- a) *modelagem de recursos*: muitas características importantes dos recursos podem somente ser modeladas através da técnica de simulação. Entre estas características estão: (a) o papel ativo dos recursos no desenvolvimento das operações de construção; (b) relacionamento entre o progresso real da

construção e os recursos envolvidos, dadas diferentes taxas de produtividade destes recursos; e (c) recursos compartilhados simultaneamente por múltiplas atividades;

b) *dinâmica*: uma operação de construção é um processo dinâmico envolvendo interações dinâmicas entre atividades e processos e entre atividades e recursos. Assim, através da simulação é possível a modelar o comportamento dinâmico das operações de construção;

c) *aleatoriedade*: operações de construção são afetadas por muitos fatores aleatórios, tais como o status operacional de equipamentos e as condições climáticas (chuva). A simulação possibilita que estes fatores sejam incorporados no planejamento da construção.

Entretanto, embora a simulação tenha se desenvolvido extensivamente e venha sendo amplamente utilizada como uma técnica de apoio à decisão na gestão da manufatura e operações de negócios, seu uso no setor da construção tem, em geral, permanecido restrito à academia (SANTOS, 2001; HAJJAR; ABOURIZK, 2002) ou a um pequeno número de empresas construtoras de grande porte, que podem arcar com os custos da manutenção de profissionais dedicados à construção de modelos de simulação (HAJJAR; ABOURIZK, 2002).

De acordo com Shi e AbouRizk (1997) e Hajjar e AbouRizk (2002), os primeiros esforços para a utilização de simulação na construção podem ser atribuídos a Halpin (1973)⁶, que a popularizou com o desenvolvimento do sistema CYCLONE⁷. Esse sistema permitia ao usuário construir modelos usando um conjunto de construtos abstratos e simples (HAJJAR; ABOURIZK, 2002). Embora o sistema CYCLONE e demais sistemas que nele se basearam, como o INSIGHT (PAULSON, 1978), UM-CYCLONE (IOANNOU, 1989), RESQUE (CHANG, 1987), COOPS (LIU; IOANNOU, 1992), DISCO (HUANG; GRIGORIADIS; HALPIN, 1994), CIPROS (TOMMELEIN; ODEH, 1994), STROBOSCOPE (MARTINEZ; IOANNOU, 1994) e o HSM (SAWHNEY; ABOURIZK, 1995) tenham introduzido a comunidade acadêmica da construção à simulação computacional, seu uso prático na indústria também tem sido limitado (SHI; ABOURIZK, 1997; HAJJAR; ABOURIZK, 2002). Desta

⁶ HALPIN, D. W. An Investigation of the Use of Simulation Networks for Modeling Construction Operations, 1973. Ph.D. Thesis – University of Illinois at Urbana-Champaign, 1973.

⁷ CYCLONE é um anacronismo de CYCLic Operational Network.

forma, segundo Halpin e Martinez (1999), um dos principais usos da simulação é a avaliação de empreendimentos de construção, em análises *ex post*, uma vez que não tem sido empregada para a tomada de decisão durante a etapa de construção em empreendimentos reais.

Embora Shi (1999) afirme que a simulação figura como uma das últimas opções entre as várias ferramentas disponíveis para o planejamento da construção, ao menos com base no número de estudos científicos quem vem sendo publicados, esta situação parece estar mudando.

A partir da análise dos anais das últimas cinco edições (2004 a 2008) da *Winter Simulation Conference*⁸ percebe-se que tem havido um incremento no número de artigos sobre simulação aplicada à construção, principalmente nos últimos dois anos. Enquanto nas edições entre os anos de 2004 e 2006 os artigos sobre o uso de simulação na construção representavam em torno de 3,0% de todos os artigos publicados naquelas conferências, nos anos de 2007 e 2008 houve um aumento de aproximadamente 100% no número de artigos publicados na área da construção, passando a representar 6,4% e 5,8% de todos os artigos publicados, respectivamente.

Com relação ao objeto dos estudos, na sua grande parte dos artigos publicados no WSC referem-se ao projeto de processos ou operações de construção, como operações de movimentação de terra (HAJJAR; ABOURIZK, 1997; KANNAN; MARTINEZ; VORSTER, 1997; MARTINEZ, 1998; KANNAN *et al.*, 1999; MARZOUK; MOSELHI, 2000; KANNAN *et al.*, 2000; MARZOUK; MOSELHI, 2002), construção de túneis (GUNAL; VERN, 1998; BALBONTIN-BRAVO, 1998; RUWANPURA; ABOURIZK, 2001; IOANNOU; LIKHITRUANGSILP, 2005; AL-BATTAINEH *et al.*, 2006) e fabricação de pré-fabricados (SHI *et al.*, 1998; RUWANPURA *et al.* 1999; MARASINI; DAWOOD, 2002), por exemplo.

Desta forma, em geral, os estudos aplicando simulação na construção têm focado em operações ou processos considerados de forma isolada. Pouco tem sido escrito sobre o uso de simulação para projetar sistemas de produção e até agora esses estudos têm ou utilizado simulação para testar proposições em sistemas teóricos (DRAPER; MARTINEZ, 2002) ou em sistemas reais, mas em análises do tipo *ex post* (ALVES; TOMMELEIN; BALLARD, 2006).

⁸ A *Winter Simulation Conference* é um dos mais importantes encontros internacionais na área de simulação discreta. Todos os artigos com texto completo das últimas dez edições podem ser acessados no *website* <<http://www.wsc.org>> .

Assim, na prática, não há estudos que tenham utilizado simulação para efetivamente auxiliar o tomador de decisão a projetar e implementar sistemas de produção reais na construção. Alguns motivos põem ser apontados como relacionados ao pequeno desenvolvimento da técnica de simulação na construção civil, entre as quais estão:

- a) a complexidade dos processos e a dificuldade de gerar modelos desses processos (OLOUFA; IKEDA; NGUYEN, 1998; SANTOS, 2001);
- b) o aumento no tempo de elaboração dos modelos em função da sua complexidade (SHI; ABOURIZK, 1997);
- c) a necessidade de um usuário bem preparado, a partir de um treinamento técnico que possibilite o conhecimento necessário para a condução do experimento, o que pode requerer meses ou mesmo anos (SHI; ABOURIZK, 1998; SHI, 1999);
- d) a necessidade de que o usuário compreenda a dinâmica e as características estocásticas dos processos sob estudo, ou seja, possua conhecimento estatístico para entender e interpretar os resultados da simulação (ZHANG; SHI; TAM, 2002);
- e) a falta de confiança na seleção subjetiva de uma Função de Distribuição de Probabilidade (FDP) para a duração de atividades, em função da natureza imprevisível dos processos de construção (FENTE; KNUTSON; SCHEXNAYDER, 1999);
- f) o modelo de simulação freqüentemente é percebido como uma “caixa-preta”, o que dificulta o seu entendimento e acreditação por parte dos usuários (SHI; ZHANG, 1999).

Shi e AbouRizk (1998) reiteraram o potencial do emprego da simulação na gestão de empreendimentos da construção. Entretanto, segundo esses autores, há ainda a necessidade de estudos que busquem tornar a simulação uma ferramenta de utilização mais ampla neste setor, principalmente reduzindo o tempo de desenvolvimento dos modelos e tornando a simulação mais amigável ao usuário. Nesse sentido, Shi e AbouRizk (1998) apontaram duas tendências: a modelagem e simulação empregando elementos gráficos e de visualização e a reutilização de modelos de simulação.

O emprego de elementos gráficos na modelagem e simulação de sistemas foram conceitos propostos inicialmente por Hurrion em 1986, com o objetivo de facilitar o processo de modelagem e simulação, além de permitir a interação do usuário. Desta forma, segundo Wagner, Freitas e Wagner (1996), o processo de desenvolvimento de um modelo de um sistema sob investigação, incorporando um método de animação do modelo e oferecendo uma interação com o modelo a fim de explorar decisões estratégicas alternativas é chamado de Modelagem Interativa Visual (VIM – *Visual Interactive Modelling*), enquanto o processo de simulação utilizando este conceito é conhecido como Simulação Interativa Visual (VIS – *Visual Interactive Simulation*) (WAGNER; FREITAS; WAGNER, 1996).

Ainda segundo Wagner, Freitas e Wagner (1996), enquanto a VIS se concentra nas necessidades do usuário do modelo, VIM concentra-se no construtor do modelo de simulação. Algumas das principais vantagens destes conceitos são:

- a) estimulam a criatividade e *insights*, promovendo um processo de “gerar e testar” que facilita um ciclo rápido de aprendizagem (Belton; Elder, 1991⁹ *apud* RODRIGUES; MACKNESS, 1998);
- b) contribuem para tornar um modelo de simulação mais transparente, permitindo ao usuário pode visualizar as interações dinâmicas durante o processo de simulação (SHI; ZHANG, 1999);
- c) possibilitam o controle da simulação, ou seja, há a visualização de dados intermediários e capacidade de interação com o modelo durante o transcorrer da simulação (WAGNER, FREITAS; WAGNER, 1996);
- d) as interfaces gráficas simplificam o processo de modelagem, permitindo ao usuário ver e manipular o modelo sem ter que editar representações textuais (HAJJAR; ABOURIZK, 2002).

No setor da construção civil, a utilização da modelagem gráfica, ou modelagem visual, vem sendo aplicada à construção civil por alguns autores (OLOUFA; IKEDA; NGUYEN, 1998; ABOURIZK; HAJJAR, 1998; HAJJAR; ABOURIZK, 1999; SHI, 1999; HONG *et al.*, 2002;

⁹ BELTON, V., ELDER, M. Decision Support Systems: learning from visual interactive modeling. **Working paper**. IFORS SPC on Decision Supporting Systems. Burges: [s.n], 1991.

NASEREDDIN; MULLENS; COPE, 2007), demonstrando uma tendência crescente da aplicação desta técnica no setor em função de seus benefícios potenciais.

O emprego de modelos reutilizáveis é uma estratégia utilizada para a redução do tempo de desenvolvimento de modelos (ROBINSON *et al.*, 2004). A reutilização de modelos está baseada na formação de bibliotecas de modelos genéricos de simulação que incluam processos amplamente utilizados (SHI; ABOURIZK, 1998).

Segundo Mackulak, Lawrence e Colvin (1998), um modelo genérico é um modelo aplicável a um grande conjunto de sistemas, mas ainda suficientemente preciso para distinguir entre critérios de desempenho críticos. Assim, segundo Nasereddin, Mullens e Cope (2007), o modelo torna-se específico quando os dados para um sistema particular são inseridos. As principais vantagens apontadas por estes autores são: (a) elimina grande parte do tempo do processo de desenvolvimento; (2) é livre de falhas; (c) o código foi otimizado para rodar mais rapidamente; e (d) pode ser consistentemente utilizado em vários sistemas de uma mesma área de aplicação.

Entretanto, embora o emprego destas bibliotecas seja possível, sua maior limitação reside no fato de que estas bibliotecas devam considerar todas as possíveis necessidades dos usuários em termos de modelos de simulação, o que tende a ser difícil, em função da característica de unicidade das operações de construção o que, dessa forma, representa um desafio a ser perseguido (SHI; ABOURIZK, 1998).

1.3 QUESTÕES DE PESQUISA

Com base nos aspectos anteriormente discutidos, percebe-se que embora relevante, a elaboração do Projeto do Sistema de Produção na gestão de empreendimentos da construção civil tem sido pouco estudada. Da mesma forma, reconhecem-se as potencialidades do uso da simulação como uma ferramenta de apoio à tomada de decisão nesta indústria, em especial na etapa de PSP, mas a mesma continua sendo pouco empregada no setor, em decorrência de uma série de dificuldades de implantação já discutidas. Por outro lado, quando empregada, a simulação tem sido utilizada, na grande maioria das vezes, no estudo de processos ou operações isoladas, havendo uma carência de estudos que abordem o estudo dos empreendimentos do ponto de vista de um sistema de produção.

Assim, levando em conta estes aspectos, foi definida a seguinte questão principal de pesquisa:

- como elaborar o projeto do sistema de produção de empreendimentos da construção civil utilizando conceitos de modelagem e simulação computacional como ferramenta de apoio à tomada de decisão?

Como desdobramento da questão principal, as seguintes questões secundárias foram definidas:

- quais são os benefícios e dificuldades da utilização da simulação no processo de elaboração do PSP em empreendimentos da construção civil?
- como desenvolver e utilizar modelos de simulação durante a elaboração do PSP em empreendimentos da construção civil, tendo em vista suas peculiaridades?
- como reduzir o tempo de desenvolvimento dos modelos e, conseqüentemente, do PSP?
- como aumentar a compreensão por parte dos envolvidos acerca dos resultados dos modelos de simulação?
- como o uso da simulação pode contribuir para a aplicação de conceitos de gestão da produção relacionados à filosofia produção enxuta?

1.4 PROPOSIÇÕES

Foram estabelecidas as seguintes proposições para esta pesquisa:

- a) a utilização da simulação no processo de elaboração do PSP permite a geração e exploração de diversas alternativas de configuração do sistema de produção do empreendimento, além de considerar os impactos da variabilidade inerente aos processos produtivos de forma sistêmica;
- b) o emprego de modelos reutilizáveis, quando aplicável, pode contribuir para a redução do tempo de desenvolvimentos dos modelos;

- c) o emprego de ferramentas de visualização pode contribuir para um melhor entendimento do modelo e resultados da simulação, contribuindo para um maior envolvimento do gerente de produção do empreendimento no processo de desenvolvimento do modelo;

1.5 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo geral deste trabalho consiste em *propor um modelo para a elaboração do Projeto do Sistema de Produção de empreendimentos da construção civil a partir da utilização da simulação computacional como ferramenta de apoio à tomada de decisão*, tomando como ponto de partida um modelo anteriormente desenvolvido.

Com vistas à consecução deste objetivo principal foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- analisar o papel do PSP na gestão de empreendimentos da construção civil;
- avaliar o emprego da simulação no Projeto de Sistemas de Produção da construção, tendo em vista suas características peculiares;
- propor e avaliar a adoção da estratégia de reutilização de modelos como forma de reduzir o tempo de desenvolvimento do PSP nos empreendimentos de um mesmo nicho de mercado;

1.6 CONTEXTO

Este trabalho encontra-se inserido em dois projetos de pesquisa. O primeiro intitula-se “Simulação da Produção para Apoio à Tomada de Decisão na Indústria da Construção” (SPATIA), financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande (FAPERGS), iniciado em maio de 2006. O objetivo geral do projeto SPATIA é o de “*propor um método para a adaptação de técnicas de simulação computacional, em especial Simulação Interativa Visual, ao contexto da gestão da produção de empreendimentos da construção civil*”.

O segundo é intitulado “Técnicas Computacionais no Apoio à Gestão de Empreendimentos Habitacionais de Interesse Social” (GEHISTEC), financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), através do Programa Sul-Americano de Apoio às Atividades de Cooperação em Ciência e Tecnologia (PROSUL). O objetivo geral desse projeto é o de *“promover o intercâmbio de conhecimentos e experiências entre grupos de pesquisa do Brasil, Chile e Colômbia, acerca da adaptação e emprego de técnicas computacionais no apoio à gestão de empreendimentos habitacionais de interesse social em diferentes estágios de produção, desde o projeto do sistema de produção como durante a sua execução”*.

1.7 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

Todos os estudos de caso que compõem este trabalho foram desenvolvidos em empreendimentos habitacionais com características repetitivas. Tendo em vista esta limitação, não se pode generalizar seus resultados, especialmente as diretrizes propostas, para empreendimentos pertencentes a diferentes contextos na construção civil.

1.8 ESTRUTURA DO TRABALHO

Além do presente capítulo, no qual foram apresentados o tema, o problema, as questões, objetivos, proposições e delimitações do estudo, este trabalho é composto por mais sete capítulos.

O capítulo 2 apresenta as principais definições relativas a sistemas de produção. Com base na abordagem de sistemas, são apresentados diversos conceitos de sistema de produção e caracterizado o sistema de produção da construção civil. Após, apresenta-se o modelo de elaboração do Projeto do Sistema de Produção em empreendimentos habitacionais de interesse social proposto por Schramm (2004), bem como o trabalho de Rodrigues (2006), que adaptou o modelo ao contexto de empreendimentos com características complexas.

No capítulo 3 são tratados assuntos relativos à simulação, em especial sobre a Simulação Interativa Visual, principais características, vantagens e desvantagens.

O capítulo 4 apresenta a evolução do uso da simulação na construção civil, bem como discute algumas técnicas que podem auxiliar a contornar algumas dificuldades na sua utilização neste setor, quais sejam: técnicas de explicitação de probabilidades subjetivas, técnicas de simulação evolutiva e modular e de reuso de modelos.

O capítulo 5 apresenta o método de pesquisa utilizado no trabalho, descrevendo a estratégia e o método de pesquisa adotados, o delineamento e a descrição das diferentes fases da pesquisa, bem como os métodos e técnicas utilizados para a coleta e análise dos dados.

No capítulo 6 descreve-se o estudo exploratório e os quatro estudos de caso realizados e discute-se seus resultados individuais.

No capítulo 7, a partir de uma análise cruzada dos resultados obtidos nos estudos realizados, discute-se os resultados do estudo, propondo-se um modelo para elaboração do PSP a partir da utilização da simulação computacional como uma ferramenta de apoio à tomada de decisão.

Por fim, no capítulo 8, apresenta-se um resumo das principais conclusões e avalia-se o atendimento aos objetivos deste trabalho. Ainda, apresenta-se uma série de sugestões para a realização de trabalhos futuros acerca do tema deste trabalho.

2 PROJETO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO

2.1 INTRODUÇÃO

Este trabalho refere-se a sistemas de produção da construção civil. Mesmo como um tipo específico de sistema, os sistemas de produção compartilham as mesmas definições, características e comportamentos comuns a qualquer outro sistema. Desta forma, é importante situar os sistemas de produção no contexto da Teoria dos Sistemas e da forma como devem ser encarados e gerenciados.

Assim, neste capítulo, a partir de uma breve discussão acerca da abordagem sistêmica e das vantagens de sua utilização, são apresentados alguns conceitos de sistema de produção, a partir dos quais é estabelecido o conceito de sistema de produção adotado neste trabalho. A seguir, caracteriza-se o sistema de produção da construção civil, de acordo com a classificação baseada na relação ente *mix* de produção e estrutura dos processos, bem como formas de gerenciá-lo.

Ainda, busca-se situar o Projeto do Sistema de Produção como uma das atividades de gestão da produção, conceituando-o e definindo o escopo de decisões que devem ser tomadas na sua realização. Finalmente, apresenta-se e discute-se o modelo proposto anteriormente por este pesquisador para elaboração do PSP em empreendimentos da construção civil que servirá de ponto de partida para este trabalho.

2.2 SISTEMAS DE PRODUÇÃO

2.2.1 Definição e Objetivos dos Sistemas de Produção

Segundo Meredith e Shafer (2002), pensar de forma sistêmica traz uma série de vantagens. Primeiro, permite concentrar-se na interação entre os seus componentes individuais,

oferecendo um quadro amplo e completo de toda a situação. Segundo, ao enfatizar as relações entre os seus vários componentes, reduz-se a propensão a subotimização do sistema global, que ocorre quando apenas parte do sistema é melhorada em detrimento de outras partes do mesmo (MEREDITH; SHAFER, 2002).

Hopp e Spearman (1996) definem um sistema de produção¹⁰ como uma rede de processos, orientados por um objetivo, através da qual entidades fluem. Ainda segundo Hopp e Spearman (1996), alguns aspectos importantes desta definição devem ser considerados:

- a) o objetivo do sistema de manufatura está geralmente relacionado à lucratividade;
- b) os processos podem representar tanto processos físicos como aqueles processos que suportam a função produção;
- c) as entidades não são apenas as partes sendo manufaturadas, mas também a informação utilizada para controlar o sistema;
- d) o fluxo de entidades através do sistema descreve como materiais e informações são processadas e o gerenciamento destes fluxos é a principal atividade do gerenciamento da produção;
- e) o gerenciamento das interações entre os processos é mais importante do que o gerenciamento de processos e entidades individualmente.

Três aspectos podem ser ressaltados com base na definição apresentada por Hopp e Spearman (1996): (a) a visão de produção como um fluxo; (b) as interações entre os diversos processos que constituem o sistema de produção; e (c) a existência de um objetivo a alcançar.

Outros autores também apresentam definições de sistemas de produção, mas que se baseiam na descrição de seus elementos constituintes. Askin e Goldberg (2002), assim como Elsayed e Boucher (1994), por exemplo, definem sistema de produção como o conjunto de recursos

¹⁰ Hopp e Spearman (1996) utilizam o termo sistema de manufatura, ao invés de sistema de produção ao longo de seu livro “Factory Physics”. Dessa forma buscam enfatizar que seu foco restringe-se apenas à produção de bens tangíveis, excluindo dessa forma outras formas de produção como, por exemplo, a prestação de serviços. Assim, o termo sistema de manufatura, utilizado pelos autores, tem um significado semelhante ao termo “sistema de produção”, utilizado pelos demais autores referenciados, que não fazem tal distinção (ELSAYED; BOUCHER, 1994; BLACK, 1998; MEREDITH; SHAFER, 2002; ASKIN; GOLDBERG, 2002), bem como por este trabalho.

(trabalhadores, energia, equipamentos e informação) e procedimentos envolvidos na conversão de matérias-primas em produtos acabados e sua entrega aos consumidores.

Entretanto, embora constituídos pelos mesmos elementos, cada sistema de produção em particular é caracterizado pela forma como estes elementos são organizados (ELSAYED; BOUCHER, 1994). Para os mesmos autores, três elementos são fundamentais em um sistema de produção:

- a) a base tecnológica utilizada, representada por máquinas ou ferramentas, que representa uma das mais importantes decisões de longo prazo realizadas pela empresa;
- b) a organização física do sistema de produção, ou seja como trabalhadores e máquinas são organizados para a consecução dos produtos, relacionando-se ao layout das instalações;
- c) as técnicas de gestão da produção utilizadas para a análise e o controle do sistema, já que para efetivamente utilizar a base tecnológica e a organização da produção é necessário determinar quais os produtos, quando e em que quantidades serão produzidos.

Meredith e Shafer (2002) apresentam uma descrição mais ampliada dos sistemas de produção, que explicita seus elementos constituintes e a forma como estes se relacionam. Segundo esses autores, um sistema de produção pode ser definido em termos do ambiente no qual este se insere, de seus insumos, de um sistema de transformação, de seus produtos e dos mecanismos utilizados para o monitoramento e controle do sistema de produção. A representação do sistema de produção proposta por Meredith e Shafer (2002) é apresentada na figura 01.

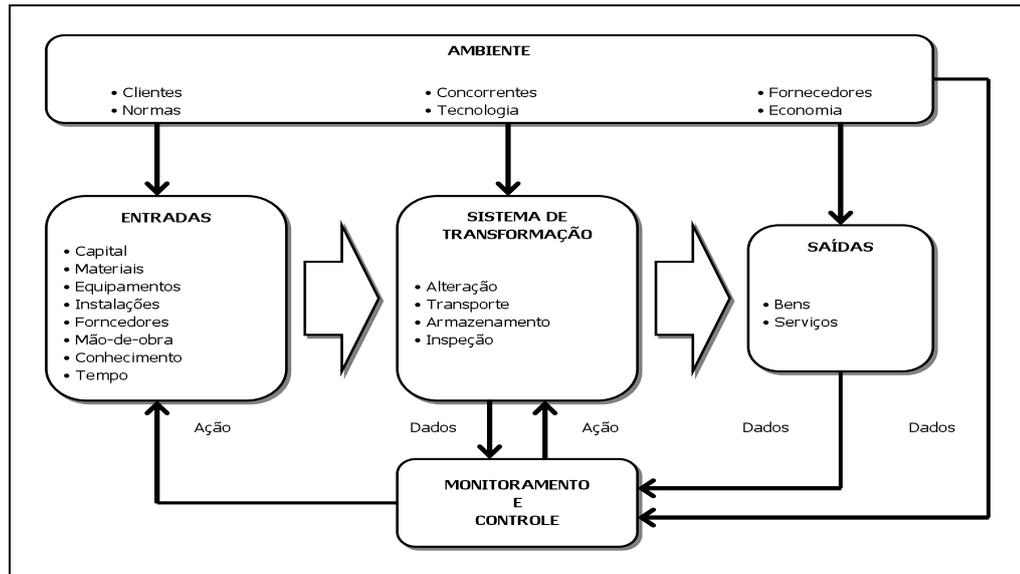


Figura 01: representação do sistema de produção (baseado em: MEREDITH; SHAFER, 2002)

Ainda segundo Meredith e Shafer (2002), nesse modelo o ambiente é constituído por elementos ou aspectos externos ao sistema de produção que não podem ser controlados, mas devem ser considerados devido à sua influência sobre este. Tendo em vista a natureza dinâmica do ambiente, torna-se necessário monitorar o sistema de produção e realizar ações corretivas se o sistema não estiver atingindo o seu objetivo. Assim, são necessárias ações direcionadas aos insumos ou ao sistema de transformação ou a ambos, a partir da coleta e análise de dados relacionados ao ambiente, ao sistema de transformação e às suas saídas (MEREDITH; SHAFER, 2002).

O sistema de transformação é formado pela combinação de processos (compostos por atividades de processamento, transporte, armazenamento e inspeção), utilizando materiais, informações e energia (entradas) em um grupo complexo de elementos (equipamentos e pessoal) (MEREDITH; SHAFER, 2002). Assim, os materiais são processados e ganham valor, representando as saídas do sistema (BLACK, 1998; MEREDITH; SHAFER, 2002). Uma vez que o sistema de produção tem objetivos de desempenho, seus processos devem ser considerados de forma integrada, ou seja, otimizar os processos isoladamente necessariamente não otimiza o sistema inteiro (BLACK, 1998).

2.2.2 Classificação dos Sistemas de Produção

Os sistemas de produção podem ser classificados de acordo com diversos fatores. Uma classificação tradicional e encontrada com frequência na literatura (HOPP; SPEARMAN,

1996; SLACK *et al.*, 1997; BALLARD; HOWELL, 1998; PORTER *et al.*, 1999; GAITHER; FRAZIER, 2001; DAVIS; AQUILANO; CHASE, 2001; MEREDITH; SHAFER, 2002; COX; SPENCER, 2002) foi proposta por Hayes e Wheelwright¹¹, conhecida como Matriz Produto-Processo ou Matriz Volume-Variedade. Segundo Hill¹² (1993, *apud* MACHADO, 2003), essa classificação baseia-se na constatação de que existe uma elevada correlação entre volume de produção e as características dos processos produtivos relacionadas à variedade de saída.

Slack *et al.*¹³ (1997) afirmam que a relação volume-variedade do produto influencia tanto na determinação dos objetivos de desempenho do sistema de produção e em suas atividades de projeto, como na abordagem utilizada para gerenciá-lo. Desta forma, cada tipo de sistema de produção implica uma forma diferente de organizar e gerenciar seus processos, de acordo com diferentes características de volume e variedade de produto (SLACK *et al.*, 1997; ASKIN; GOLDBERG, 2002).

Na matriz proposta por Hayes e Wheelwright, quatro tipos de sistemas de produção são apresentados originalmente: fluxo contínuo, fluxo em linha conexa (linha de montagem), fluxo em linha desconexa (em lotes ou bateladas) e fluxo desordenado (*job shop*). Entretanto, esta matriz foi adaptada por diversos autores (SLACK *et al.*, 1997; SCHMENNER¹⁴, 1993 *apud* BALLARD; HOWELL, 1998; PORTER *et al.*, 1999; DAVIS; AQUILANO; CHASE, 2001; MEREDITH; SHAFER, 2002), para incluir os sistemas de produção por projeto como um quinto tipo de sistema, já que, conforme Porter *et al.* (1999), os sistemas de produção por projeto podem se enquadrar em uma definição ampliada de sistemas de produção com fluxo desordenado (*job shop*), mas, considerando suas características peculiares (natureza única e grande escala de seus produtos), estes sistemas devem ocupar uma classificação particular. A figura 02 apresenta a matriz de produto-processo adaptada.

¹¹ HAYES, R.; WHEELWRIGHT, S. Linking Manufacturing Process and Product Life Cycles. **Havard Business Review**, v. 57, p. 133-140, 1979.

¹² HILL, T. Manufacturing Strategy: **The Strategic Management of the Manufacturing Function**. [S.l.]: MacMillan, 1993.

¹³ Slack et al. (1996) utilizam ao longo do seu livro o termo “processo de transformação” ao invés de sistema de produção. Entretanto, o sentido em que este termo é utilizado vem ao encontro do significado de sistema de produção utilizado neste trabalho.

¹⁴ SCHMENNER, R. **Production/Operations Management: from the Inside Out**. 5th ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993.

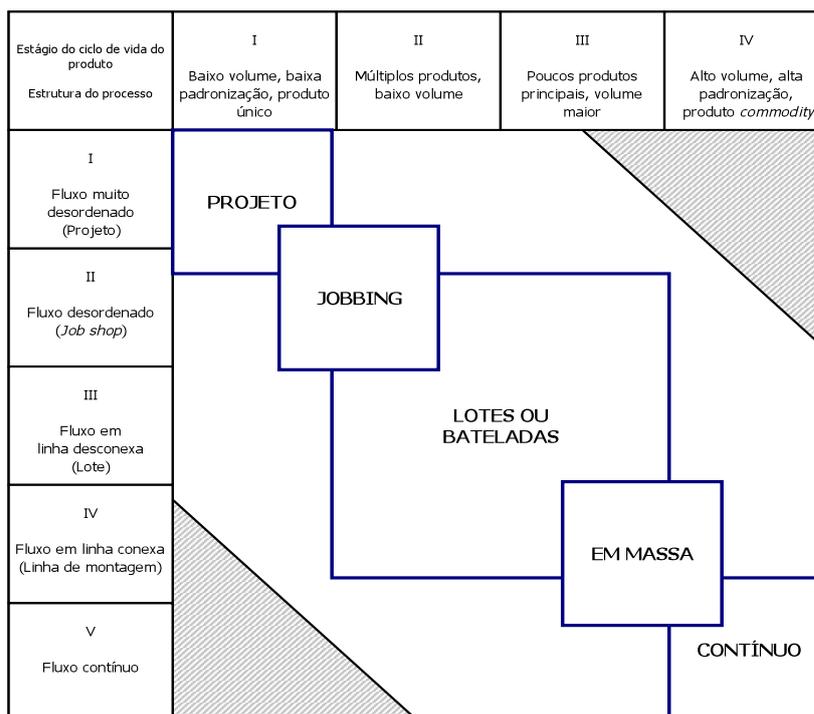


Figura 02: matriz volume-variedade de produção (baseado em: SCHMENNER, 1993 *apud* BALLARD; HOWELL, 1998)

Segundo esta classificação, a construção civil caracteriza-se por possuir sistemas de produção por projeto. Assim, torna-se relevante para este estudo o aprofundamento tanto das características particulares desse tipo de sistema, como também das abordagens utilizadas para seu gerenciamento.

2.3 SISTEMAS DE PRODUÇÃO POR PROJETO

2.3.1 Definição de Sistema de Produção por Projeto¹⁵

Hill¹⁶ (1991, *apud* PORTER *et al.*, 1999) define a produção por projeto como a provisão de um único produto requerendo grande escala de entradas (*inputs*) para serem coordenados para

¹⁵ Neste trabalho o termo projeto apresenta dois significados distintos. O primeiro significado refere-se à “idéia que se forma de executar ou realizar algo, no futuro; plano, intento, desígnio” (FERREIRA, 2004), expressando o ato de projetar, elaborar um projeto. O segundo significado refere-se a um “empreendimento a ser realizado dentro de determinado esquema” (FERREIRA, 2004), com relação a um empreendimento de construção, por exemplo. Optou-se por manter o termo sistema de produção por projeto e não por empreendimento, já que este é amplamente utilizado na literatura de gestão da produção como tradução para o português do termo *project-based production system*.

¹⁶ HILL, T. *Production/Operations Management: Test and Cases*. [S.l.]: Prentice-Hall, 1991.

atender os requisitos dos clientes. Para Meredith e Shafer (2002), estes sistemas caracterizam-se pela grande escala de recursos utilizados e pela duração definida.

Turner (1993) e Davis, Aquilano e Chase (2001) ampliam esta definição. Segundo esses autores, um projeto é um empreendimento no qual os recursos humanos, materiais e financeiros são organizados de uma forma nova, para empreender um escopo único de trabalho, de especificação pré-fixada, sob restrições de custo e tempo, para alcançar uma mudança útil definida por objetivos quantitativos e qualitativos (TURNER, 1993; DAVIS; AQUILANO; CHASE, 2001).

Segundo Slack *et al.* (1997), são as características peculiares que permitem distinguir os sistemas de produção por projeto de outros tipos de sistemas de produção:

- a) *objetivo*: o resultado final é geralmente definido em termos de prazo, custo e qualidade;
- b) *complexidade*: inúmeras tarefas são necessárias para a conclusão do projeto, cuja coordenação pode ser complexa;
- c) *unicidade*: um projeto é usualmente único já que, mesmo quando repetido, será distinto em relação aos recursos utilizados e ao ambiente no qual se insere;
- d) *incerteza*: um projeto é geralmente planejado antes de ser executado, carregando, portanto, alguma carga de risco;
- e) *temporaneidade*: os empreendimentos têm início e fim definidos, sendo caracterizados por uma concentração temporária de recursos que, ao final do projeto, são realocados;
- f) *ciclo de vida*: os recursos necessários para um projeto mudam durante o curso de execução, cujo padrão de alocação típico segue uma curva previsível.

2.3.2 Gestão de Projetos

Pode-se identificar na literatura duas visões distintas da gestão de projetos. Tradicionalmente, conforme Meredith e Shafer (2002) e Davis, Aquilano e Chase (2001), a gestão de projetos pode ser definida como o planejamento, a direção e o controle de recursos (pessoal,

equipamentos e materiais), buscando atender a restrições técnicas, de custos e de tempo (prazo).

De acordo com Meredith e Shafer (2002), no rol das necessidades do planejamento de projetos estão: o conhecimento das atividades a serem executadas, a ordem em que essas atividades devem ocorrer, as suas durações e quando os respectivos recursos de produção serão necessários. Já entre as atividades de controle encontram-se: a previsão de falhas e a compreensão de que recursos podem ser realocados entre as várias atividades para manter o projeto dentro do prazo (MEREDITH; SHAFER, 2002).

Slack *et al.* (1997) definem um modelo de gestão de projetos composto por cinco estágios que, embora apresentados seqüencialmente, na prática são realizados em paralelo: (a) compreensão do ambiente; (b) definição do projeto, através do estabelecimento de seus objetivos, escopo e estratégia de execução; (c) planejamento; (d) execução; e (e) controle.

Segundo Meredith e Shafer (2002), o planejamento do projeto é provavelmente o elemento mais importante para o seu sucesso, já que neste estágio ocorrem decisões que impactam fortemente na consecução dos seus objetivos e metas de desempenho.

Para tornar o planejamento e controle do projeto menos complexo, é necessário o seu desmembramento em porções menores e gerenciáveis, cada uma dotadas de seus próprios objetivos, em termos de prazo, custo e qualidade (SLACK *et al.*, 1997).

Para tanto, segundo Turner (1993), a gestão de empreendimentos restringe-se ao emprego de ferramentas e técnicas desenvolvidas ao longo de quarenta anos desta disciplina. Existem, neste corpo de conhecimento, dois métodos principais: o Método do Caminho Crítico (*Critical Path Method* - CPM), que foca no gerenciamento do tempo, utilizando redes de caminhos críticos, e o Critério do Sistema de Controle Prazo/Custo (*Cost/Schedule Control System Criteria* - C/SPEC), que foca em três objetivos: (a) gerenciar escopo, através de Estruturas de Desdobramento do Trabalho (*Work Breakdown Structures* - WBS); (b) organização, através de uma Estrutura de Desdobramento da Organização (*Organization Breakdown Structure* - OBS); e (c) custo, através de uma Estrutura de Segmentação de Custos (*Cost Breakdown Structure* - CBS) (TURNER, 1993).

Com relação ao estágio de controle, este envolve o monitoramento do projeto, a avaliação do seu desempenho e intervenção no projeto, executando as mudanças necessárias para trazê-lo

de volta ao planejado (SLACK *et al.*, 1997). Dessa forma, segundo Howell e Koskela (2000), o projeto é gerenciado para assegurar que as atividades cumpram a programação e metas de custo. Assim, segundo os mesmos autores, o controle é o ato de comparar variações do plano e a tomada de ações corretivas.

Percebe-se que, com base nos preceitos e nas ferramentas utilizadas, a gestão tradicional de projetos utiliza uma abordagem reducionista, de caráter fordista-taylorista, na qual se busca a otimização das partes sem a necessária consideração dos impactos que estas ações terão sobre o desempenho do sistema como um todo. Ainda, no caso do estágio de controle, este se baseia no princípio da aderência, ou seja, propõe-se a tomada de ações corretivas de forma reativa (e não proativa), apenas a partir da identificação de um desvio entre o que foi executado e o que fora planejado.

Um contraponto à abordagem tradicional utilizada na gestão de empreendimentos, em especial da construção civil, descrita até aqui, tem sido amplamente discutido por diversos autores, entre eles Laufer e Tucker (1987), Formoso (1991), Sanvido e Paulson (1992), Koskela (1992; 2000), Ballard e Howell (1998, 1998b), Bertelsen e Koskela (2002) e Koskela e Howell (2002). De acordo com Howell e Koskela (2000) a gestão de empreendimentos tradicionalmente aplicada precisa ser reformulada, já que esta é inadequada à medida que os empreendimentos tornam-se mais incertos, complexos e pressionados pela necessidade de rapidez de execução. Segundo Koskela (2000), o modelo tradicional de gestão de empreendimentos, baseia-se fortemente no conceito de transformação, que considera a produção como a transformação de insumos e produtos, e nos princípios associados a este conceito, quais sejam:

- a) a decomposição do processo de transformação em subprocessos, que representam processos de transformação menores e mais gerenciáveis;
- b) a redução do custo total do processo pode ser obtida através da minimização do custo de cada subprocesso individualmente;
- c) a proteção do processo de produção contra a influência do ambiente externo através de proteção física (estoques) ou organizacional;
- d) que o valor do produto de um processo está associado ao valor (custo) dos insumos empregados naquele processo.

Howell e Koskela (2000) afirmam que grande atenção é dada ao arranjo das atividades em uma seqüência lógica, usualmente através de uma rede CPM, à definição do início de cada atividade, ao monitoramento do progresso de cada atividade e da rede maior, comparando aos padrões que foram estabelecidos por estimativa, e à tomada de ações corretivas em relação às variações negativas identificadas. Dessa forma, neste modelo de gestão existe preocupação somente com o desempenho das atividades dentro do plano e não com o gerenciamento destas atividades ou de seus relacionamentos (Howell; Koskela, 2000).

Howell e Ballard (1998) endossam esta crítica, afirmando que o gerenciamento de empreendimentos na construção tem sido tradicionalmente centrado em contratos e em tarefas específicas, que definem os objetivos dos vários participantes. Ainda segundo os mesmos autores, a coordenação entre organizações (fornecedores de materiais ou serviços) ou equipes de trabalho é guiada por um plano central, geralmente , que estabelece a seqüência e quando cada atividade deverá ser iniciada. A redução de custos é o resultado de melhorias na produtividade e a duração total do empreendimento é encurtada através da aceleração das atividades ou da mudança na sua lógica, permitindo assim trabalho concorrente (HOWELL; BALLARD, 1998).

Para Howell e Koskela (2000), o modelo de transformação, aplicado no gerenciamento de empreendimentos, é uma simplificação, que apresenta duas deficiências principais: a) o modelo não reconhece a existência de outros fenômenos na produção, além da transformação; e (b) não reconhece que não é a transformação propriamente que agrega valor ao produto, mas que o produto torna-se valioso por atender os requisitos do cliente.

Ainda segundo Howell e Koskela (2000), embora a visão de transformação seja instrumental para descobrir e compreender quais são as tarefas necessárias à produção, esta não é útil para entender como não utilizar recursos de produção desnecessariamente ou como assegurar que os requisitos do cliente sejam alcançados da melhor forma. Portanto, a produção gerenciada na forma convencional tende a tornar-se ineficiente e ineficaz (HOWELL; KOSKELA, 2000).

Dessa forma, uma reformulação do gerenciamento do empreendimento deve ser guiada por teorias de gerenciamento da produção que adicionem, à ênfase corrente nas atividades, o gerenciamento do fluxo de trabalho e a criação e entrega de valor (HOWELL; KOSKELA, 2000).

Para Howell e Ballard (1998), enquanto a visão tradicional encara um empreendimento como a combinação de atividades, a abordagem baseada nos conceitos da Produção Enxuta procura considerá-lo de forma holística, em termos de um sistema de produção, no qual as ações são alinhadas para gerar valor para o consumidor.

Sob esta ótica, os objetivos primários de um empreendimento são a criação de valor para o consumidor, a entrega do empreendimento e a continuidade do fluxo de materiais e informações até a conclusão do trabalho (HOWELL; BALLARD, 1998).

Segundo Ballard e Howell (2003), os empreendimentos, em especial os da construção, são sistemas de produção temporários que se ligam a múltiplos sistemas de produção permanentes. Quando um empreendimento é estruturado utilizando os conceitos da Produção enxuta, seu objetivo é de entregar o produto, maximizando valor e minimizando desperdício. A figura 03 compara o gerenciamento de empreendimentos, respectivamente, utilizando os conceitos da Produção Enxuta e os conceitos tradicionais de gestão.

Gestão de Empreendimentos utilizando conceitos da Produção Enxuta	Gestão de Empreendimentos utilizando conceitos tradicionais
Foca o sistema de produção	Foca as transações e contratos
Metas traçadas em termos de transformação, fluxo e valor	Metas traçadas em termos de transformação
Decisões à montante consideram sua influência à jusante	Decisões realizadas por especialistas de forma isolada
Produto e processo são projetados em conjunto	Projeto do processo depois do projeto do produto
Atividades desenvolvidas no último momento possível	Atividades desenvolvidas tão logo quanto possível
Busca sistemática da redução do <i>lead time</i> de fornecedores	Organizações separadas ligadas pelo mercado.
Estoques utilizados para absorver a variabilidade do sistema	Estoques utilizados para otimização local

Figura 03: comparação entre o gestão de empreendimento utilizando conceitos da Produção Enxuta e tradicionais (baseado em: BALLARD; HOWELL, 2003)

O gerenciamento de empreendimentos pode ser compreendido em termos de projetar, operar e melhorar sistemas de produção (figura 04) (KOSKELA, 2001).

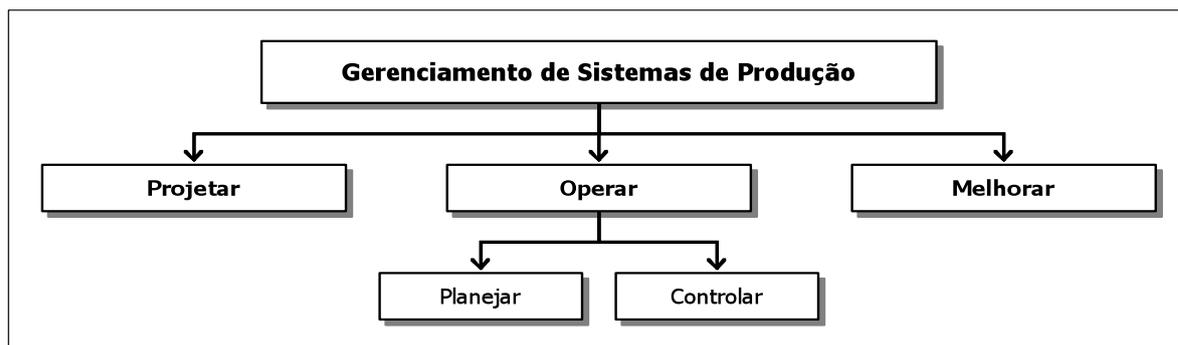


Figura 04: gerenciamento de empreendimentos (baseado em: KOSKELA, 2001)

Assim, sistemas de produção são projetados para alcançar três metas fundamentais: entregar o produto, maximizar valor e minimizar desperdício. Operar é concebido em termos de planejar e controlar, enquanto planejar consiste em especificar metas para o sistema. Já controlar é avançar através dessas metas, corrigindo, se necessário, os meios utilizados ou as metas perseguidas (BALLARD; HOWELL, 2003).

2.4 O PROJETO DO SISTEMA DE PRODUÇÃO NA INDÚSTRIA

2.4.1 As Atividades de Projeto na Gestão da Produção

Comumente, o termo projeto está associado ao projeto dos produtos que serão produzidos. Entretanto, esta atividade refere-se também ao projeto do sistema de produção que efetivamente produz estes produtos (SLACK *et al.*, 1997). De acordo com Slack *et al.* (1997), sempre que um novo sistema de produção estiver sendo desenvolvido, as atividades de projeto, planejamento e controle e melhoria são desempenhadas, as quais devem contribuir para o alcance dos objetivos estratégicos da produção.

Conforme Gaither (1980), existem muitas interações entre o projeto e o desenvolvimento de produtos e o projeto e o desenvolvimento de processos de produção, sendo a gestão destas interações fundamentais para a eficiência de sistemas produtivos. Ainda segundo esse autor, o projeto do produto está intimamente relacionado à tecnologia empregada, ao *layout* das instalações fabris, ao projeto de processos individuais, ao controle de qualidade, entre outros fatores.

A partir da necessidade de consideração integrada do projeto do produto e dos processos necessários a sua produção, Slack *et al.* (1997) afirmam que projetar envolve definir a forma, o aspecto e a composição de produtos, serviços e processos. No rol das atividades de projeto, segundo Askin e Goldberg (2002), o projeto do sistema de produção define como os recursos serão gerenciados e as informações utilizadas para produzir os produtos.

Gaither e Frazier (2001) afirmam que, ao se projetar um sistema de produção, busca-se delinear e descrever os processos específicos a serem utilizados na produção. Segundo os mesmos autores, o resultado dos estudos de projeto do sistema de produção é a determinação das etapas do processo tecnológico que será utilizado e as ligações entre as etapas; a escolha dos equipamentos, o projeto de construções e o arranjo físico (*layout*) das instalações; e a necessidade de pessoal, suas habilidades e o nível de supervisão (GAITHER; FRAZIER, 2001).

Nesse sentido, para Slack *et al.* (1997), o projeto do produto e o projeto do sistema de produção deveriam ser considerados como atividades que se sobrepõem por dois motivos. Primeiro, o projeto do produto tem um efeito importante no custo de produção. Ainda segundo Slack *et al.* (1997), os custos do processo de projeto crescem muito lentamente, especialmente no início da atividade de projeto, enquanto que os custos de produção, que são muito influenciados pelo projeto, crescem muito rapidamente (figura 05).

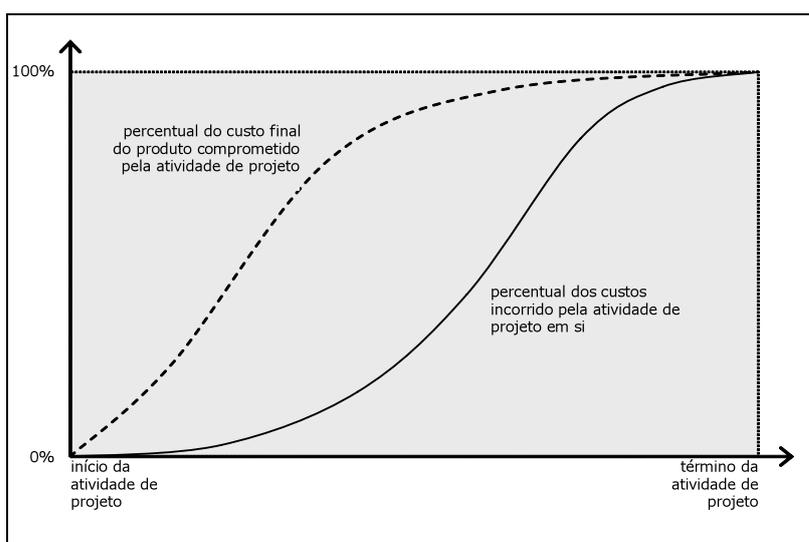


Figura 05: relação entre a atividade de projeto e os custos de produção (baseado em: SLACK *et al.*, 1997)

O modo como esta sobreposição é gerenciada pode ter um grande impacto sobre o tempo entre a concepção inicial do produto e o seu lançamento no mercado (*time-to-market*) (SLACK *et al.*, 1997).

Desta forma, o projeto do sistema de produção é uma atividade de gestão de operações que deve ser realizada antecipadamente em relação ao início das atividades de produção. Segundo Koskela (2001), o PSP representa a solução mais básica para a redução de fatores que impactam negativamente os sistemas produtivos (como, por exemplo, a variabilidade, incerteza, etc.). Assim, conclui-se que quanto maior a antecipação temporal desta etapa, maiores podem ser as oportunidades para a inserção de medidas que contribuam para a redução da parcela de atividades que não agregam valor ao sistema de produção.

Assim, percebe-se que o projeto do sistema de produção deve ser encarado como uma atividade de gestão da produção que apresenta interfaces tanto com o processo de desenvolvimento do produto, quanto com o processo de planejamento da produção. Pode-se entender o PSP como um dos elos de ligação entre o produto a ser produzido e o sistema de produção que o produzirá, estruturando-o de forma a tornar o processo de planejamento e controle da produção mais simples e efetivo.

2.4.2 Escopo de Decisões do Projeto do Sistema de Produção

Segundo Meredith e Shafer (2002), o procedimento normal na elaboração de um sistema de produção é a consideração de alternativas de organização da produção para desenvolver a melhor estratégia visando à obtenção dos resultados desejados. As principais considerações a serem feitas nesta etapa – tais como eficiência, eficácia, capacidade, *lead time*, flexibilidade – são altamente interdependentes. Se uma delas for alterada todas as demais serão atingidas (MEREDITH; SHAFER, 2002).

Já Skinner (1985) afirma que o projeto de um sistema de produção envolve, essencialmente, o estabelecimento de um conjunto de políticas de manufatura, ou seja, definindo a maneira como elementos básicos do sistema de produção serão interligados e operados.

Conforme o mesmo autor, as políticas de manufatura podem ser agrupadas em duas partes. A primeira lida com aspectos ligados às instalações e equipamentos, isto é, o número, a capacidade e a localização de plantas e os equipamentos e as tecnologias de processo que serão empregados. A segunda lida com pessoas, sistemas e procedimentos, ou seja, a infra-

estrutura¹⁷. Assim, projetar a infra-estrutura envolve decisões relacionadas: (a) ao que será feito e o que será comprado (nível de integração vertical); (b) ao planejamento e programação da produção e controle de estoques; (c) ao gerenciamento da força de trabalho; (d) ao controle de qualidade; (e) à organização formal; (f) aos controles, relatórios e sistema de informação; e (g) às compras.

Conforme Slack *et al.* (1997), o projeto do sistema de produção deve ser encarado a partir de duas perspectivas: uma perspectiva estratégica e uma perspectiva operacional. Em um nível mais estratégico, é necessário considerar as organizações como parte integrante de uma rede de clientes e fornecedores, por que isso estabelece a necessidade de três decisões de projeto especialmente importantes (SLACK *et al.*, 1997): (a) decisões de integração vertical (decisões de fazer ou comprar); (b) decisões de gestão da capacidade produtiva de longo prazo; e (c) decisões de localização das operações produtivas. Estas decisões, por sua vez, têm um impacto especialmente significativo na estratégia da organização, já que estabelecem o contexto no qual outras decisões de projeto do sistema de produção são tomadas (SLACK *et al.*, 1997).

Já no nível operacional, o PSP busca-se estabelecer o arranjo físico das instalações (e conseqüentemente com o fluxo do produto através do sistema), com a seleção da tecnologia a ser empregada e com gestão do pessoal de produção (SLACK *et al.*, 1997).

Deve-se notar que, ao estabelecer uma hierarquia das decisões do PSP em dois níveis (estratégico e operacional), Slack *et al.* (1997) apresentam uma seqüência cronológica dessas decisões. Da mesma forma, mesmo não explicitado no conjunto de decisões propostas por Gaither e Frazier (2001), há uma hierarquização das decisões bastante semelhante à utilizada por Slack *et al.* (1997).

¹⁷ Segundo Skinner (1985), a infra-estrutura da manufatura relaciona-se às políticas, procedimentos e organização pelas quais a produção realiza seu trabalho, especificamente relativo a sistemas de controle de produção e estoques, sistemas de controle de custos e qualidades, políticas de gerenciamento da força de trabalho e estrutura organizacional.

2.5 O PROJETO DO SISTEMA DE PRODUÇÃO EM EMPREENDIMENTOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Conforme discutido no item 1.2.1, pouco tem sido publicado a respeito do projeto do sistema de produção na construção civil. Alguns trabalhos já publicados versam especificamente sobre o tema, enquanto outros tratam de algumas decisões que formam o escopo do PSP de forma isolada ou em conjunto.

No contexto da construção, o termo *work structuring* (estruturação do trabalho) recentemente tem sido utilizado para se referir ao projeto do sistema de produção (BALLARD *et al.*, 2001; 2001a). Esse termo foi inicialmente utilizado por Ballard (1999) e posteriormente por Tsao *et al.* (2000; 2004) para referir-se ao projeto de processos individuais. Naquele contexto, o propósito era tornar o fluxo de trabalho mais confiável e rápido, entregando valor ao consumidor e respondendo questões relacionadas com: (a) a segmentação do trabalho e sua alocação às unidades de produção; (b) o seqüenciamento do trabalho; (c) a liberação do trabalho de uma unidade de produção para a próxima; (d) a locação e dimensionamento de estoques; e (e) a localização do trabalho no empreendimento (TSAO *et al.* 2004).

Ballard *et al.* (2001; 2001a) propuseram que a utilização do termo *work structuring* passasse a designar o projeto do sistema de produção, abrangendo aspectos mais amplos do que anteriormente utilizado. Assim, Ballard *et al.* (2001) apresentaram um guia para o projeto do sistema de produção em empreendimentos da construção civil. Com base nos conceitos e princípios da Teoria TFV (KOSKELA, 2000), o guia estrutura-se de forma hierárquica para duas metas da produção¹⁸, quais sejam: maximizar valor e minimizar desperdício. Deve-se ressaltar, entretanto, que o referido guia não foi aplicado e testado na prática, restringindo-se a uma proposição teórica.

Outra atividade que relaciona-se ao projeto do sistema de produção na construção civil é a Programação por Fases (*Phase Scheduling*) proposto por Ballard (2000). O objetivo da Programação por Fases é produzir um plano para completar uma determinada fase do empreendimento que maximize a geração de valor que qualquer um dos envolvidos

¹⁸ Segundo Ballard *et al.* (2001), há uma terceira meta de produção que compreende produzir o produto, em consonância com o conceito de transformação. Entretanto, a hierarquia proposta pretende ser uma alternativa ao modelo tradicional de gestão de empreendimentos (que projeta sistemas de produção através da divisão do escopo do projeto em seus elementos, percebendo-os de forma isolada e não sistêmica), enfatizando os conceitos de fluxo e geração de valor.

compreende e apóia (BALLARD, 2000). Para tanto, aqueles responsáveis por atividades que fazem parte de uma fase (projetistas, cliente, fornecedores e subcontratados) são chamados a integrar o processo, formando uma equipe. Durante o processo, os envolvidos discutem e negociam a seqüência de execução das atividades e suas interdependências, além dos tamanhos dos lotes de transferência entre elas (BALLARD *et al.*, 2000).

Já Knapp, Charron e Howell (2004) propõem uma expansão do conceito de Programação por Fases para o conceito de “Planejamento por Fases”. Segundo eles, neste processo os participantes não apenas definem e programam suas tarefas, mas sim identificam e descrevem os *hand offs* (entregas de porções discretas de trabalho concluído) entre atividades precedentes e subseqüentes, criando, assim, uma rede de comprometimento.

Dessa forma, percebe-se que tanto o *work structuring*, como a Programação ou o Planejamento de Fases lidam com segmentos (maiores ou menores) do empreendimento, podendo, assim, ser considerados como partes complementares ao PSP, em diferentes horizontes. Enquanto o PSP preocupa-se com decisões mais amplas, embora considere alguns aspectos relativos aos fluxos de trabalho e aos *hand offs* entre atividades, a Programação e o Planejamento de Fases baseiam-se em informações do plano de longo prazo (principais datas-marcos, por exemplo), detalhando as principais fases do empreendimento. Já o *work structuring* lida com o projeto de processos e operações de construção, mantendo, entretanto, uma perspectiva sistêmica.

Melhado (1998) utiliza o termo *Projeto para Produção* referindo-se ao projeto de processos específicos. O mesmo autor ressalta a importância da realização dos projetos para a produção como forma de coordenar as soluções de produto com as alternativas de processos de manufatura. Melhado e Fabrício (1998) definem o Projeto para Produção como um conjunto de elementos de projeto, elaborados simultaneamente ao detalhamento do projeto executivo, para utilização nas atividades de produção em obra, contendo as definições sobre: (a) a disposição e seqüência de atividades de obra e frentes de serviço; (b) o uso de equipamentos; e (c) o arranjo e evolução do canteiro.

Embora o projeto de processos possa ser realizado posteriormente à definição do produto, Melhado (1998) destaca a importância da sua simultaneidade, já que isso permite uma melhor tradução das características peculiares do produto em procedimentos e seqüências de

produção, minimizando a possibilidade de execução inadequada ou incompleta destas especificações.

Segundo Melhado (1998), o *Projeto para Produção* deve conter informações cuja finalidade é orientar a execução do empreendimento e, para que defina adequadamente a execução, devem ser norteados por diretrizes que levem em conta as características da empresa.

Entretanto, deve-se notar que o Projeto para Produção enfatiza os processos críticos de cada empreendimento simultaneamente ao desenvolvimento do produto (MELHADO; FABRÍCIO, 1998), ou seja, não foca no empreendimento como um todo. Além disso, relaciona-se muito fortemente com o conceito de construtibilidade e da sua obtenção através de escolhas durante o projeto do produto.

Na próxima secção serão apresentados resumidamente os trabalhos de Schramm (2004) e Rodrigues (2006), o primeiro por se tratar do trabalho que esta pesquisa toma como ponto de partida para sua consecução e o segundo por se tratar de uma adaptação do primeiro a um contexto diferente daquele que originalmente foi considerado.

De forma resumida, estes dois trabalhos diferem do *work structuring* e do *Projeto para Produção* por considerar o empreendimento de forma sistêmica, não se limitando a processos específicos, mas sim na rede de processos que formam o empreendimento e suas interações e os impactos destes no sistema de produção.

2.5.1 Modelo de PSP para Empreendimentos Habitacionais com Características Repetitivas

Schramm (2004) propôs um modelo para elaboração do projeto do sistema de produção para empreendimentos habitacionais de interesse social, cujas principais características eram a repetitividade dos processos, a demanda perfeitamente definida no início do empreendimento, *lead time* curto, ou seja, rapidez na execução, número relativamente alto de unidades repetitivas.

Neste contexto, com base em estudos de caso, Schramm (2004) propôs um modelo de elaboração do PSP composto por seis fases, as quais contemplavam as principais decisões envolvidas nesta atividade gerencial. O modelo proposto está apresentado na figura 06, a seguir.

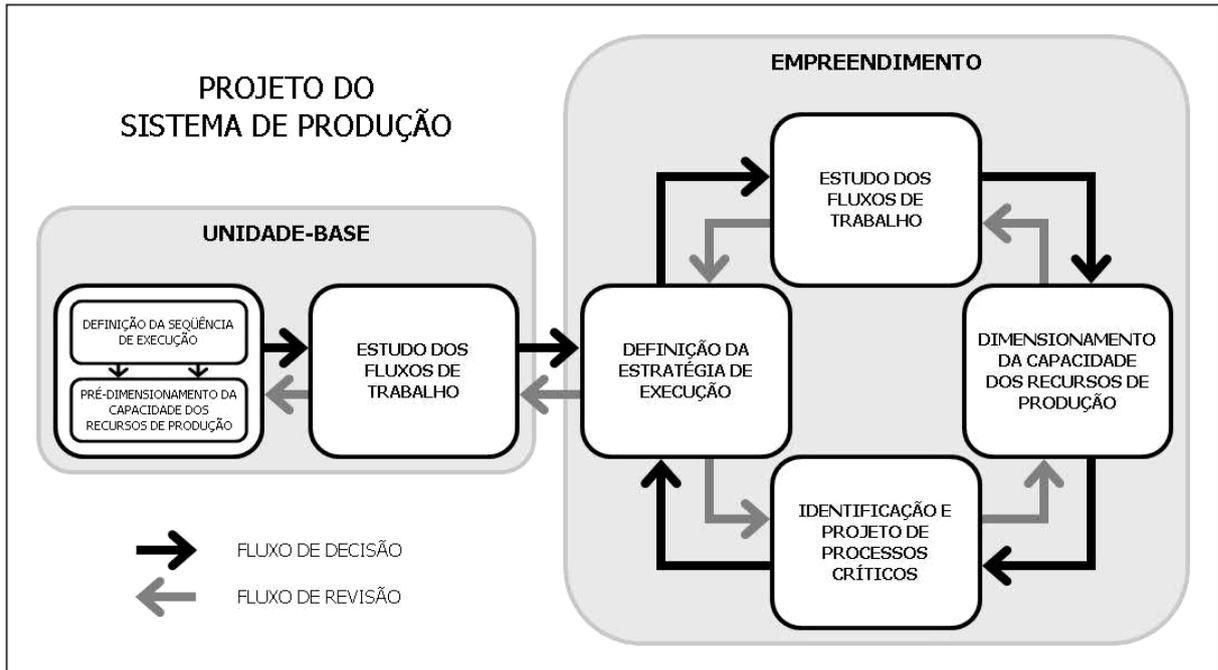


Figura 06: etapas da elaboração do PSP para EHS (SCHRAMM, 2004)

O escopo de decisões que compõem o Projeto do Sistema de Produção em Empreendimentos Habitacionais de Interesse Social é definido com base em uma série de seis etapas agrupadas de acordo com a unidade de análise a que se referem: a unidade-base ou o empreendimento como um todo. Embora essas etapas sejam representadas de forma sequencial, as decisões a que se referem não são tomadas de forma isolada. Pelo contrário, por se tratarem de aspectos relativos a um sistema de produção, devem ser percebidos de forma integrada ou holística. Assim, a modificação de uma das decisões estabelecidas repercutirá, em maior ou menor grau, sobre as demais, à jusante ou à montante da etapa em questão (SCHRAMM, 2004).

Dessa forma, essas etapas são representadas conectadas por setas em dois sentidos, uma no sentido do fluxo de decisão, caracterizado pela definição da etapa, e a outra no sentido do fluxo de revisão, necessário em função do aspecto iterativo do processo. A seguir, são descritas as diferentes etapas que compõem o modelo proposto por Schramm (2004).

2.5.1.1 Definição da Sequência de Execução e Dimensionamento dos Recursos de Produção da Unidade-Base

A partir da coleta de informações preliminares sobre o empreendimento, é realizada a definição da sequência de execução da unidade-base de produção e de pré-dimensionamento dos recursos de produção utilizados na sua execução. A unidade-base de produção é uma

unidade repetitiva que pode ser representada por um pavimento, um apartamento, uma casa ou um sobrado, conforme as características do empreendimento sob estudo. Durante as discussões surgem outras definições importantes para o PSP, relacionadas ao nível de integração vertical, quais materiais ou processos serão executados pela empresa ou adquiridos de fornecedores externos, e à seleção das tecnologias construtivas a serem utilizadas (com relação a materiais, sistemas construtivos e equipamentos).

2.5.1.2 Estudo dos Fluxos de Trabalho da Unidade-Base

A partir das definições da etapa anterior tem-se as informações básicas necessárias à elaboração do estudo dos fluxos de trabalho na unidade-base do empreendimento. Nessa etapa busca-se estabelecer os fluxos de trabalho na unidade-base de produção, que se refere ao conjunto de operações realizadas por cada equipe de trabalho na sua execução com relação às dimensões espaço e tempo, identificando possíveis interferências entre equipes.

Para o estudo do fluxo de trabalho da unidade-base de produção pode ser utilizada a técnica da Linha de Balanço, como apresentado na figura 07, que demonstra um estudo realizado para uma unidade-base de um empreendimento, consistindo em um edifício multifamiliar com cinco pavimentos e quatro apartamentos por andar.

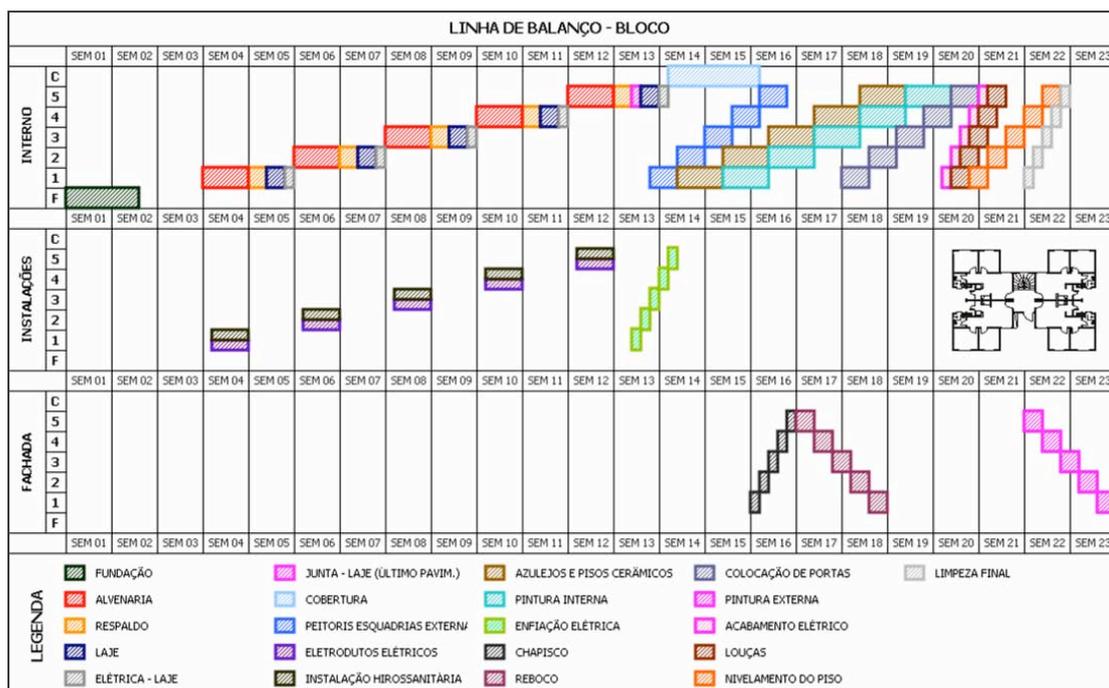


Figura 07: Linha de balanço utilizada para o estudo do fluxo de trabalho em uma unidade-base

2.5.1.3 Definição da Estratégia de Execução do Empreendimento

A definição da estratégia de execução do empreendimento inicia-se pela divisão deste em zonas de trabalho menores, criando um número de “pequenos empreendimentos” dentro do empreendimento maior que podem ser executados de forma seqüencial ou em paralelo. Essas zonas agregam certo número de unidades habitacionais, para as quais serão alocadas equipes de trabalho que, em uma situação ideal, devem desenvolver suas atividades num fluxo contínuo de trabalho seguindo um ritmo preestabelecido.

Nesta etapa são geralmente simuladas e analisadas inúmeras alternativas de execução, formalizadas no plano de ataque do empreendimento, dentre as quais a mais adequada é escolhida em função de diferentes aspectos, entre os quais se destacam: (a) impacto no prazo final de execução do empreendimento; (b) capacidade de fornecimento dos fornecedores de suprimentos; (c) limites de capacidade de produção dos processos críticos (gargalos) para atender a demanda gerada pela alternativa; e (d) viabilidade financeira da alternativa escolhida, em função do volume de recursos de produção necessários para a sua consecução.

2.5.1.4 Estudo dos Fluxos de Trabalho no Empreendimento

As informações provenientes do estudo dos fluxos de trabalho na unidade-base e do plano de ataque do empreendimento permitem a elaboração do estudo dos fluxos de trabalho no empreendimento, que também é realizado utilizando a técnica da linha de balanço. Esta técnica permite visualizar os fluxos de trabalho em todo o empreendimento, bem como comparar datas-marco de início e conclusão dos processos de acordo com o prazo previsto para a execução do empreendimento.

Procura-se considerar um plano que permita um fluxo ininterrupto das equipes de produção, a partir da sincronização entre processos, principalmente com relação àqueles processos considerados críticos para o sistema de produção.

2.5.1.5 Dimensionamento da Capacidade dos Equipamentos e Mão-de-obra

Com base no estudo dos fluxos de trabalho no empreendimento e dos dados do pré-dimensionamento da capacidade dos recursos realizado na primeira etapa, é possível dimensionar a necessidade de capacidade dos recursos de produção para a consecução do empreendimento.

A partir da linha de balanço elaborada para a execução do empreendimento, gera-se um diagrama de seqüenciamento das atividades das equipes de produção, a partir do qual é possível determinar o número de equipes necessárias para a execução de cada processo. Assim, a partir do número de equipes e da sua composição, estabelece-se o volume de recursos necessários. A partir desta informação, são realizadas análises que podem resultar na reprogramação de atividades devido à necessidade de nivelamento dos recursos em função da sua disponibilidade.

2.5.1.6 Identificação e Projeto dos Processos Críticos

Embora seja necessária atenção a todos os processos de produção, alguns merecem uma maior dedicação quanto a sua preparação e execução, buscando-se através do seu projeto, minimizar os efeitos negativos que estes possam vir a acarretar ao sistema de produção. Esses processos, chamados processos críticos, são aqueles que representam os gargalos do sistema de produção, ou seja, cujas capacidades individuais limitam (gargalos) ou podem vir a limitar (processos com restrição de capacidade) a capacidade de produção do sistema como um todo (COX; SPENCER, 2002; UMBLE; SRIKANTH, 1995).

A partir da pesquisa realizada, Schramm (2004) propôs alguns temas para investigação futura:

- a) utilizar técnicas de modelagem e simulação de sistemas de produção, especialmente que permitam visualização e interação com os usuários, na geração e discussão de alternativas de organização do sistema de produção;
- b) avaliar os impactos da variabilidade dos processos de produção, empregando dados estocásticos, ao invés de determinísticos, na elaboração do PSP.

2.5.2 Modelo de PSP para Empreendimentos Complexos

O trabalho de Rodrigues (2006) teve como objetivo propor uma adaptação do modelo de PSP desenvolvido por este pesquisador para elaboração do PSP em ambientes complexos da construção civil.

Conforme Rodrigues (2006), para a elaboração do projeto do sistema de produção no contexto de obras complexas são propostas seis etapas: captação das necessidades dos clientes; definição da seqüência de execução do empreendimento; definição da unidade-base;

dimensionamento da capacidade de recursos de produção; estudo dos fluxos de trabalho; e estudo dos processos críticos.

Com base no contexto em que foi realizado o estudo, o modelo adaptado por Rodrigues (2006) apresenta as seguintes diferenças com relação ao modelo de PSP proposto por Schramm (2004):

- a) as decisões estratégicas da produção são explicitamente consideradas como requisitos de entrada para a elaboração do projeto do sistema de produção;
- b) em função das características complexas dos empreendimentos (por exemplo, alto grau de incertezas, grande número de partes envolvidas e elevada interdependência entre os processos) torna-se inviável o detalhamento de todas as decisões de forma antecipada ao início da etapa de execução. Dessa forma, a elaboração do PSP deve ser executada de forma evolutiva, detalhando os processos de acordo com a disponibilidade das informações. Desse modo, o PSP deve ser elaborado e detalhado de acordo com a fase em que se encontra o empreendimento: fase de orçamento e contratação, fase inicial da obra, demais etapas do empreendimento.

A figura 08, a seguir, apresenta o modelo de PSP para empreendimentos complexos proposto por Rodrigues (2006).

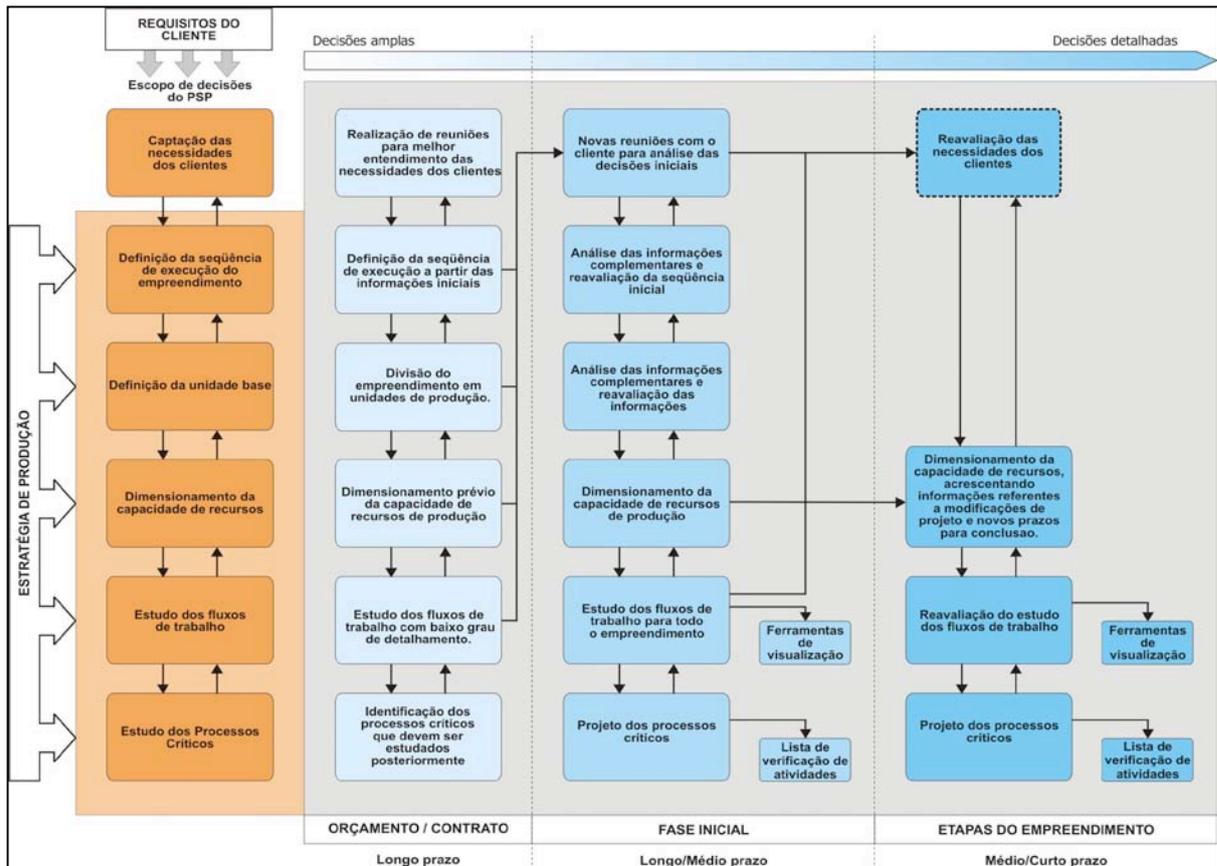


Figura 08: Modelo de Elaboração do PSP para Empreendimentos Complexos (RODRIGUES, 2006)

De acordo com o modelo proposto, a captação das necessidades dos clientes torna-se uma atividade relevante e deve ocorrer, principalmente, nas fases de orçamento, contratação e na fase inicial empreendimento, e são eventualmente reavaliadas nas diferentes etapas do empreendimento.

Duas sugestões de Rodrigues (2006) para trabalhos subsequentes foram investigar o papel do PSP como um promotor de um maior engajamento e cooperação entre a construtora e seus fornecedores e promover uma maior participação do cliente no processo de tomada de decisão do PSP, tornando-o consciente das conseqüências de eventuais alterações nos requisitos no processo de produção.

Com base no dos dois estudos, pode-se estabelecer as seguintes necessidades, que serão enfocadas por este trabalho:

- considerar a variabilidade inerente aos processos produtivos como um aspecto importante na modelagem dos sistemas de produção;

- b) utilizar ferramentas que possam efetivamente modelar esta variabilidade, bem como os resultados das interações dinâmicas entre os processos produtivos e seus impactos no sistema de produção;
- c) considerar os níveis de incerteza característicos de diferentes empreendimentos, utilizando uma estratégia evolutiva de elaboração do PSP, detalhando processos à medida em que o nível de incerteza diminui;

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo procurou caracterizar a atividade de PSP bem como as diferentes decisões que formam o seu escopo. A análise dos resultados de dois estudos relativos à elaboração do PSP em empreendimentos da construção indicam a possibilidade da utilização da simulação como uma ferramenta de apoio à tomada de decisão e sua utilidade para a realização deste processo.

Assim, no próximo capítulo, será abordado o emprego da simulação como uma ferramenta para a tomada de decisão na gestão da produção.

3 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO

3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo trata da modelagem de sistemas de produção como forma de estudar o comportamento de um sistema existente ou proposto. Os diversos tipos de modelos são discutidos, com ênfase nos modelos de simulação. É apresentado um método para a condução de estudos de simulação, bem como são também discutidos outros aspectos metodológicos para a realização destes estudos são também apresentados e discutidos. Por fim, discute-se a modelagem e a simulação interativas visuais, suas principais características como uma ferramenta de apoio à decisão e as principais vantagens e desvantagens de seu emprego.

3.2 FORMAS DE ESTUDAR UM SISTEMA

Para se analisar os relacionamentos entre os vários componentes de um sistema ou predizer o seu comportamento sob novas condições, há diferentes formas de estudá-los. Há também inúmeras classificações destas formas de estudo. Neste trabalho, apresenta-se e descreve-se uma destas classificações, neste caso proposta Berends e Romme (1999) e Law e Kelton (2000), conforme a figura 09, abaixo.

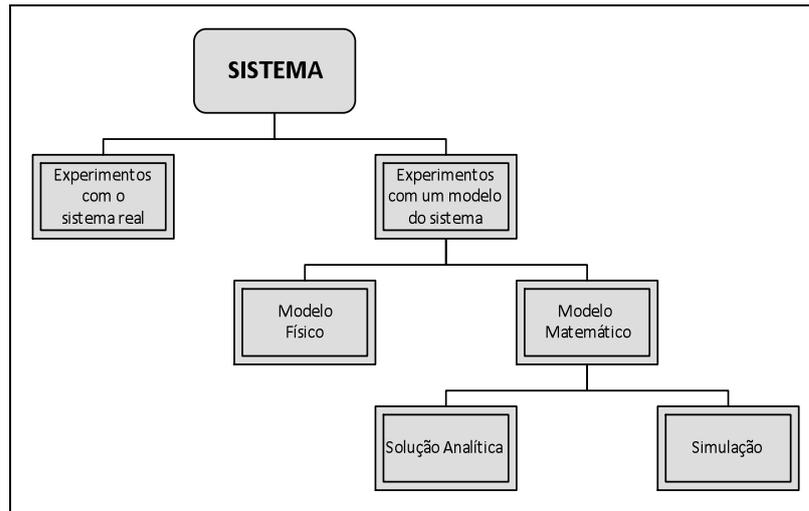


Figura 09: algumas formas de estudar um sistema (baseado em: BERENDS; ROMME, 1999; LAW; KELTON, 2000)

Segundo Law e Kelton (2000), se é possível alterar fisicamente o sistema e operá-lo sob novas condições, deve-se fazê-lo. Entretanto, raramente isso é possível por que o teste em um sistema real poderia ser muito caro e danoso para o sistema (MARTINEZ, 1996; ASKIN; GOLDBERG, 2002). Em muitos casos, o sistema pode ainda não existir, mas é interessante estudá-lo em suas várias configurações alternativas. Assim, usualmente são construídos modelos como uma representação do sistema e estudá-lo com uma abstração do sistema real (LAW; KELTON, 2000).

Segundo Pidd (2002), um modelo é uma representação simplificada ou descrição de um sistema ou entidade complexa, especialmente desenhada para facilitar cálculos ou predições. Assim, conforme Williams (2000), um modelo:

- a) representa ou descreve algo real;
- b) simplifica esta entidade real;
- c) a produção de um modelo tem um propósito, geralmente fazer algum tipo de cálculo ou prever como a entidade irá se comportar.

Conforme Law e Kelton (2000), os *modelos físicos* são representações em escala natural ou reduzida do sistema real. São úteis para alguns tipos de estudos, como treinamento de pessoal e estudos de concepção de novos produtos. Entretanto, estes tipos de modelos não são geralmente utilizados em análise de sistemas e pesquisa operacional. Nesse caso, a maioria dos modelos utilizados para esse propósito são *modelos matemáticos*, representando um

sistema em termos de relacionamentos lógicos e quantitativos que são manipulados e alterados para ver se o modelo matemático é válido. Se este modelo é suficientemente simples é preferível estudá-lo desta forma ao invés de utilizar simulação (LAW; KELTON, 2000).

Entretanto, muitos sistemas são altamente complexos e sua modelagem demandaria modelos matemáticos também muito complexos, dificultando o desenvolvimento de uma solução analítica válida (LAW; KELTON, 2000), o que requer que aspectos importantes do sistema sejam desconsiderados (MARTINEZ, 1996). Uma alternativa, neste caso, é estudar o sistema através de *simulação*, isto é, exercitar numericamente o modelo para os *inputs* em questão para avaliar como eles afetam as medidas de desempenho (MARTINEZ, 1996; LAW; KELTON, 2000).

3.3 MODELAGEM DE SISTEMAS

Williams (2002) afirma que um modelo representa ou descreve as percepções do modelador sobre um sistema real, usando para isso uma linguagem formal, baseada em conceitos teóricos e em seus relacionamentos, possibilitando a manipulação dessas entidades, a fim de facilitar o gerenciamento, o controle ou a compreensão daquele sistema.

Conforme Askin e Goldberg (2002), para auxiliar na visualização e exame de aspectos em um sistema são construídos os modelos. Modelos permitem aprender sobre o sistema e testar várias alternativas de seu projeto. Por exemplo, modelos de sistemas de produção permitem testar antecipadamente o impacto de decisões de planejamento e controle e, portanto, evitar decisões erradas e minimizar as interrupções no processo real. Assim os modelos desempenham um papel importante para a compreensão dos sistemas de produção, orientando sua operação e melhoria.

Segundo Pidd (2004), algumas vezes modelos de sistemas são utilizados para representar as principais características de um conjunto de operações existente ou novo. Nesse caso, a idéia é utilizar o modelo como um veículo de experimentação, considerando que os *insights* obtidos podem ser transferidos para as operações que estão sendo modeladas. Um modelo pode transformar-se em um substituto que pode ser manipulado de forma mais econômica, segura e conveniente do que o sistema sendo modelado.

Pidd (2004) também salienta que os modelos podem ainda ser utilizados para representar crenças ou opiniões das pessoas, ao invés de alguma realidade objetiva. Estes modelos possibilitam que as pessoas explorem as idéias de outras pessoas, explicitando-as e tornando possível o entendimento e a mudança.

Segundo Price e John (2004), os modelos podem ser caracterizados de acordo com o uso a que se destinam. Assim, os modelos podem ser:

- a) *modelos descritivos*: modelos que explicam ou descrevem um problema, fenômeno ou sistema. Um organograma é exemplo desse tipo de modelo. Tal modelo é útil para entendimento e comunicação sobre o sistema;
- b) *modelos prescritivos*: são modelos que indicam cursos de ação de acordo com as necessidades. Os modelos de programação linear ou de otimização são exemplos desse tipo de modelo;
- c) *modelos preditivos*: são modelos que indicam como o mundo pode evoluir à luz de certas decisões ou ações. Jogos de guerra, por exemplo, são projetados para ilustrar as conseqüências de estratégias de combate específicas ou decisões sobre o *mix* de combatentes.

Segundo Price e John (2004), os modelos podem não pertencer a um único grupo, dependendo do propósito para o qual estão sendo desenvolvidos e onde, quando e como serão utilizados. Assim, em uma situação particular, um modelo pode ser utilizado como uma combinação de descrição, prescrição e predição. Por exemplo, se inicialmente um problema não é claro, as necessidades do usuário não estão bem definidas e há pouco entendimento, faz-se uso de um modelo descritivo. Conforme o entendimento evolui, o modelo pode assumir um papel prescritivo ou preditivo (PRICE; JOHN, 2004).

Pidd (2004) afirma que a modelagem geralmente tem sido vinculada ao uso de métodos de programação matemática para otimização, de árvores de decisão para tomada de decisão sob condições de incerteza, de modelos de filas ou de técnicas de simulação para compreender o desempenho dinâmico de um sistema.

Entretanto, há outras formas nas quais os modelos podem ser construídos e empregados para situações dominadas por irregularidade e inovação (PIDD, 2004). Para ilustrar estas diferentes

formas, Pidd representa os enfoques da modelagem de sistemas através de um espectro apresentado na figura 10.

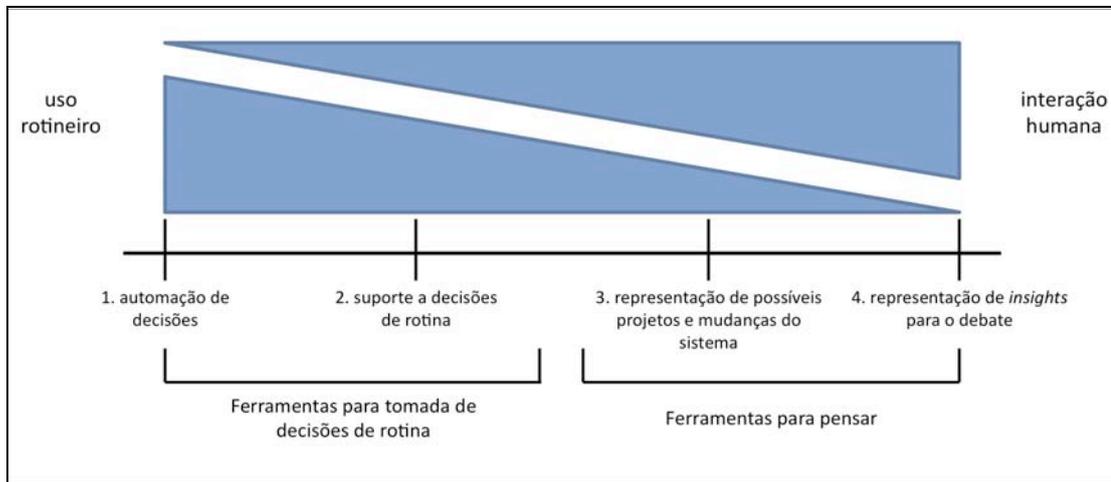


Figura 10: espectro dos enfoques da modelagem de sistemas (baseado em: PIDD, 2004)

Em um extremo do espectro, os modelos são utilizados para apoiar a tomada de decisões de rotina, substituindo a ação humana, o que é conhecido como automação da tomada de decisão¹⁹. No outro extremo, os modelos são utilizados para auxiliar pessoas que estão pensando sobre aspectos complexos, quer sejam relacionados à representação de possíveis projetos e modificações de sistemas, quer sejam relacionados à representação de *insights* para o debate (PIDD, 2004).

Utilizados como “ferramentas para pensar”, os modelos fazem parte de uma intervenção em que se busca a melhoria de um sistema existente ou o projeto de um novo sistema. Nesse caso os modelos não substituem a ação humana, mas a suportam (PIDD, 2004).

Há, entretanto, outras formas nas quais modelos pode ser utilizados como “ferramentas para pensar”. Especialmente quando é necessário planejar mudanças em sistemas existentes ou deseja-se projetar novos sistemas, pode-se construir modelos com propósitos especiais para apoiar esta tarefa. Esses modelos não são construídos para reuso ou uso continuado, mas são

¹⁹ Um exemplo de modelos para tomada de decisão automática são os modelos utilizados por sistemas de navegação aérea automática (piloto-automático), ou modelos de definição de preços de passagens aéreas, nos quais, a partir da leitura das condições momentâneas, um modelo é utilizado para ditar o comportamento do sistema sob controle: rota, velocidade e altitude, no caso do piloto-automático; e o preço das passagens aéreas, no caso do sistema de definição de tarifas (PIDD, 2004).

ferramentas que auxiliam o raciocínio durante uma intervenção. Uma vez concluída a tarefa, os modelos podem ser descartados ou esquecidos. São modelos de uso único (PIDD, 2004). Por exemplo, modelos de simulação computacional são freqüentemente usados no projeto de novos sistemas de produção. Neste caso, o modelador desenvolve um programa de computador que representa aspectos importantes relacionados à operação futura do sistema (PIDD, 2004).

Segundo Williams (2002), um modelo deveria ter as seguintes características: (a) ser embasado empiricamente; (b) ser teoricamente confiável; (c) ser coerente; (d) ser simplificado ao nível da necessidade; (e) representar a complexidade do sistema; (f) agregar valor; e (g) influenciar decisões.

Schultz e Sullivan²⁰ (1972 *apud* WILLIAMS, 2002) descrevem cinco vantagens que surgem durante o processo de construção do modelo:

- a) *confrontação*: pois permite que as alternativas surgidas durante o processo sejam comparadas e testadas para garantir que sejam críveis;
- b) *explicação*: premissas tornam-se explícitas a fim de construir o modelo. Assim, o processo de construção requer que o especialista defina-as explicitamente;
- c) *envolvimento*: o processo de construção revela lacunas de conhecimento e motiva o modelador a tentar preencher estas lacunas;
- d) *diálogo*: a atividade de construção do modelo requer que o analista trabalhe com pessoas de uma gama de disciplinas envolvidas no empreendimento, o que incita o diálogo e conduz a uma melhoria na comunicação;
- e) *aprendizado através do processo de modelagem*: o processo contínuo de conceitualização, quantificação, experimentação e aplicação significa que o modelador irá aprender sobre o sistema e será hábil a aplicar este conhecimento no sistema real.

²⁰ SCHULTZ, R. L.; SULLIVAN, E. M. **Developments in simulation in social and administrative science**. In: *Simulation in social and administrative science: overviews and case examples* (ed. H. K. Guetzkow). Englewood Cliff: Prentice-Hall, 1972.

Já Williams (2002) apresenta uma série de benefícios advindos da elaboração de um modelo, no caso da gestão de projetos:

- a) o modelo pode mostrar como os *inputs* se combinam, podendo mostrar efeitos cumulativos ou compostos;
- b) o modelo possibilita uma análise de cenários e estudos do tipo “o que aconteceria se?”, uma vez que com o modelo pode-se realizar uma série de experimentações que não seriam possíveis com o sistema real;
- c) um modelo amplo do projeto auxilia o seu gestor a entendê-lo de um ponto de vista sistêmico;
- d) o modelo auxilia o gerente a preparar o plano do empreendimento, alocando contingências e realizando o necessário planejamento pré-empreendimento;
- e) o modelo é passível de auditoria, e ter um modelo torna o processo de planejamento também passível de auditoria. Isto significa que os gerentes podem utilizar o modelo para justificar suas decisões passadas;
- f) o efetivo uso de um modelo possibilita o aprendizado pela experiência. Um modelo *post mortem* pode ser utilizado como uma importante ferramenta para compreender por que e como um empreendimento falhou.

Segundo Pidd (2004), qualquer que seja o tipo de modelo, ele é utilizado para auxiliar o raciocínio e o debate sobre ações desejáveis e possíveis, não como a base única para aquela ação. Usados dessa forma, os modelos podem evoluir com o desenrolar do projeto, sendo modificados para permitir que novos aspectos sejam contemplados. Assim que o projeto é concluído, os modelos utilizados são descartados, embora a experiência ganha na sua construção e uso pode ser reusada. Desta forma, estes modelos deveriam ser desenvolvidos parcimoniosamente, iniciando com um modelo mais simples e adicionando refinamentos quando necessário (PIDD, 2004).

3.4 SIMULAÇÃO DE SISTEMAS

Simulação refere-se aos métodos para estudar uma ampla variedade de modelos de sistemas reais através de avaliação numérica, hoje em dia geralmente usando um programa de computador, construídos para reproduzir a operação ou características do sistema ao longo do tempo. Do ponto de vista prático, simulação é o processo de projetar e criar um modelo computadorizado de um sistema existente ou proposto para a condução de experimentos, permitindo uma melhor compreensão do comportamento daquele sistema para um dado conjunto de condições (KELTON; SADOWSKY; STURROCK, 2004).

De acordo com Wagner, Freitas e Wagner (1996), a análise de sistemas através de simulação computacional está baseada na modelagem do sistema a ser simulado utilizando uma linguagem (de simulação ou de programação) e na submissão desse modelo a experimentos com diferentes parâmetros.

3.4.1 Classificação dos Estudos de Simulação

Segundo Saliby (1989) e Law e Kelton (2000), dependendo do tipo de modelo empregado, pode-se classificar a simulação em: (a) determinística ou probabilística; (b) estática ou dinâmica; e (c) discreta ou contínua.

3.4.1.1 Simulação Determinística ou Estocástica

Conforme Saliby (1989), a *simulação determinística* caracteriza-se por apresentar todas as variáveis determinísticas. Nesse caso, o problema descrito pode – e deve – ser estudado analiticamente. Entretanto, à medida que o modelo torna-se mais complexo, envolvendo um grande número de variáveis ou relações, utiliza-se a simulação como recurso alternativo de solução.

Segundo Law e Kelton (2000), se um modelo de simulação não contém nenhum componente probabilístico é chamado determinístico. Neste tipo de modelo o *output* é “determinado” uma vez que o conjunto de quantidades e relacionamentos dos *inputs* seja especificado.

Para Saliby (1989), a *simulação estocástica (ou probabilística)*, ao contrário da anterior, baseia-se geralmente em uma descrição mais próxima e mais complexa da realidade. Nesse caso, o modelo contém uma ou mais variáveis aleatórias, representadas através de amostras que têm por objetivo reproduzir o comportamento probabilístico das variáveis.

Modelos de simulação estocásticos produzem resultados aleatórios e devem, portanto, ser tratados somente como uma estimativa das reais características do modelo (LAW; KELTON, 2000).

3.4.1.2 Simulação Estática ou Dinâmica

Embora o conceito de simulação esteja restrito ao estudo de sistemas que se alteram ao longo do tempo, Saliby (1989) estende sua definição para situações em que a dimensão tempo não é relevante. Nesses casos caracterizam, segundo ele, o que se denomina de simulação estática, como é o caso de aplicações do Método de Monte Carlo²¹ no cálculo de integrais ou os experimentos amostrais utilizados em estudos estatísticos.

Conforme Law e Kelton (2000), um modelo de simulação estático é uma representação de um sistema em um momento particular, ou um que pode ser utilizado para representar um sistema em um momento particular, ou seja, sem se considerar o papel da variável tempo.

Entretanto, segundo Saliby (1989), a maioria das aplicações de simulação refere-se ao estudo do comportamento de um sistema ao longo do tempo, caracterizando uma simulação dinâmica. Neste caso, um modelo dinâmico representa um sistema como este evolui durante o tempo (LAW; KELTON, 2000). Dependendo das características do problema sob estudo, o avanço do tempo pode ser feito de duas formas: a incrementos constantes ou variáveis (SALIBY, 1989).

3.4.1.3 Simulação Discreta ou Contínua

De acordo com o processo de atualização das variáveis que descrevem o estado do sistema, uma simulação pode ser classificada em discreta ou contínua (SALIBY, 1989). Na *simulação discreta* a passagem do tempo é feita em incrementos mensuráveis entre eventos consecutivos. Nesse caso, supõe-se que o estado do sistema não se altera durante este intervalo. Na maioria, as simulações probabilísticas são também discretas (SALIBY, 1989). A simulação de eventos discretos é um dos métodos mais frequentemente utilizados no apoio à decisão (LAW; KELTON, 2000).

²¹ O método ou análise de Monte Carlo consiste na amostragem experimental com números randômicos. Tanto a simulação como o método de Monte Carlo são técnicas de computação numérica. Porém, a simulação é aplicada a modelos dinâmicos, enquanto a análise de Monte Carlo é aplicada a modelos estáticos (COSTA, 2002).

Já em uma *simulação contínua*, a passagem do tempo é vista como se fosse de fato contínua, muito embora seja feita a pequenos intervalos de tempo, por restrição do método empregado e do próprio computador. Este tipo de simulação é muito útil no estudo de sistemas descritos através de equações diferenciais, ou na representação de processos contínuos, como operações de refinarias de petróleo. Modelos contínuos são, em geral, de natureza determinística (SALIBY, 1989).

3.4.2 Etapas do Processo de Simulação

Law e McComas (1990, 1991) e Law e Kelton (2000), detalham as etapas que compõem um estudo típico de simulação (figura 11). Entretanto, deve-se ressaltar que a simulação não é um simples processo seqüencial, já que durante a elaboração pode-se determinar que o modelo não seja ainda completamente válido, requerendo que mais dados sejam coletados ou o modelo seja redefinido (LAW; MCCOMAS, 1990, 1991). A seguir cada uma destas etapas são detalhadas.

De acordo do Law e McComas (1990, 1991), o tempo necessário para cada passo depende das características do sistema sendo modelado. Por exemplo, em geral existem consideravelmente mais dados a coletar para um sistema existente do que para um proposto.

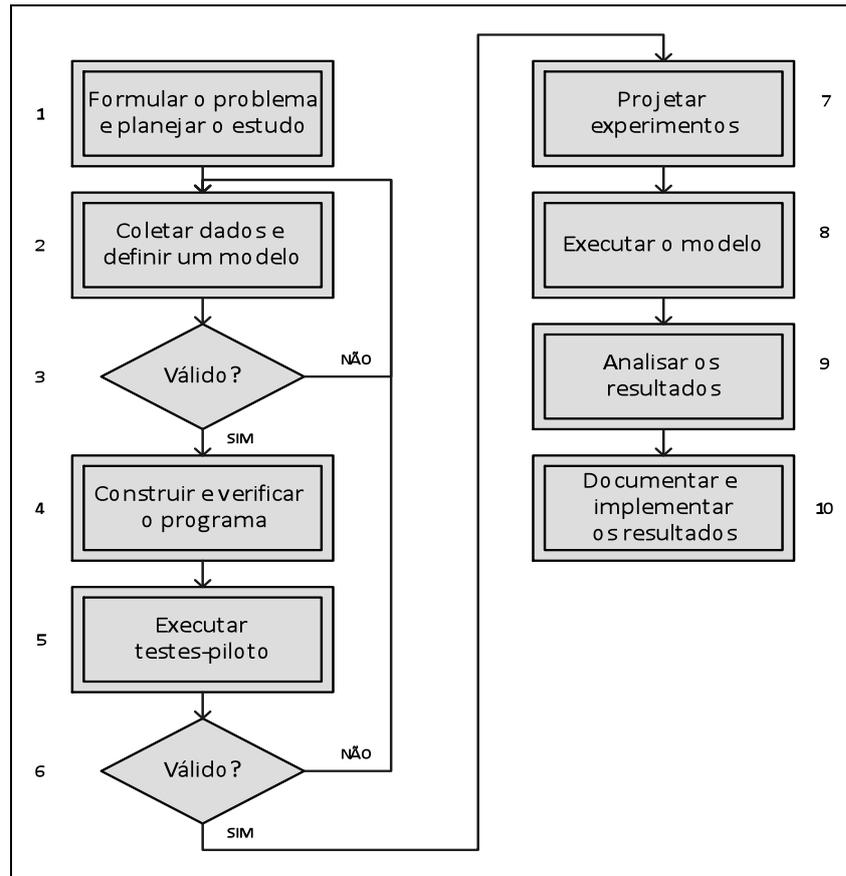


Figura 11: etapas do estudo de simulação (baseado em: LAW; MCCOMAS, 1990, 1991; LAW; KELTON, 2000)

3.4.2.1 Formular o Problema e Planejar o Estudo

Segundo Law e McComas (1990, 1991) e Costa (2002), um dos aspectos mais importantes de um estudo de simulação é a cuidadosa definição dos objetivos do estudo. Apesar da sua importância, esta etapa é frequentemente negligenciada, em parte devido à falta de entendimento da natureza da simulação, a informação que ela pode fornecer e o tempo e esforço para um estudo bem-sucedido (LAW; MCCOMAS, 1990; 1991).

Law e McComas (1990, 1991) recomendam a condução de uma reunião inicial, incluindo gerentes, engenheiros e pessoal operacional, na qual as seguintes tarefas deveriam ser executadas:

- a) identificar os principais problemas de desempenho para o sistema existente (se este sistema existir);

- b) determinar os objetivos gerais do estudo e de cinco a dez aspectos específicos a serem considerados pelo modelo;
- c) decidir como o modelo será utilizado no processo de tomada de decisão;
- d) identificar quem será o usuário final do modelo (um analista experiente *vs* um engenheiro de produção), uma vez que isto afeta quão amigável o modelo deve ser;
- e) especificar as medidas de performance que serão utilizadas para comparar configurações alternativas do sistema;
- f) delinear as configurações do sistema sob estudo, evitando reprogramações mais tarde.

Segundo Kelton, Sadowsky e Sturrock (2004), pode haver algumas circunstâncias em que não é possível definir completamente os objetivos do estudo antes de começar o processo de construção do modelo. Estes tipos de projetos são mais abertos, sendo que a direção do projeto depende dos resultados obtidos nas fases iniciais. Embora não se possa ainda especificar o estudo inteiro completamente no seu início, o desenvolvimento de uma especificação ainda é desejável, considerando que se poderá corrigi-la ou expandi-la gradualmente. Neste caso, este tipo de estudo é conhecido como *estudo em espiral* (KELTON; SADOWSKY; STURROCK, 2004).

3.4.2.2 Coletar Dados e Definir um Modelo

Segundo Law e McComas (1990, 1991), o analista deve coletar informações sobre os procedimentos operacionais e a lógica de controle do sistema sob estudo. Uma vez que estas informações não são do domínio de uma única pessoa, torna-se necessário coletá-las junto a diferentes informantes. Entre os possíveis problemas desta fase destacam-se a inexatidão das informações e a falta de procedimentos operacionais formalizados²². Devem ser coletados dados para estabelecer parâmetros do modelo e distribuições de probabilidade dos *inputs*. Em geral, cada fonte de aleatoriedade deveria ser representada por uma distribuição de probabilidade apropriada, utilizando comparações gráficas e testes estatísticos para avaliar sua correção e adequação.

²² Estes agravantes são característicos dos sistemas de produção na construção civil.

O nível de detalhamento do modelo dependerá dos objetivos do projeto, da disponibilidade de dados, preocupações com credibilidade, restrições de processamento computacional e a opinião de “especialistas” do sistema. Assim, modelos usados para projetar novos sistemas de produção são, em geral, menos detalhados do que aqueles utilizados para “otimizar” sistemas existentes, em função das diferenças nos objetivos do estudo e na disponibilidade de dados (LAW; MCCOMAS, 1990, 1991).

É extremamente importante para o analista de simulação interagir regularmente com o pessoal-chave da empresa, já que (LAW; MCCOMAS, 1990, 1991):

- a) o interesse e o envolvimento do gerente no estudo será mantido;
- b) o conhecimento do gerente sobre o sistema contribui para a real validade do modelo;
- c) o modelo é mais crível, uma vez que o gerente entende e aceita as abstrações do modelo.

Segundo Costa (2002), no estudo de qualquer sistema é muito importante definir o grau de abstração que se trabalhará. Esse grau de abstração vai definir a complexidade do modelo. Assim, segundo o mesmo autor, é recomendado iniciar o desenvolvimento do modelo de forma mais simples, envolvendo somente variáveis que são realmente necessárias para a representação do problema sob estudo, e aumentando o nível de detalhamento à medida que os resultados obtidos não respondam às questões de estudo, acrescentando novas variáveis.

3.4.2.3 O Modelo é Válido?

De acordo com Law e McComas (1990, 1991), uma importante idéia para o aumento da validade/credibilidade do modelo é a realização de uma inspeção estruturada (*structured walkthrough*²³) pelo modelo conceitual antes de apresentá-lo aos interessados. Isto ajuda a assegurar que as assunções do modelo estão corretas, completas e são consistentes, ou seja, que as informações obtidas junto a diferentes pessoas não são contraditórias).

²³ A técnica da inspeção estruturada (*structured walkthrough*) consiste em uma revisão sistemática do modelo de simulação a fim de identificar erros no processo de modelagem (LAW; MCCOMAS, 1991). Neste caso, os envolvidos no processo de modelagem analisam cada elemento constituinte do modelo em busca de comportamentos inesperados.

Tipicamente, em uma inspeção estruturada, várias assunções erradas do modelo são descobertas e corrigidas, algumas poucas novas assunções são adicionadas ao modelo e alguns detalhes são resolvidos pelos especialistas do sistema. Esta inspeção deveria ser realizada antes da codificação do modelo, evitando uma substancial reprogramação se problemas relevantes forem descobertos (LAW; MCCOMAS, 1990, 1991).

3.4.2.4 Desenvolver o Modelo e Verificá-lo e Rodar Testes-piloto

A escolha do *software* usado para desenvolver o programa de simulação pode ter grande impacto no sucesso do estudo, afetando o nível de detalhamento e, assim, a validade do modelo e nos tempos de execução da rotina do modelo e de conclusão do estudo (LAW; MCCOMAS, 1990, 1991).

Law e McComas (1990, 1991) e Law e Kelton (2000) classificam os *softwares* usados para simulação em duas classes: (a) linguagens de programação de propósito geral; e (b) pacotes de simulação, os quais podem ser linguagens específicas de simulação e simuladores orientados à aplicação.

As linguagens de propósito geral são mais ou menos poderosas de acordo com suas características individuais (COSTA, 2002). São bastante conhecidas, estão disponíveis para todos os computadores e têm custo de aquisição mais baixo (LAW; MCCOMAS, 1990, 1991).

Já os pacotes de simulação caracterizam-se por reduzir significativamente o tempo de programação, fornecendo uma estrutura natural para a modelagem e a simulação (LAW; MCCOMAS, 1990, 1991). Nessa categoria, as *linguagens de simulação* são genéricas por natureza e o desenvolvimento do modelo é feito através de códigos escritos. Linguagens de simulação fornecem, em geral, uma grande flexibilidade de modelagem, mas são de difícil uso. Exemplos de linguagens de simulação são AutoMod II, GPSS H, MODSIM, SIMAN e SLAM II (LAW; MCCOMAS, 1990, 1991). Já os *simuladores* são orientados para uma aplicação em particular, e o modelo é desenvolvido usando gráficos, caixas de diálogo e menus *pull-down* (LAW; KELTON, 2000). Exemplos desse tipo são COMNET II.5, ProModel, SIMFACTORY II.5, WITNESS (LAW; MCCOMAS, 1990, 1991).

Segundo Costa (2002), existe uma contraposição entre flexibilidade e facilidade de desenvolvimento de acordo com a ferramenta escolhida. Linguagens de aplicação geral

permitem alta flexibilidade no desenvolvimento de um programa de simulação, porém exigem grande conhecimento da linguagem e demandam um grande esforço de programação. Por outro lado, os simuladores são mais fáceis de aprender e usar, mas podem não ser suficientemente flexíveis para alguns problemas (LAW; KELTON, 2000). Estes sistemas requerem consideravelmente menos tempo de programação e não exigem conhecimento de programação, podendo ter construtos de modelagem relacionados ao sistema de interesse (LAW; MCCOMAS, 1990, 1991).

A figura 12, abaixo ilustra a relação flexibilidade vs facilidade de uso dos diferentes tipos de *softwares* de simulação.

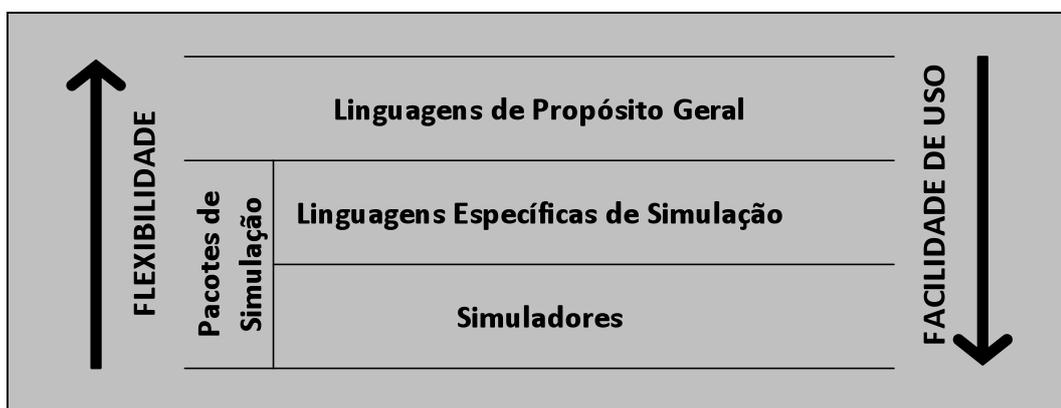


Figura 12: tipos de ferramentas computacionais utilizadas na simulação

Há uma variedade de procedimentos utilizados para verificar o programa de simulação, incluindo (LAW; MCCOMAS, 1990, 1991):

- a) desenvolver modularmente o programa;
- b) utilizar depuradores e rastreadores interativos;
- c) realizar uma inspeção estruturada do código;
- d) checar os dados de saída da simulação em busca de razoabilidade;
- e) utilizar animação.

Testes-piloto do modelo de simulação depurado são feitos para propósito de validação (LAW; MCCOMAS, 1990, 1991).

3.4.2.5 O Modelo é Válido?

Resultados numéricos e animações dos testes-piloto devem ser revisados cuidadosamente por especialistas do sistema para detectar erros remanescentes nas assunções do modelo (LAW; MCCOMAS, 1990, 1991).

A análise de sensibilidade é utilizada para determinar os aspectos do modelo, tais como um parâmetro de entrada, uma distribuição de probabilidade ou o nível de detalhe de um subsistema, que têm maior impacto sobre as medidas de desempenho de interesse (LAW; MCCOMAS, 1990, 1991; LAW; KELTON, 2000).

Segundo Law e McComas (1990, 1991), o teste mais definitivo da validade de um modelo de simulação é estabelecer se suas medidas de desempenho são bastante próximas daquelas esperadas de uma configuração proposta do sistema. Se o sistema existir, então uma simulação-piloto para o sistema existente é feita e seus resultados são comparados com as medidas do sistema existente. Se os valores forem próximos o modelo é considerado válido e é então modificado para representar o sistema proposto. Quanto maior a *comunalidade*²⁴ entre o sistema existente e o proposto, maior será a confiança no modelo do sistema proposto (LAW; MCCOMAS, 1990, 1991; LAW; KELTON, 2000).

3.4.2.6 Projetar Experimentos

Segundo Costa (2002), o projeto de experimentos tem dois objetivos: (a) rodar muitas vezes o modelo a um baixo custo²⁵ e de forma rápida; e (b) fornecer uma estrutura que colabore com o processo de aprendizagem dos envolvidos.

Nessa etapa, decide-se as configurações do sistema que serão simuladas, já que há algumas vezes um número maior de alternativas possíveis do que se pode simular. Algumas vezes não é possível tomar essa decisão neste momento, uma vez que, durante a etapa 9, análise dos resultados, configurações adicionais são sugeridas (LAW; MCCOMAS, 1990, 1991). Essa etapa corresponde ao que Costa (2002) chama de *fase estratégica* do projeto de experimentos.

²⁴ Segundo Hair Jr. *et al.* (2005), a comunalidade é a quantia total de variância que uma variável compartilha com todas as outras variáveis incluídas na análise. Assim, segundo os mesmos autores, as comunalidades são estimativas de variância compartilhada, ou comum, entre as variáveis.

²⁵ Nesse caso, baixo custo refere-se ao aspecto computacional, buscando a “otimização” dos recursos computacionais, reduzindo assim exigências de processamento.

A fim de se obter uma estimativa estatisticamente precisa (com pequena variância) e livre de viés (média igual à medida de desempenho), o analista deve especificar, para cada projeto do sistema, valores apropriados para as seguintes escolhas (LAW; MCCOMAS, 1990, 1991; LAW; KELTON, 2000):

- a) duração de cada rodada do modelo;
- b) número de rodadas independentes;
- c) condições iniciais para cada rodada (todas as máquinas disponíveis e nenhuma parte no sistema, por exemplo);
- d) duração do período transiente (*warm-up*), se for necessário.

3.4.2.7 Rodar o Modelo e Analisar os Resultados

Nessa fase as execuções do modelo previstas na etapa anterior são executadas (LAW; MCCOMAS, 1990, 1991). Rodar o modelo corresponde à *fase tática* do projeto de experimentos. O resultado desta fase é o estabelecimento dos diversos cenários que serão executados (COSTA, 2002).

Os resultados das execuções do modelo são utilizados para construir estimativas numéricas das medidas de desempenho de interesse. Estas estimativas são utilizadas para determinar a eficácia de um projeto de sistema em particular ou para determinar o melhor projeto do sistema relativo a uma medida de desempenho especificada (LAW; MCCOMAS, 1990, 1991).

Para auxiliar a análise dos dados podem ser utilizadas ferramentas visuais, como gráficos e imagens (LAW; MCCOMAS, 1990, 1991; COSTA 2002).

3.4.2.8 Documentar e Implementar os Resultados

Uma boa documentação é muito importante, já que modelos de simulação são freqüentemente utilizados para mais de uma aplicação. Essa deveria incluir o documento de premissas, documentação do programa e um relatório resumindo os resultados e conclusões do estudo (LAW; MCCOMAS, 1990, 1991).

A maioria dos projetos de simulação é concluída com uma apresentação final com a participação de todos os interessados não envolvidos no processo de construção do modelo. Nessa reunião o uso da animação pode ser útil para garantir a credibilidade no modelo por parte dos participantes. É importante discutir também como as informações foram obtidas e quais foram os esforços feitos para a validação e verificação do modelo.

3.4.3 Condições para um Estudo de Simulação Eficaz

Segundo Law (1991b), um dos aspectos mais importantes para a eficácia de um estudo de simulação diz respeito à determinação dos aspectos do sistema que necessitam ser incorporados no modelo de simulação e aqueles que podem ser ignorados. Ainda para Law (1991b), não há necessidade de haver uma correspondência um para um entre cada elemento do sistema e cada elemento do modelo.

A determinação do nível de detalhe adequado de um modelo requer conhecimento sobre o sistema, um treinamento apropriado (por exemplo, em metodologia de simulação, modelos estocásticos, etc.), e experiência em modelagem de sistemas reais (LAW, 1991b). Há algumas regras gerais que podem ser seguidas (LAW, 1991b):

- a) definir cuidadosamente no início do estudo os aspectos a serem investigados e as medidas de desempenho para avaliação. Se os aspectos de interesse não forem especificados torna-se impossível determinar o nível de detalhe apropriado;
- b) utilizar “especialistas” e análise de sensibilidade para ajudar a determinar o nível de detalhe. Pessoas familiares ao sistema são boas referências quanto aos componentes do sistema que são provavelmente os mais importantes e que necessitam ser modelados. Análise de sensibilidade pode ser utilizada para determinar quais parâmetros, distribuições ou subsistemas terão maior impacto nas medidas de desempenho desejadas;
- c) um modelo de simulação deveria conter somente detalhes suficientes para enfocar os aspectos de interesse;
- d) o nível de detalhe do modelo deveria ser consistente com os tipos de dados e informações disponíveis, o que pode variar se o modelo será utilizado para

projetar um novo sistema de produção ou para “otimizar” um sistema existente, uma vez que poucos dados e somente uma vaga descrição da lógica de controle estará disponível para o sistema proposto;

e) o tempo de execução ou restrições de memória podem afetar o nível de detalhe possível para certos subsistemas;

f) em alguns estudos de simulação, restrições de tempo e dinheiro são os principais fatores na determinação da quantidade de detalhes do modelo.

Law e McComas (1989) afirmam que o desenvolvimento de um modelo de simulação de um sistema de produção complexo requer certa habilidade e experiência a fim de gerenciar o projeto de simulação de forma efetiva e também decidir os elementos do sistema real a serem incluídos no modelo.

3.5 MODELAGEM E SIMULAÇÃO INTERATIVA VISUAL

Segundo Ceric (1997), na simulação tradicional, baseada em procedimentos de simulação utilizando linguagens de programação, a transparência do modelo é limitada devido à necessidade de conhecimento e domínio das linguagens de programação. A flexibilidade de tais modelos também é limitada, já que a interatividade com o modelo é pequena, tanto durante a modelagem como durante a execução da rotina (CERIC, 1997).

A partir do desenvolvimento tecnológico, a popularização e os enormes avanços dos computadores e programas, houve uma profunda modificação na forma como uma simulação é realizada (PIDD, 2002), entre as quais figura a Modelagem Interativa Visual.

Conforme Elden (1992), a modelagem interativa visual²⁶ começou em 1976 como uma extensão para a simulação de eventos discretos. As primeiras aplicações foram desenvolvidas por Hurrion (1976, 1978), nas quais variáveis importantes do sistema sendo modelado foram representadas na tela do computador na forma de um mapa esquemático. Desta forma, o

²⁶ O termo “Modelagem Interativa Visual” refere-se ao caso geral de um modelo que utiliza qualquer técnica analítica, sendo que a Simulação Interativa Visual trata-se de um caso especial de um Modelo Interativo Visual (ELDEN, 1992). Neste trabalho, que trata do emprego de técnicas de simulação, os termos “Modelagem Interativa Visual” e “Simulação Interativa Visual” são tratados como sinônimos.

usuário podia ver o que estava acontecendo dentro do modelo enquanto este era rodado²⁷ (ELDEN, 1992).

A modelagem interativa visual (*Visual Interactive Modelling* – VIM) integra modelos matemáticos ou simbólicos com interação durante a execução da rotina de programação do modelo e apresentação gráfica dos resultados em tempo real para auxiliar tomadores de decisão (KIRKPATRICK; BELL, 1989).

Já a VIS envolve o uso de uma tela gráfica dinâmica, permitindo ao usuário variar os parâmetros do modelo e selecionar objetos durante a execução da rotina de simulação. Esta apresentação visual pode ser constituída pela mistura de diagramas de bloco, diagramas icônicos, animação, gráficos e apresentação textual de variáveis, etc. (AU; PAUL, 1996).

Segundo Shi e Zhang (1999), animar significa, literalmente, dar vida. Na prática, isto significa visualizar mudanças de parâmetros ao longo do tempo. Como uma ferramenta efetiva para compreender e avaliar o funcionamento e comportamento de um sistema existente em tempo real, a tecnologia de animação foi integrada à tecnologia de simulação discreta.

As características dinâmicas e as mudanças discretas de informações ao longo do tempo de um processo podem ser visualizadas na tela do computador. Os gráficos podem mostrar as mudanças de um sistema ao longo do tempo (LAW; MCCOMAS, 1992; LAW; KELTON, 2000). Através da visualização destas mudanças, a animação possibilita ao usuário testar o modelo de simulação e validar os seus resultados (SHI; ZHANG, 1999), além de propiciar *insights* valiosos sobre o comportamento do sistema real (WELGAMA; MILLS, 1995), a comparação entre vários sistemas alternativos e a previsão do comportamento futuro do sistema (CERIC, 1997).

Segundo Law (1991), quando se pensa no uso de gráficos na simulação, a primeira idéia que vem à mente é a animação. Entretanto, além do uso na elaboração do modelo, Law (1991) aponta o uso de gráficos na escolha das distribuições de probabilidade das entradas. Em geral, cada fonte de aleatoriedade do sistema necessita ser representado por uma distribuição

²⁷ O termo “rodar um modelo” neste caso diz respeito ao ato de modelar o sistema com relação ao tempo, ou seja, reproduzir o comportamento dinâmico do sistema. Rodar não deveria ser confundido com o termo executar. Tendo em vista que o VIM/VIS é um programa de computador, este necessita ser executado a fim de proporcionar as facilidades de interação e visualização. Assim, esta execução do programa de computador não deveria ser confundida com rodar um modelo de simulação. Se um modelo está parado, isto é, não está rodando, o programa que suporta a simulação está ainda em execução, mas o relógio da simulação está parado (ELDEN, 1992).

apropriadamente selecionada. Se os dados podem ser obtidos de um sistema existente, então técnicas estatísticas e gráficas (histogramas, comparações gráficas, etc.) podem ser utilizadas para encontrar uma distribuição padrão que é um bom modelo para a distribuição que gerou os dados. Gráficos podem ser utilizados também para auxiliar a interpretação dos resultados da simulação. (LAW, 1991).

Au e Paul (1996) afirmam que vários tipos elementos gráficos podem ser aplicados em simulação computacional tanto no estágio de especificação, na fase de resultados experimentais, como durante a execução da rotina do modelo. Os tipos de elementos gráficos que podem ser encontrados na maioria dos pacotes de simulação são (AU; PAUL, 1996):

- a) diagramas de bloco descrevendo a lógica de um modelo de simulação ou a aparência simbólica do sistema durante a simulação;
- b) ícones mostrando a lógica do modelo ou as interações dos objetos nas mudanças de estado;
- c) representações gráficas, tais como histogramas, séries temporais, mostrando as mudanças de variáveis com o tempo e outros fatores específicos;
- d) apresentação textual de parâmetros.

Conforme Bell (1985), nos dois extremos no espectro de modelos interativos visuais estão os modelos gráficos figurativos e os modelos gráficos icônicos. Um modelo gráfico figurativo usa gráficos para apresentar o resultado da execução da rotina de um modelo. Os resultados gráficos são tipicamente gráficos de barras ou de linhas, ou outras formas de representação de dados (BELL, 1985).

Já um modelo gráfico icônico, por sua vez, representa esquematicamente o sistema sendo simulado. Um diagrama PERT (*Program Evaluation and Review Technique*) é icônico, assim como um mapa (BELL, 1985). Ainda segundo Bell (1985), o efeito é como olhar um vídeo enquanto a simulação acontece. Animação usa gráficos icônicos para representar as mudanças de estado. Neste caso, a tela não intenta imitar a aparência do sistema sendo simulado, mas dirigir a atenção para as interações lógicas do sistema. Neste caso, complementa Bell (1985), usar diagramas de blocos que mostrem o estado do sistema pode ser melhor do que tentar desenvolver demoradamente ícones específicos. Gráficos representacionais podem também ser usados para apresentar a dinâmica de uma simulação (BELL, 1985).

Muitos modelos interativos visuais incluem tanto gráficos figurativos e icônicos, embora modelos figurativos sejam os mais comuns (BELL, 1985). A escolha do tipo de modelo mais apropriado depende de dois fatores: se os resultados são úteis e se o tomador de decisão acredita que o modelo por trás do gráfico é uma representação válida do sistema real (BELL, 1985).

Segundo Law e Kelton (2000), há dois tipos de processos de animação: a animação concorrente e a pós-processada. Na *animação concorrente* a animação é mostrada ao mesmo tempo em que a simulação está sendo rodada. Já na *animação pós-processada* as mudanças de estado na simulação são salvas em um arquivo e usadas para dirigir os gráficos após a simulação ter acabado.

De acordo com Law e McComas (1992), muitos pacotes de animação operam em um modo concorrente de forma que a animação é mostrada simultaneamente à simulação. Ainda conforme os mesmos autores, este modo de operação permite ao usuário interromper a simulação quando algum comportamento indesejado é detectado ou quando mais mudanças têm que ser feitas para o modelo e uma nova simulação começar a ocorrer. Outra vantagem é que esta capacidade pode ser utilizada para explorar superficialmente várias configurações diferentes do sistema (LAW; MCCOMAS, 1992).

Além da animação, um modelo interativo visual fornece também facilidades interativas que possibilitam ao usuário ajustar os parâmetros do modelo (ELDEN, 1992). Quando os parâmetros são ajustados os gráficos são atualizados permitindo ao usuário ver como as variáveis significantes foram mudadas. A idéia é que o usuário pode ganhar entendimento sobre o relacionamento entre variáveis de entrada e variáveis de saída (ELDEN, 1992).

Na VIM, a interação entre o modelo matemático ou simbólico e o modelo visual agrega a importância do envolvimento do usuário em todos os estágios do desenvolvimento do modelo (BELL *et al.*, 1999). Desta forma, conforme destaca Elden (1992), a VIM aumenta a comunicação entre o analista e o cliente. Enquanto o propósito da simulação é obter um nível mais aprofundado no entendimento dos dados, o propósito da interação é oferecer ao usuário a facilidade de poder trabalhar diretamente com o modelo e o processo de simulação, influenciando no seu comportamento e realizando experimentações que visem compreender suas propriedades e relacionamentos (WAGNER; FREITAS; WAGNER, 1996).

Do ponto de vista dos sistemas de apoio à decisão, segundo Ceric (1997), a abordagem mais popular para o desenvolvimento destes sistemas é a abordagem de prototipagem, também conhecida como abordagem evolucionária ou projeto iterativo, que envolve a participação do usuário de uma forma iterativa até que um modelo apropriado do sistema seja construído (CERIC, 1997). Desta forma, o método de modelagem interativa visual tem muito em comum com esta abordagem, permitindo a realização de um ciclo de “teste/avaliação/melhoria” que é repetido até o entendimento do problema por parte do modelador e do usuário do modelo e haja convergência a uma solução (BELL *et al.*, 1999).

3.5.1 Vantagens e Desvantagens da Simulação Interativa Visual

3.5.1.1 Vantagens

As principais vantagens do uso da VIS são:

- a) *maior compreensão do modelo*: a tela visual possibilita ao usuário acompanhar eventos enquanto esses ocorrem e identificar potenciais erros no sistema (LAW; MCCOMAS, 1992; LAW; KELTON, 2000; ROBINSON, 2003);
- b) *verificação e validação do modelo mais fácil*: erros de código podem ser identificados através de eventos espúrios que ocorrem enquanto o modelo é executado. Não-especialistas em simulação podem ver o modelo enquanto ele é executado e opinar sobre sua validade (LAW; MCCOMAS, 1992; LAW; KELTON, 2000; ROBINSON, 2003);
- c) *possibilidade de experimentação interativa*: novas idéias podem ser implementadas no modelo, melhorando o entendimento do modelo e do sistema, e possibilitando que melhorias potenciais sejam identificadas (PIDD, 2002; ROBINSON, 2003);
- d) *melhoria do entendimento dos resultados*: os resultados podem ser relacionados a eventos específicos que foram observados durante a execução da rotina do modelo. A simulação pode ser reexecutada e observada para compreender por que resultados específicos foram obtidos (PIDD, 2002; ROBINSON, 2003);

- e) *melhora a comunicação do modelo e seus resultados para todos os envolvidos:* não-especialistas em simulação são aptos a entender o modelo, possibilitando que um grupo mais amplo participe do estudo de simulação (LAW; MCCOMAS, 1992; LAW; KELTON, 2000; ROBINSON, 2003);
- f) *fornece o potencial para usar simulação na solução de problemas em grupo:* validação e experimentação podem ser desenvolvidas em um grupo formado por todas as partes interessadas. Isso pode facilitar uma maior criatividade e o consenso na solução do problema (ROBINSON, 2003).

Chau e Bell (1995) testaram, através de um experimento, três tipos de sistemas de apoio à decisão baseados em simulação (um modelo de simulação tradicional sem recursos visuais, um modelo VIS e um modelo VIS com “sistemas emparelhados²⁸”). Este experimento demonstrou que o uso de VIS, particularmente com sistemas emparelhados, promoveu uma tomada de decisão mais efetiva do que a simulação tradicional.

Já Bell *et al.* (1999) realizaram um levantamento junto aos decisores sobre a percepção desses a respeito do impacto e valor do uso de modelagem interativa visual. Os resultados deste levantamento apontaram que os principais benefícios do emprego de VIM foram: tornar as decisões mais fáceis de “vender” para outros, o aumento da confiança nos resultados foi mencionado e a facilidade de uso e experimentação.

3.5.1.2 Desvantagens

Além das vantagens reconhecidas, a animação tem certas desvantagens. Em primeiro lugar, a animação não substitui a análise estatística cuidadosa dos dados resultantes. Não se pode concluir que um sistema está bem definido apenas observando uma animação por um curto período de tempo (LAW, 1991). Neste sentido, Rohrer (2000) afirma que os gráficos não tornam um modelo inválido válido, mas adicionam valor ao processo de simulação.

Animar uma simulação aumenta o tempo de elaboração do modelo e pacotes de simulação com esta capacidade são freqüentemente mais caros. Ainda, somente parte da lógica de um modelo de simulação pode ser realmente visto em uma animação. Assim, uma animação “correta” não garante um modelo válido ou depurado (LAW, 1991).

²⁸ Um modelo com “sistemas emparelhados” (*paired-systems*) é aquele em que o desempenho comparativo de dois sistemas pode ser observado visualmente, bem como mensurado usando estatísticas sob condições precisamente controladas (CHAU; BELL, 1995).

No levantamento realizado por Bell *et al.* (1999) foram apontadas as principais desvantagens do emprego de VIM: o tempo de desenvolvimento e a expertise necessários para o processo de modelagem, a aceitação dos resultados sem seu completo entendimento, o aumento no tempo necessário de participação do decisor no processo.

3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo procurou localizar a modelagem/simulação interativa visual como uma técnica de apoio à tomada de decisão gerencial.

O próximo capítulo apresentará uma revisão do emprego da simulação na gestão de empreendimentos da construção civil, mostrando a evolução das técnicas aplicadas, bem como a convergência dos estudos para o emprego de técnicas que possibilitem maior transparência ao processo de modelagem/simulação, que possibilite uma maior interação entre modelador e usuário, e a facilitação do processo de simulação.

4 SIMULAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, faz-se uma retrospectiva histórica do uso de simulação na construção civil, salientando a tendência de uso de elementos gráficos e animação para tornar a simulação mais amigável ao usuário, bem como aumentar a participação deste na elaboração de modelos de simulação.

Por fim, são discutidos dois problemas que contribuem para o uso restrito da simulação, quais sejam: (a) dificuldade em estabelecer durações probabilísticas para as atividades; e (b) longo tempo de elaboração do modelo de simulação. Ambos fortemente relacionados ao ambiente da construção civil.

4.2 EMPREGO DA SIMULAÇÃO NA GESTÃO DA CONSTRUÇÃO

Na gestão de sistemas de produção da construção, a simulação pode ser utilizada para alcançar vários objetivos (SANTOS, 2001):

- a) estimar níveis de produtividade;
- b) otimizar a produtividade de operações e processos;
- c) avaliar os impactos da incorporação de inovações tecnológicas;
- d) selecionar o melhor método construtivo comparando desempenhos de alternativas disponíveis;
- e) melhorar o seqüenciamento de processos repetitivos;

- f) planejar a utilização dos equipamentos de forma mais eficiente;
- g) estimar os tempos médios de espera;
- h) solucionar problemas em tempo real.

A seguir é apresentado um histórico da utilização da simulação como ferramenta de apoio à tomada de decisão na construção civil com base em artigos publicados nos últimos dez anos sobre este tema.

4.2.1 Programas de Simulação Desenvolvidos para a Construção Civil

De acordo com Shi e AbouRizk (1997) e Hajjar e AbouRizk (2002), os primeiros esforços para a utilização de simulação na construção podem ser atribuídos a Halpin (1973), que a popularizou com o desenvolvimento de um sistema chamado CYCLONE – *Cyclic Operation Network Sytem*, desenvolvido especificamente para aplicação na construção civil.

Este sistema é bastante simples, já que todo o modelo está contido em uma rede (MARTINEZ, 1996). Os processos repetitivos são tratados através da simulação de Monte Carlo, considerando os recursos como unidade que fluem através do modelo (ABRAHAM; HALPIN, 1998²⁹ *apud* SANTOS, 2001). Assim, as unidades lógicas circulam em um diagrama de fluxo fechado, no qual são conectados símbolos que representam as atividades, além de esperas e outras funções (SENIOR; HALPIN, 1998³⁰ *apud* SANTOS, 2001). Posteriormente, a fim de melhorar o desempenho do *software*, permitindo a modelagem de efeitos dependentes do tempo e da manipulação de curvas de aprendizagem foi desenvolvido um *software* específico chamado MicroCYCLONE – *Microcomputer Cyclic Operational Network Sytem* (SANTOS, 2001).

O sistema RESQUE – *Resource Based Simulation System for Construction Process Planning* (Chang, 1986) foi desenhado como uma melhoria para o sistema CYCLONE. A modelagem do RESQUE não está limitada à informação contida na rede, existindo um módulo que define distinções entre recursos e aumenta o controle sobre a simulação (MARTINEZ, 1996).

²⁹ ABRAHAM, D. M.; HALPIN, D. W. **Simulation of the construction of cable-stayed bridges**. Canadian Journal of Civil Engineering. v. 25, n.º 3 (June 1998) pp. 490-499

³⁰ SENIOR, B. A.; HALPIN, D. W. **Simplified Simulation System for Construction Projects**. Journal of Construction Engineering and Management. Volume 124, Issue 1, pp. 72-81 (January/February 1998).

O COOPS – *Construction Object-oriented Simulation System*, (LIU, 1991) é outro sistema de simulação para construção que também é uma extensão para o CYCLONE, utilizando uma linguagem de programação orientada a objeto, na qual a rede de simulação pode ser desenhada interativamente na tela do computador (MARTINEZ, 1996).

Já o sistema CIPROS – *Construction Integrated Planning and Simulation Model* (ODEH, 1992) é tanto uma ferramenta de planejamento no nível do empreendimento como do processo (MARTINEZ, 1996). O CIPROS estendeu as capacidades do sistema RESQUE, permitindo propriedades múltiplas para recursos, bem como um esquema de seleção de recursos mais complexo (MARTINEZ, 1996).

O sistema DISCO – *Visual Construction Operations Simulation* (HUANG; GRIGORIADIS; HALPIN, 1994) é um pré e pós-processador para o MicroCYCLONE. O pré-processador tem uma interface gráfica e interativa similar ao COOPS. O pós-processador anima a simulação através de um *playback* de várias estatísticas, conforme elas ocorreram durante a simulação (MARTINEZ, 1996).

O STROBOSCOPE – *State and Resource Based Simulation of Construction Processes* (MARTINEZ, 1996) é uma linguagem de simulação de propósito geral no qual uma rede representa somente o modelo de simulação no nível conceitual e seus detalhes são especificados através de programação. No nível conceitual os elementos utilizados no STROBOSCOPE apresentam similaridades aos utilizados no CYCLONE (MARTINEZ; IOANNOU, 1999). No STROBOSCOPE pode-se acessar dinamicamente o estado da simulação e as propriedades dos recursos envolvidos em uma operação, permitindo a construção de modelos de simulação de processos de construção complexos com maior facilidade (HALPIN *et al.*, 2003). Um modelo de simulação do STROBOSCOPE pode ser animado em duas dimensões através da utilização do *software* PROOF (IOANNOU; MARTINEZ, 1996) ou em três dimensões utilizando o VITASCOPE - *Visualization of Simulated Construction Operations* (KAMAT, 2003). Dentre os sistemas de simulação para a construção, o STROBOSCOPE é o sistema que tem sido mais utilizado por muitos acadêmicos atualmente.

O sistema ABC – *Activity Based Construction Modeling and Simulation Method* (SHI, 1999) utiliza somente um simples elemento, a atividade de construção, para modelar um processo de construção. O ABC caracteriza-se por ser intuitivo para profissionais da construção já que seu

elemento de modelagem tem o mesmo significado e atributos como utilizados no CPM. Hong, Shi e Tam (2002) estendeu o uso do ABC através de uma ferramenta de edição visual e uma animação 2-D para validação e verificação do modelo (HALPIN *et al.*, 2003).

O sistema SPS – *Special Purpose Simulation* (ABOURIZK; HAJJAR, 1998) e o SIMPHONY (HAJJAR; ABOURIZK; 1999) utilizavam um conjunto de ícones para representar vários recursos de construção e seus fluxos para construir modelos de simulação. Estes ícones eram pré-construídos pelos autores do *software* para cobrir diferentes processos de construção (HALPIN *et al.*, 2003). Para Hajjar e Abourizk (2002) a modelagem gráfica combinada com modelagem de propósito especial permite em uma interface de usuário altamente amigável, tanto para a criação do modelo como para a interpretação dos resultados.

A partir das características deste programas de simulação, percebe-se que houve uma evolução no sentido de reduzir a necessidade de conhecimento profundo de linguagens de simulação por parte do usuário, para sistemas que valorizam as características gráficas, permitindo uma facilitação no processo de modelagem, bem como uma maior interação entre modelador e usuário.

4.2.2 Estudos de Simulação na Construção Civil

Para caracterizar a utilização da simulação como uma ferramenta de tomada de decisão na construção, realizou-se um levantamento acerca dos temas tratados em estudos apresentados nas últimas dez edições (1997 – 2006) da *Winter Simulation Conference* – WCS e da Conferência Anual do *International Group for Lean Construction* – IGLC. A WCS é um dos mais importantes eventos internacionais sobre simulação de eventos discretos enquanto que a Conferência do IGLC trata-se de um encontro anual de pesquisadores que buscam adaptar os conceitos da produção enxuta ao contexto da construção civil.

De uma forma geral (considerando que uma discussão pormenorizada de cada um dos artigos apresentados poderia ser cansativa), os artigos apresentados na WCS dizem respeito, na grande maioria, à modelagem e simulação de operações de construção, em especial a operações de movimentação de terra (HAJJAR; ABOURIZK, 1997; KANNAN; MARTINEZ; VORSTER, 1997; MARTINEZ, 1998; KANNAN; MARTINEZ; VORSTER, 1999; MARZOUK; MOSELHI, 2000; KANNAN; SCHMITZ; LARSEN, 2000; MARZOUK; MOSELHI, 2002), construção de túneis (GUNAL; VERN, 1998; BALBONTIN-BRAVO, 1998; RUWANPURA; ABOURIZK, 2001; IOANNOU; LIKHITRUANGSILP, 2005; AL-

BATTAINÉH *et al.*, 2006), produção de pré-fabricados (SHI *et al.*, 1998; RUWANPURA *et al.* 1999; MARASINI; DAWOOD, 2002) e da cadeia de suprimentos de forma geral (WALSH, 2002; ARBULU *et al.*, 2002; WALSH; BASHFORD; SAWHNEY, 2003).

Na Conferência Anual do IGLC, apenas onze artigos utilizando simulação como ferramenta de apoio à tomada de decisão foram apresentados nas suas últimas dez edições. O primeiro artigo sobre simulação foi apresentado na edição do ano de 1997 (TOMMELEIN, 1997). De forma geral, os artigos apresentados nesta conferência dizem respeito à simulação de operações ou processos individuais dos benefícios da utilização de métodos e técnicas da produção enxuta (TOMMELEIN, 1997; ALSUDAIRI *et al.*, 1999; ALSUDAIRI; DIEKNANN; SONGER, 2000), indicar os impactos de diferentes estratégias de capacidade no desempenho de empreendimentos da construção (HORMAN, 2001), testar configurações alternativas de sistemas de produção na construção (DRAPER; MARTINEZ, 2002), localização e dimensionamento de estoques de proteção (*buffers*) (TOMMELEIN, 2006; ALVES; TOMMELEIN, 2003; 2006; GONZÁLEZ; ALARCÓN; GAZMURI, 2006).

Alves, Tommerlein e Ballard (2006) discutem a utilização da simulação como uma ferramenta do projeto do sistema de produção em empreendimentos da construção civil. Para tanto, os autores utilizaram o STROBOSCOPE, para modelar uma cadeia de suprimentos de dutos de ar-condicionado, aquecimento e ventilação, ilustrando apenas como diferentes configurações de tamanhos e localização de estoques de segurança e o tamanho de lotes de produção e transferência poderiam impactar no desempenho desses sistemas de produção.

Desta forma, além do pequeno número de estudos publicados acerca do uso da simulação na construção civil, percebe-se que, em grande parte, estes se relacionam ao emprego desta técnica no estudo de processos ou operações de construção individuais. Os artigos que tratam do uso desta ferramenta no estudo de sistemas de produção, o fazem através do teste de proposições ou em sistemas reais, em estudos *ex post*, ou em sistemas teóricos, não existentes.

4.3 DIFICULDADES PARA O USO DE SIMULAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

4.3.1 Estimativas de Probabilidades na Ausência de Dados

Vanegas, Bravo e Halpin (1993) definem quatro grupos básicos de informações necessárias para modelar um sistema: (a) informações gerais sobre o modelo; (b) informações sobre a rede de processos; (c) informações sobre as durações das atividades, considerando o tipo de distribuição e seus parâmetros; e (d) informações sobre recursos disponíveis.

O terceiro grupo, a necessidade de informações sobre as durações das atividades, requer, de acordo com Maio *et al.* (2000), que sejam utilizados dados estatísticos sobre os processos de construção. Estimar a duração de uma atividade de construção é crucial para desenvolver um procedimento de simulação válido e útil, já que os tempos afetam as taxas de produção, o tempo de conclusão de uma atividade e o índice de utilização dos recursos (FENTE; KNUTSON; SCHEXNAYDER, 1999).

Entretanto, segundo Schexnayder, Knutson e Fente (2005), a aplicação da simulação na construção expõe o modelador a uma situação na qual inexistem ou há somente uma quantidade limitada de dados disponíveis o que dificulta a correta escolha de uma função distribuição de probabilidade (FDP) apropriada (FENTE; SCHEXNAYDER; KNUTSON, 2000; SCHEXNAYDER; KNUTSON; FENTE, 2005).

De acordo com Fente, Knutson e Schexnayder (1999), a falta de confiança na seleção subjetiva de uma Função de Distribuição de Probabilidade (FDP) para a duração de uma atividade, em função da natureza imprevisível dos processos de construção, é um problema que tem limitado o uso de simulação como uma ferramenta prática na gestão da construção.

A estimativa dos parâmetros de uma FDP é controlada pela disponibilidade de dados. Quando há dados disponíveis, o especialista pode usar uma variedade de métodos numéricos para calcular os parâmetros d FDP característica, tais como o método dos momentos, máxima verossimilhança, métodos dos mínimos quadrados, ou outros métodos numéricos que conduzam à estimativa dos parâmetros que uma distribuição característica (SCHEXNAYDER; KNUTSON; FENTE, 2005).

Entretanto, segundo Law, McComas e Vincent (1994), há algumas situações em que não é possível coletar dados sobre variáveis aleatórias de interesse. Isso pode ocorrer quando está se estudando um sistema de produção que ainda não existe ou, se existe, o número de distribuições de probabilidade necessárias pode ser grande e o tempo disponível para o estudo de simulação dificulta a coleta e análise dos dados necessária. Nesses casos, as ferramentas estatísticas usuais não são aplicáveis na seleção da distribuição de probabilidade correspondente.

Na ausência de dados, conforme Schexnayder, Knutson e Fente (2005), um especialista poderá fornecer uma estimativa subjetiva sobre a duração de uma dada atividade, a partir da qual será derivada uma FDP para modelar a distribuição de um processo sob estudo. Como notam Wallsten e Budescu (1983), as estimativas de probabilidades feitas por especialistas nas áreas que lhes são familiares a esses podem ser bastante precisas.

Para tanto, de acordo com MacCrimmon e Rayvec (1964) e Swanson e Pazer (1971)³¹ *apud* SCHEXNAYDER; KNUTSON; FENTE; SCHEXNAYDER; KNUTSON), a distribuição usada para modelar a duração de uma atividade deveria: (a) ser contínua durante toda a extensão; (b) ter uma única moda; e (c) estar contida entre dois limites positivos.

A abordagem mais simples para selecionar uma distribuição de probabilidade na ausência de dados é usar uma distribuição Triangular. Nesse caso, um especialista do sistema é questionado para estimar subjetivamente a duração mínima, máxima e mais provável de uma tarefa, denotados respectivamente por a , b e m . Então, uma função densidade triangular é traçada no intervalo $[a, b]$, com pico (ou moda) do triângulo sendo igual a m (LAW; MCCOMAS; VINCENT, 1994).

No entanto, em função da pouca flexibilidade desta distribuição, o emprego da distribuição triangular pode ocasionar muitos erros (LAW; MCCOMAS; VINCENT, 1994). Assim, é recomendado que, para estimar a duração de uma atividade de construção de uma forma eficiente e acurada, deveria ser utilizada uma família de FDP flexível, capaz de alcançar uma ampla variedade de formas (SCHEXNAYDER; KNUTSON; FENTE; SCHEXNAYDER; KNUTSON).

³¹ SWANSON, L. A.; PAZER, H. L. (1971). **Implications of the Underlying Assumptions of PERT**. *Decision Science*, v. 2, 461–480.

Uma alternativa à distribuição Triangular é a distribuição Beta, que satisfaz todas as condições necessárias (SCHEXNAYDER; KNUTSON; FENTE, 2005). A distribuição Beta é uma distribuição extremamente flexível, adequada para a descrição de estimativas subjetivas de tempo de durações de atividades (FENTE; SCHEXNAYDER; KNUTSON, 2000). A distribuição Beta tem várias formas especiais que dependem da escolha de seus parâmetros a e b . Esses parâmetros, que são parâmetros de forma, podem tomar o valor de qualquer número real não-negativo e, dependendo de seus valores, a distribuição gerada terá a forma de uma função unimodal em “U”, “J”, triângulo ou a tradicional forma de sino (SCHEXNAYDER; KNUTSON; FENTE; SCHEXNAYDER; KNUTSON).

As dificuldades de explicitar uma estimativa subjetiva acurada das características estatísticas, tais como moda, média, variância ou um percentil selecionado tem sido tema de estudos em vários campos do conhecimento, como psicologia experimental, engenharia elétrica e matemática (SCHEXNAYDER; KNUTSON; FENTE, 2005).

Peterson e Miller (1964) e Peterson e Beach (1967) indicam que, no caso de estimar a média de uma distribuição assimétrica, há uma tendência de viés na estimativa da média em direção da mediana. Já Apostolakis e Mosleh (1982³² *apud* SCHEXNAYDER; KNUTSON; FENTE; SCHEXNAYDER; KNUTSON), recomendam o uso de percentis para quantificar crenças e evitar a direta indicação de outras medidas como valor médio e o desvio-padrão.

Segundo Apert e Raiffa (1969³³ *apud* SCHEXNAYDER; KNUTSON; FENTE, 2005), estimativas subjetivas para certos percentis de uma população podem ser razoavelmente acuradas, especialmente para os percentis 25%, 50% ou 75% (também conhecidos como quartis inferior, mediano e superior).

Considerando estas dificuldades, pode-se lançar mão de algumas técnicas para o correto estabelecimento dos parâmetros necessários. A seguir, são apresentadas algumas destas técnicas para explicitação de probabilidades subjetivas, com base no trabalho de Spetzler e Von Holstein (1975).

³² APOSTOLAKIS, G.; MOSLEH, A. (1982). **Some properties of distributions useful in the study of rare events**. IEEE Transactions on Reliability, R-31(1), 87–94.

³³ ALPERT, M.; RAIFFA, H. (). **A progress report on the training of probability assessors**. *In*: Judgement Under Uncertainty: Heuristics and Biases. Cambridge: Cambridge University Press, 1969. pp. 294–305.

Segundo Spetzler e Von Holstein (1975), o processo de análise de decisão usualmente envolve três fases: (a) a *fase determinística*, na qual o problema é estruturado através da definição das variáveis relevantes, seus relacionamentos são caracterizados em modelos formais e valores para possíveis resultados são determinados; (b) a *fase probabilística*, na qual a incerteza é explicitamente incorporada na análise através da utilização de distribuições de probabilidades para as variáveis importantes; e (c) a fase informacional, na qual pondera-se a importância de uma informação em função da dificuldade em obtê-la.

Durante a fase probabilística, as distribuições de probabilidade das variáveis importantes são obtidas através da codificação do julgamento de especialistas sobre o problema. Estes julgamentos são processados utilizando os modelos desenvolvidos na fase determinística e são transformados em distribuições de probabilidade que expressam a incerteza sobre o resultado final. O processo de extrair e quantificar julgamentos individuais sobre quantidades incertas é chamado de codificação de probabilidade (SPETZLER; VON HOLSTEIN, 1975).

A interpretação pessoal da probabilidade é um aspecto fundamental da análise de decisão. Uma indicação de probabilidade reflete estado de informação de um indivíduo sobre uma dada quantidade ou evento. Desde que várias pessoas podem ter informações diferentes, duas pessoas podem chegar a diferentes indicações sobre a mesma quantidade incerta (SPETZLER; VON HOLSTEIN, 1975).

O decisor é a pessoa que tem a responsabilidade pela decisão sob consideração. Assim, o processo de análise deve ser baseado nas crenças e preferências do decisor. Este pode designar outra pessoa ou pessoas como seu(s) especialista(s) para codificar a incerteza em um caso particular se ele acredita que o especialista tem uma base de informação mais relevante. O decisor pode então aceitar a informação do especialista com seu *input* ou modificá-lo, incorporando seu próprio julgamento (SPETZLER; VON HOLSTEIN, 1975).

Na tarefa de explicitar probabilidades subjetivas, podem ocorrer discrepâncias conscientes ou subconscientes entre as respostas do especialista e uma representação acurada do seu conhecimento básico, que é chamado de viés. As fontes de viés podem ser motivacionais ou cognitivas. Vieses motivacionais são ajustamentos conscientes ou subconscientes nas respostas do especialista, motivados pela sua percepção do sistema de recompensas, ou seja, ele pode querer influenciar as respostas em seu favor por que acredita que seu desempenho será avaliado pelo resultado (SPETZLER; VON HOLSTEIN, 1975).

Já os vieses cognitivos são também ajustamentos conscientes ou subconscientes nas respostas do especialista que são sistematicamente introduzidas na forma como o sujeito intelectualmente processa suas percepções. Por exemplo, uma resposta pode ser enviesada no sentido da informação mais recente simplesmente por que aquela informação é a mais facilmente lembrada (SPETZLER; VON HOLSTEIN, 1975).

Desta forma, vieses cognitivos dependem dos modos de julgamento do sujeito que, por sua vez, podem ser classificados em cinco modos diferentes (SPETZLER; VON HOLSTEIN, 1975):

- a) *disponibilidade*: refere-se à facilidade com que informações podem ser relembradas ou visualizadas, relacionadas à impressão que deixaram ou à facilidade com que podem ser obtidas;
- b) *ajustamento e ancoragem*: a informação mais atual disponível forma um viés inicial para a formulação de respostas;
- c) *representatividade*: significa que a probabilidade de um evento ou uma amostra é avaliada de acordo com o grau no qual ela é considerada representativa ou similar a algumas das principais características do processo ou população da qual se origina. Nesse caso, os julgamentos de probabilidade são reduzidos a julgamentos de similaridade;
- d) *assunções não declaradas*: tipicamente as respostas do sujeito são condicionadas a várias assunções não declaradas. Assim, a distribuição de probabilidade não reflete sua incerteza total. Uma vez identificadas, estas deveriam ser modeladas e um especialista (se não o próprio sujeito) pode determinar suas probabilidades;
- e) *coerência*: as pessoas algumas vezes determinam a probabilidade de um evento baseadas na facilidade como podem fabricar um cenário plausível que poderia conduzir à ocorrência do evento. Um cenário é considerado improvável se nenhum cenário razoável pode ser encontrado.

Spetzler e Von Holstein (1975) sugerem alguns métodos para codificação de probabilidades subjetivas. Os diferentes métodos de codificação variam se o sujeito irá indicar probabilidades (P), valores (V) ou ambos:

- a) métodos P requerem que o sujeito especifique pontos na escala de probabilidade enquanto os valores permanecem fixos;
- b) métodos V requerem que o sujeito especifique pontos na escala de valor enquanto as probabilidades permanecem fixas;
- c) métodos PV requerem que o sujeito especifique pontos em ambas as escalas conjuntamente; o sujeito essencialmente descreve pontos sobre a distribuição cumulativa.

Qualquer procedimento de codificação consiste em um conjunto de questões que o sujeito responde diretamente, fornecendo números (valores ou probabilidades), ou indiretamente, escolhendo entre alternativas ou apostas³⁴ (SPETZLER; VON HOLSTEIN, 1975).

4.3.2 Tempo de Desenvolvimento do Modelo

Segundo Oloufa, Ikeda e Nguyen (1998), várias razões limitam a efetiva implementação da simulação na gestão da construção. Entre estas, segundo os mesmos autores, está o tempo necessário para o desenvolvimento do modelo de simulação, que figura como uma das principais dificuldades.

Oloufa, Ikeda e Nguyen (1998) explicam que isto acontece por que em outros setores industriais, nos quais as atividades de produção são perenes, o investimento de tempo no desenvolvimento pode ser compensador. Entretanto, este não é o caso da construção civil, uma vez que, devido à natureza temporária dos processos de construção e à presença de incerteza, torna-se necessária a obtenção de respostas rapidamente, reduzindo o tempo disponível para o desenvolvimento do modelo.

Segundo Robinson (2003), os modelos de simulação podem ser empregados de diversas formas nas organizações. Segundo o mesmo autor, há cinco tipos de modelos quanto a sua utilização: *modelos descartáveis, de uso contínuo, de uso regular, modelos genéricos e*

³⁴ Maiores detalhes sobre métodos de codificação indiretos podem ser encontrados em Spetzler e Von Holstein (1975).

modelos reutilizáveis. Enquanto os três primeiros tipos relacionam-se à frequência com a qual um modelo é usado, os dois últimos ao número de situações-problema que podem ser tratados por um modelo (ROBINSON, 2003).

Uma forma de reduzir o tempo de desenvolvimento dos modelos de simulação pode ser conseguida através do emprego de modelos genéricos e reutilizáveis (MACKULAK; LAWRENCE; COLVIN, 1998; OLOUFA; IKEDA; NGUYEN, 1998; BROWN; POWERS, 2000; ALEXOPOULOS *et al.*, 2001; NASEREDDIN; MULLENS; COPE, 2007).

Segundo Robinson (2003), um modelo genérico é aquele construído para um contexto particular que pode ser utilizado em várias organizações. Estes modelos são geralmente muito focados, abordando somente alguns aspectos específicos do problema sob estudo (ROBINSON, 2003).

Desta forma, conforme afirma Robinson (2003), os modelos genéricos são um caso especial de modelos/componentes reutilizáveis, uma vez que um modelo reutilizável implica a utilização de um modelo completo em um outro contexto ou para um outro propósito diferente daquele originalmente proposto. Já o conceito de componentes reutilizáveis envolve o emprego de uma parte do modelo em um novo modelo de simulação em contexto distinto ou para outro propósito (ROBINSON, 2003).

A reutilização de modelos é especialmente útil quando se modelam sistemas de um mesmo domínio ou setor, já que, conforme Mukkamala, Smith e Valenzuela (2003), nestes casos o processo de modelagem caracteriza-se pela repetitividade e os modelos passam a ser similares em vários aspectos, apresentando somente pequenas diferenças. Assim, o esforço de modelagem pode ser reduzido através do desenvolvimento de módulos ou modelos-padrão que condensem a lógica específica daquele domínio e a maioria dos detalhes de modelagem (MUKKAMALA; SMITH; VALENZUELA, 2003).

Assim como em outros setores, de acordo com Shi e AbouRizk (1998), na construção civil a reutilização de modelos, realizada através da formação de uma biblioteca de modelos-padrão de simulação de processos amplamente utilizados, também tem sido empregada como uma forma de reduzir o tempo de desenvolvimento dos modelos. Neste sentido, alguns estudos têm sido desenvolvidos com base nestes conceitos.

Oloufa, Ikeda e Nguyen (1998) desenvolveram uma biblioteca de recursos de produção pré-programados com vistas à redução do tempo de elaboração do modelo de simulação de empreendimentos da construção. Para modelar o empreendimento, o usuário deveria simplesmente selecionar os recursos necessários e especificar a lógica do empreendimento criando suas ligações (OLOUFA; IKEDA; NGUYEN, 1998).

Já Nasereddin, Mullens e Cope (2007) propuseram um modelo de simulação reutilizável, como forma de reduzir o tempo de desenvolvimento de modelos de uma fábrica de habitações modulares. No estudo, esses autores empregaram um modelo genérico de simulação, configurável a cada situação específica, através do uso de planilhas eletrônicas para inserção dos dados e macros para geração dos relatórios. Neste estudo o objeto de estudo foram todos os processos que compunham o sistema de produção da fábrica, ao contrário do anterior que modelou somente processos individualmente.

Ambos os estudos concluíram que o uso desta abordagem permitiu a redução no tempo de desenvolvimento e o aumento na qualidade do modelo, já que este fora previamente testado, permitindo que processos ou sistemas de produção novos fossem modelados mais rapidamente e um número maior de alternativas de projeto fosse avaliado.

Tendo em vista que a reutilização de modelos é um assunto de interesse desta pesquisa, em função de seus benefícios potenciais no processo de desenvolvimento dos modelos de simulação na construção, no que diz respeito ao tempo de desenvolvimento e à flexibilidade, esse tema será discutido em maiores detalhes na secção seguinte.

4.3.2.1 Reutilização de Modelos de Simulação

Segundo Robinson *et al.* (2004), o termo “reutilização de modelos de simulação” pode significar desde a reutilização de pequenas porções do código de simulação, através da reutilização de componentes, até a reutilização de modelos completos. Em um nível mais abstrato, o projeto de componentes, projeto do modelo ou o conhecimento advindo da modelagem são os principais candidatos à reutilização (ROBINSON *et al.*, 2004).

Embora muita atenção seja dada à reutilização do código-fonte do modelo, a reutilização pode ser aplicada a todos os estágios de desenvolvimento do modelo (ROBINSON *et al.*, 2004). Neste sentido, segundo Paul e Taylor (2002) e Robinson *et al.* (2004), há várias formas de reutilizar modelos de simulação:

- a) *reutilização de componentes básicos de modelagem*;
- b) *reutilização de modelos de subsistemas*: o modelador tem vários modelos “genéricos” de partes do sistema de produção que foram previamente desenvolvidos e que podem ser adaptados e utilizados em um novo modelo que represente o sistema;
- c) *reutilização de um modelo similar*: o modelador desenvolveu previamente um modelo que tem características similares ao sistema de produção sob investigação, o qual é apropriadamente adaptado.

Pidd (2002) também aborda diferentes formas de reutilização que são representadas em um espectro em função da frequência e da complexidade desta tarefa (figura 13).

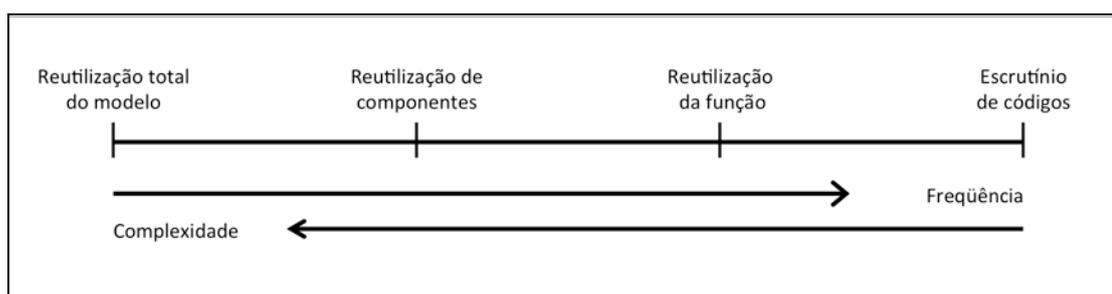


Figura 13: espectro de reutilização de modelos (baseado em: PIDD, 2002)

De acordo com Pidd (2002), o espectro apresenta quatro posições em uma escala linear com duas setas horizontais diferentes. A primeira, indicando a *freqüência*, mostra que a reutilização é muito mais freqüente na extremidade direita do espectro, no escrutínio de códigos, na busca de linhas de programação que podem ser reaproveitadas. A segunda seta, indicando a *complexidade*, aumenta no sentido inverso, apontando para a dificuldade na reutilização de modelos de simulação inteiros (PIDD, 2002).

Segundo Robinson (2003), um problema relevante com o desenvolvimento de modelos genéricos é que estes devem ser adequados para representar um sistema em muitas organizações diferentes, sendo necessário que o seja validado a cada vez que é implementado em uma nova organização. Ainda segundo Robinson (2003), outro problema é que os modelos genéricos podem ser empregados em situações para as quais não foram desenhados.

Segundo Pidd (2004), não importando a abordagem de reutilização selecionada, ou o tamanho dos artefatos de informação com que se está lidando, é vital utilizar uma estratégia de reutilização na construção de modelos. Nesse sentido, Pidd (2004) sugere que uma estratégia de reutilização deve incluir fatores para suportar os seguintes aspectos técnicos:

- a) *abstração*: a habilidade de fornecer descrições sucintas e de alto nível de artefatos reusáveis é essencial para auxiliar os desenvolvedores no entendimento do seu propósito, natureza e comportamento;
- b) *seleção*: para auxiliar o desenvolvedor na reutilização, mecanismos que permitam a localização, comparação e seleção de artefatos são também importantes;
- c) *especialização*: qualquer técnica que mantenha coleções de artefatos abstratos reutilizáveis requer características para suportar a especialização daqueles artefatos em entidades concretas e utilizáveis;
- d) *integração*: uma estrutura de integração é necessária para fornecer um mecanismo para a combinação e comunicação entre artefatos reutilizáveis.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse capítulo a utilização da simulação como uma ferramenta de apoio à decisão na construção civil foi apresentada através de um histórico dos programas de simulação desenvolvidos para o setor, bem como dos diversos estudos realizados e publicados nos últimos dez anos. Percebe-se uma tendência de redução da necessidade de conhecimentos profundos em programação e do aumento do emprego de técnicas de modelagem interativa visual. Ainda, foram discutidas duas técnicas de interesse deste trabalho, de explicitação de probabilidades subjetivas, como forma de modelar a variabilidade (traduzida na forma de uma função distribuição de probabilidade), a partir de do julgamento de especialistas do sistema sob estudo. Após a estratégia de reutilização de modelos genéricos foi caracterizada como uma forma de reduzir o tempo de desenvolvimento do modelo de simulação. O próximo capítulo procura detalhar o método de pesquisa utilizado para a consecução dos objetivos deste trabalho, a partir do referencial teórico aqui apresentado.

5 MÉTODO DE PESQUISA

5.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta uma descrição do método de pesquisa utilizado para a realização desse trabalho. O capítulo começa com a descrição da escolha da estratégia de pesquisa utilizada no seu desenvolvimento. Posteriormente são apresentados o delineamento do processo de pesquisa e a descrição das etapas e dos métodos e técnicas utilizados na coleta de dados.

5.2 ESTRATÉGIA DE PESQUISA

Em seu cerne, este trabalho trata de propor uma forma de projetar sistemas de produção de empreendimentos da construção civil, lidando, conforme Vaishnavi e Kuechler Jr. (2008), com a criação de algo novo, que não existe na natureza. Esta característica é o que diferencia, segundo Simon (1996), a ciência natural da “ciência do artificial” (conhecida como *design science*³⁵).

De acordo com Simon (1996), a ciência natural consiste de um corpo de conhecimento sobre alguma classe de objetos ou fenômenos na natureza ou sociedade que descreve e explica como elas se comportam e interagem entre si. Já a *design science* é constituída por um corpo de conhecimento sobre objetos e fenômenos artificiais desenhados para atender certos objetivos desejados (SIMON, 1996). Aaltonen, Rinne e Tuikkala (2007) corroboram esta idéia afirmando que a *design science* busca criar coisas (artefatos) que servem a propósitos humanos, enquanto a ciência natural tenta entender a realidade observável.

³⁵ Não há na literatura uma tradução para a língua portuguesa amplamente utilizada para a expressão “*design science*”. Desta forma, optou-se por utilizá-la na sua forma original.

Van Aken (2004) distingue três categorias de disciplinas científicas com base nos paradigmas utilizados: (a) as ciências formais, tais como filosofia e matemática; (b) as ciências explicativas, como as ciências naturais e a maior parte das ciências sociais; e (c) as *design sciences*, tais como engenharias, ciências médicas e a psicoterapia moderna. A *design science* tem suas raízes na obra de Herbert Alexander Simon “*The Sciences of the Artificial*”, publicada originalmente em 1969 (relançado posteriormente em 1996). Entretanto, apenas mais recentemente (há trabalhos datados da década de 90, como o de Nunamaker, Chen e Purdin³⁶ (1991)), esta tem sido discutida mais profundamente no meio acadêmico, em especial no campo das ciências da informação

Para Baskerville, Pries-Heje e Venable (2009), a *design science* pode ser considerada mais como um paradigma do que propriamente um tipo de método de pesquisa. Segundo Iivari e Venable (2009), sob o paradigma da *design science* diferentes métodos de pesquisa podem ser utilizados.

Segundo Van Aken (2004) as *design sciences* estão focadas no desenvolvimento de conhecimento para projetar e elaborar de artefatos, isto é, resolver “problemas de construção³⁷”, ou na melhoria do desempenho de entidades existentes, ou seja, solucionar “problemas de melhoria”. Desta forma, o objetivo real da pesquisa nessas ciências é desenvolver conhecimento confiável e válido para ser utilizado no projeto de soluções para problemas.

Ainda de acordo com Van Aken (2004), cada vez que um profissional tenta solucionar um problema único e específico para um cliente ou em conjunto com este, este o faz utilizando o ciclo de solução de problema que consiste na definição do problema, no planejamento da intervenção (diagnóstico, projeto de soluções alternativas e seleção), aplicação da intervenção e avaliação.

Pela sua consonância com a *design science*, optou-se pela pesquisa construtiva (*constructive research*) como a estratégia de pesquisa utilizada nesta tese. A pesquisa construtiva é, segundo Kasanen, Lukka e Siitonen (1993), Lukka (2003) e Viskari (2006), um procedimento de pesquisa para produzir “construções inovadoras”, com o intuito de resolver problemas reais

³⁶ NUNAMAKER, J.F.; CHEN, M.; PURDIN, T.D.M. System development in information systems research. **Journal of Management Information Systems**. n.7. v.3. 1990-1991, pp. 99-106.

³⁷ Problemas de construção nesse contexto refere-se ao estudo do processo de desenvolvimento de novos artefatos (ou construções). Assim, não deve-se confundir com problemas da construção civil, em particular.

e contribuir para a teoria na disciplina na qual ela é aplicada. Segundo Lukka (2003), estas “construções” são representadas por todos os artefatos humanos – modelos, diagramas, planos, organogramas, produtos comerciais e projetos de sistemas de informação. Assim, a principal característica da pesquisa construtiva é que as construções são inventadas e desenvolvidas, nunca descobertas.

As principais características da pesquisa construtiva são (KASANEN; LUKKA; SIITONEN, 1993; LUKKA, 2003): (a) o foco em problemas do mundo real relevantes para que sejam resolvidos na prática; (b) a produção de uma construção inovadora buscando resolver o problema inicial; (c) uma tentativa de implementação a construção desenvolvida, testando sua aplicabilidade prática; (d) o envolvimento e a cooperação entre o pesquisador e os demais participantes, na forma de uma equipe, que propicie um aprendizado baseado na experimentação; (e) uma ligação explícita a um conhecimento teórico prévio; e (f) a reflexão acerca das evidências empíricas com base na teoria.

A figura 14, abaixo, ilustra os elementos-chave da abordagem de pesquisa construtiva, de acordo com Kasanen, Lukka e Siitonen (1993):

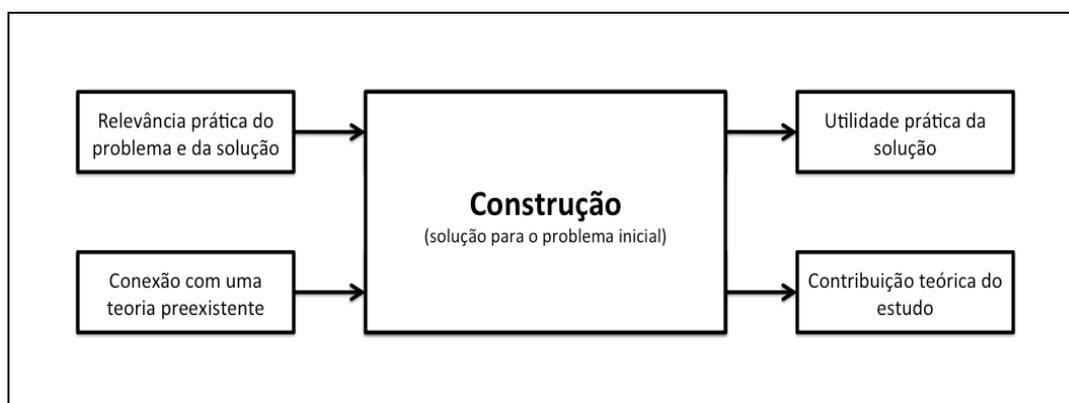


Figura 14: elementos centrais da abordagem de pesquisa construtiva (baseado em KASANEN; LUKKA; SIITONEN, 1993)

Segundo Lukka (2003), a intervenção explícita do pesquisador é uma característica da pesquisa construtiva, sendo que a construção desenvolvida e implementada deve ser considerada como um instrumento de teste e uma tentativa para ilustrar, testar ou refinar uma teoria existente ou desenvolver uma nova teoria (LUKKA, 2003). Assim, o processo de condução de uma pesquisa construtiva pode ser caracterizado pelas seguintes etapas

metodológicas (KASANEN; LUKKA; SIITONEN, 1993; LUKKA, 2000 *apud* LUKKA, 2003):

- a) encontrar um problema com relevância prática que também tenha potencial para contribuição teórica;
- b) examinar o potencial para cooperação para pesquisa de longo prazo com a organização-alvo;
- c) obter um profundo entendimento teórico e prático da área ou tópico de pesquisa;
- d) propor uma idéia inovadora e desenvolver uma construção para a solução do problema que tenha potencial para uma contribuição teórica;
- e) implementar a solução e testar como seu funcionamento;
- f) examinar o escopo de aplicação da solução;
- g) identificar e analisar a contribuição teórica.

Com relação à última etapa, ainda segundo Lukka (2003), há dois tipos principais de contribuições teóricas potenciais: (a) a própria construção desenvolvida, com base na sua utilidade para a organização-alvo, representando uma contribuição ao conjunto do conhecimento até então existente; e (b) a aplicação e desenvolvimento do conhecimento teórico existente durante a realização do estudo, através da compreensão holística das relações entre conceitos.

Com relação ao sucesso de um estudo, uma característica da pesquisa construtiva é que não apenas os casos de sucesso de implementação podem ser considerados teoricamente relevantes. Segundo Lukka (2003) e Jakkula, Lyly-Yrjänäinen e Suomala (2006), embora o resultado ideal da pesquisa construtiva seja a resolução de um problema do mundo real através de uma nova construção implementada, os projetos que, por uma ou outra razão, falham sob o ponto de vista prático podem ainda ter relevância teórica importante do ponto de vista acadêmico.

Para Keating (1995), as principais alternativas que relacionam qualquer estudo com uma teoria são: (a) o desenvolvimento de uma nova teoria; (b) o refinamento de uma teoria

existente, quer seja pela sua ilustração ou seu teste; e (c) a refutação de uma teoria existente. No caso do desenvolvimento de novas teorias, problemas práticos podem emergir em áreas nas quais não há pesquisa acadêmica anterior ou as condições encontradas sugerem um falha das teorias existentes em explicar o fenômeno sob estudo (KEATING, 1995).

Lukka (2003) afirma que o refinamento de uma teoria é, normalmente, o resultado teórico mais esperado de um projeto de pesquisa construtiva. Nesses casos, a obtenção de conclusões teóricas de interesse não depende do fato de que a nova construção cumpre ou não seus objetivos propostos (LUKKA, 2003).

Conforme Lukka (2003), na ilustração de uma teoria o estudo construtivo não traz nenhuma novidade particular a teoria relevante já existente, a não ser a nova construção proposta. Entretanto, ainda segundo aquele autor, nesses casos a pesquisa construtiva pode ser uma forma interessante de aplicação nova da teoria já existente, baseada em algumas relações entre meios e fins já conhecidas, podendo corroborá-las ou ilustrar que tipo de conseqüências práticas elas podem ter.

O teste de teorias é uma alternativa para estabelecer a relação com a teoria do estudo que tem sido negligenciada por muito tempo (LUKKA, 2003). Já um estudo que busca a refutação de uma teoria é desenhado para tentar desconfirmar teorias bem especificadas trazendo evidências negativas ou oferecendo o contraponto de interpretações de estudos de caso prévios (LUKKA, 2003).

Uma importante discussão acerca da pesquisa construtiva são suas diferenças de uma consultoria. De acordo com Kasanen, Lukka e Siitonen (1993), a consultoria não pressupõe o uso de métodos científicos, ou seja, o uso de métodos científicos não é uma condição inevitável para o sucesso de um trabalho de consultoria e seus resultados estão sujeitos a direitos de propriedade comercial.

Westbrook (1995) aponta cinco diferenças básicas entre a consultoria e a pesquisa intervencionista: (a) a meta dos consultores não é desenvolver uma nova teoria, mas reportar uma aplicação; (b) consultores somente reportam sucessos, enquanto os caminhos e obstáculos são raramente explorados, enquanto pesquisadores também descrevem e analisam projetos que falharam a fim de aprender com eles; (c) consultores raramente descrevem suficientemente o contexto para permitir ao leitor avaliar o potencial para generalização e fazer comparações com outras situações reportadas; (d) tanto o consultor como a organização

dividem uma única meta comum, a conclusão de uma análise ou implementação de uma mudança, enquanto para o pesquisador esta é apenas uma parte de um objetivo primário maior – descobrir novo conhecimento; e (f) pesquisadores podem não ser remunerados pelo seu trabalho.

Desta forma, optou-se pela pesquisa construtiva como a estratégia de pesquisa deste trabalho pelos seguintes motivos: (a) a elaboração do PSP lida com a construção de um plano que tem como objetivo contribuir para a gestão do empreendimento, ou seja, seu foco incide sobre um problema real e de relevância prática para a empresa sendo estudada; (b) seu desenvolvimento baseia-se em um modelo para elaboração do PSP proposto previamente e que carece de refinamento quanto à sua adequação em contextos diferentes daquele que o originou, bem como quanto ao emprego de novas ferramentas – como no caso a simulação – para o seu desenvolvimento; (c) por definição o processo de elaboração do PSP envolve estreita cooperação entre pesquisador e demais participantes, que assumem a forma de uma equipe, na qual o aprendizado se dá com base na proposição e experimentação de soluções para os problemas encontrados.

5.3 DELINEAMENTO DA PESQUISA

A pesquisa foi dividida em quatro fases, conforme apresentado na figura 15, a seguir: (a) revisão bibliográfica, desenvolvida ao longo de todo o trabalho; (b) fase exploratória; (c) fase de desenvolvimento; e (d) fase de análise e reflexão. Estas as fases guardam relação com as etapas da pesquisa construtiva sugeridas por Kasanen, Lukka e Siitonen (1993) e Lukka (2000 *apud* LUKKA, 2003).

A primeira fase da pesquisa envolveu uma revisão bibliográfica inicial e também a busca de um problema real junto à indústria, a primeira fase da pesquisa construtiva – encontrar um problema com relevância prática – corresponde às sugestões de pesquisa apontadas nas pesquisas anteriormente realizadas, servindo de base para a definição do problema de pesquisa desta tese.

Já a segunda fase – obter um entendimento profundo sobre o tópico – também foi contemplada pela pesquisa bibliográfica em conjunção com a fase exploratória do trabalho, na qual foi realizada a seleção do *software* de simulação, o treinamento na sua utilização, além

da realização de um estudo exploratório. Este estudo foi desenvolvido tendo como principal objetivo familiarizar o pesquisador ao uso do *software* para o desenvolvimento de um modelo de simulação no contexto de um empreendimento da construção civil, bem como a compreensão de possíveis limitações e abstrações necessárias no processo de modelagem.

Ao longo do desenvolvimento desta pesquisa, houve um amadurecimento natural das suas questões e objetivos. Inicialmente o trabalho tinha como foco principal investigar a utilização da simulação como uma ferramenta de apoio à tomada de decisão na elaboração do PSP em dois tipos de empreendimentos: empreendimentos repetitivos, com baixo grau de complexidade e empreendimentos complexos, caracterizados pelo elevado grau de incerteza e interdependência dos processos e pelos curtos prazos de execução. Foi realizado um segundo estudo exploratório em um empreendimento com características complexas. Os resultados obtidos nesse estudo contribuíram para o redirecionamento da pesquisa, uma vez que, em face do pequeno tempo disponível para o desenvolvimento do modelo e da natureza única do empreendimento, havia a necessidade de um grande esforço para o seu desenvolvimento sem uma perspectiva concreta de sua utilização durante a etapa do PSP. Desta forma, optou-se pela supressão dos estudos relativos aos empreendimentos complexos. Assim, empreendimentos repetitivos passaram a ser o único foco dos estudos desenvolvidos.

Quatro estudos de caso foram desenvolvidos, correspondendo às fases 3 e 4 da pesquisa construtiva – desenvolver uma construção para resolver o problema e implementar e testar a solução, respectivamente. Os estudos de caso 01 e 02 foram desenvolvidos em empreendimentos da empresa X (X1 e X2), enquanto os estudos 03 e 04 foram desenvolvidos em empreendimentos da empresa Y (Y1 e Y2).

A opção pela realização dos quatro estudos de caso que compuseram este trabalho ocorreu em função de dois fatores principais. Primeiro, a acessibilidade às duas empresas, a partir de uma parceria existente entre estas e o NORIE/UFRGS. Segundo, pelas diferenças entre estas empresas, no que diz respeito ao porte e estrutura organizacional (conforme caracterizado a seguir, a empresa X tratava-se de um empresa de pequeno porte, enquanto a empresa Y tratava-se de uma empresa de grande porte com uma estrutura organizacional departamentalizada), bem como entre os empreendimentos estudados. Assim, em função desses fatores, os estudos ficaram condicionados à disponibilidade dos empreendimentos no decorrer da fase de desenvolvimento, condicionando-os às características específicas dos

empreendimentos (tipologia, momento de início e prazo de execução, entre outras), o que não estava sob controle do pesquisador.

Ainda durante o desenvolvimento do estudo de caso 01, percebeu-se a necessidade de ampliar o escopo de investigação do trabalho. Ao invés de focar a análise na utilização da simulação como uma ferramenta do PSP, decidiu-se por uma análise mais ampla do processo de elaboração do PSP, a partir da utilização da simulação como ferramenta de apoio neste processo. Desta feita, as questões e objetivos da pesquisa sofreram nova adequação passando a contemplar este novo escopo.

No estudo de caso 01 foi desenvolvido o Projeto do Sistema de Produção do empreendimento X1. Neste estudo, avaliou-se a utilização da simulação como ferramenta do PSP, a partir do emprego de uma estratégia de modelagem visando a reutilização do modelo em futuros empreendimentos da empresa. O estudo de caso 02 deu continuidade ao estudo 01. Com base no PSP elaborado para o empreendimento X1, buscou-se refinar o processo de elaboração do PSP com o apoio da simulação, buscando reutilizar o modelo de simulação anteriormente construído. Foi avaliada a redução no tempo de desenvolvimento do modelo no processo, seus principais benefícios e dificuldades.

O estudo de caso 03 foi desenvolvido no empreendimento Y1. O estudo foi conduzido em paralelo ao estudo de caso 01, embora com seu início defasado em torno de 6 meses daquele. O objetivo do estudo de caso 03 foi também a avaliação do processo de elaboração do PSP e do emprego da simulação, buscando identificar as principais dificuldades da sua utilização, principalmente relacionadas ao nível de consolidação do PSP como uma prática gerencial da empresa. Embora não tenha havido a possibilidade de avaliar a estratégia de reutilização dos modelos de simulação, tanto nesse estudo como no estudo de caso 04, um módulo genérico proposto no estudo de caso 1 foi utilizado no intuito de reduzir o tempo de desenvolvimento do modelo. Já o estudo de caso 04, desenvolvido no empreendimento Y2, teve como objetivo avaliar a evolução do processo de elaboração do PSP na empresa, bem como do uso da simulação.

A quinta fase da pesquisa construtiva – examinar o escopo de aplicabilidade da solução – equivaleu às análises realizadas ao final de cada estudo e à análise cruzada dos estudos. Por fim, a sexta fase – identificar e analisar a contribuição teórica – diz respeito à reflexão e discussão dos resultados alcançados neste trabalho.

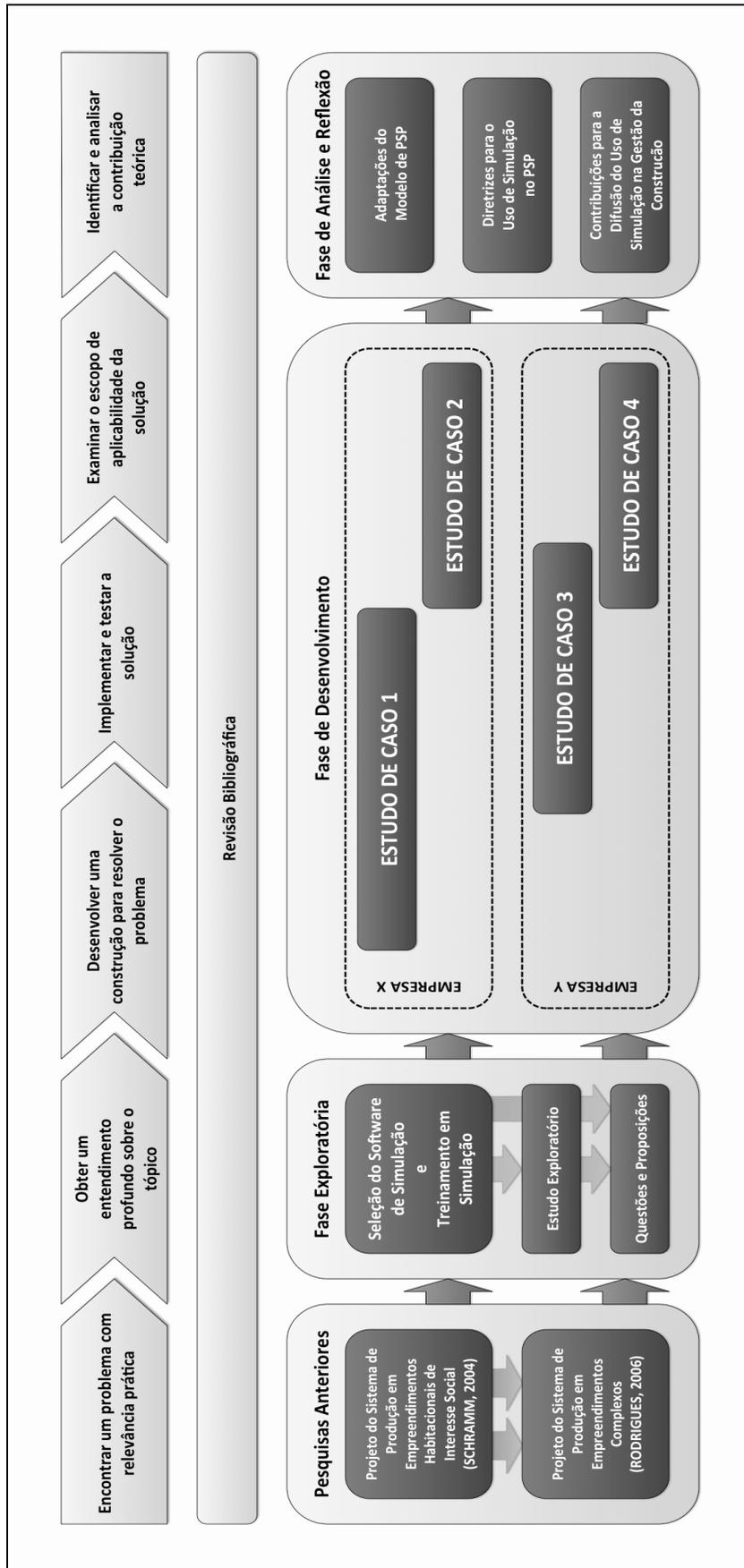


Figura 15: delineamento da pesquisa

5.4 FASE EXPLORATÓRIA

A fase exploratória foi dividida em três subfases: (a) a seleção do *software* de simulação a ser utilizado; (b) o treinamento do pesquisador em simulação; e (c) o desenvolvimento de estudos exploratórios.

5.4.1 Seleção do *Software* de Simulação

A seleção do *software* de simulação foi realizada entre outubro de 2005 e perdurou até o mês de maio de 2006, quando a aquisição do referido *software* foi efetivada. O processo de seleção seguiu as etapas propostas por Law e Haider (1989) e Hlupic, Irani e Paul (1999): (a) necessidade de adquirir um *software* de simulação, com base nos propósitos da simulação, restrições para aquisição (financeiras e organizacionais), principais tipos de problemas que serão abordados; (b) pesquisa de *softwares* disponíveis; (c) avaliação dos *softwares*; (d) seleção do *software*; (e) negociação do contrato; e (f) aquisição do *software*.

Quatro *softwares* foram avaliados no processo de escolha: STROBOSCOPE (MARTINEZ, 1996) ProModel (ProModel Corporation), Arena (Rockwell Automation Inc.) e Extend (Imagine That Inc.). O STROBOSCOPE foi avaliado em função de seu uso por vários pesquisadores da área de gestão da produção na construção civil. Já os demais *softwares* foram avaliados em função de sua larga utilização por pesquisadores em diversos setores industriais, principalmente com base na consulta a artigos publicados na *Winter Simulation Conference*.

A fim de proceder a escolha do *software* foram utilizados os critérios facilidade de uso, adequação ao contexto da pesquisa, qualidade dos recursos de animação; capacidades estatísticas e custo de aquisição. Estes critérios basearam-se nos critérios originalmente propostos por Law e Haider (1989) e Davis e Williams (1994), que apontam uma série de características desejáveis dos *softwares* de simulação utilizados na análise de sistemas de produção.

Desta forma, com relação ao critério facilidade de uso, tanto o Arena como o Extend foram considerados mais amigáveis do que o Promodel e o STROBOSCOPE. Por modelarem um sistema de produção através de um fluxograma, o processo de modelagem é de mais fácil aprendizagem do que o processo de modelagem do Promodel, que utiliza uma técnica de modelagem baseada na representação dos processos diretamente e unicamente através de seu

layout, com a definição de seus postos de trabalho, caminhos, recursos e entidades. Já o Stroboscope, embora possuindo uma interface gráfica através de um *add-on* do MS-Visio (EZStrobe), exige que o usuário domine uma linguagem de simulação.

Com relação ao critério adequação ao contexto, também tanto o Arena quanto o Extend foram considerados mais adequados, por representarem um sistema de produção através de um fluxograma e permitir que todo o sistema ou parte dele possa ser animado com base no seu *layout*. Nesse caso, a representação de um sistema de produção é mais adequada se um fluxograma for utilizado, enquanto a representação de processos ou operações específicas pode, em alguns casos, tomar partido da modelagem de seu *layout*.

No critério qualidade dos recursos de animação, tanto o STROBOSCOPE quanto o Extend apresentam a limitação de necessitar um outro *software* para gerar as animações. Assim, as mudanças de estado na simulação são primeiramente salvas em um arquivo e utilizadas para gerar gráficos após a simulação ter acabado, utilizando o pós-processador Proof Animation (Wolverine Software Corporation). Esta limitação foi considerada importante, fazendo com que tanto o STROBOSCOPE quanto o Extend fossem descartados do processo de seleção.

Todos os *softwares* analisados possuíam as características desejáveis quanto ao critério capacidades estatísticas. O custo de aquisição do *software*, por sua vez, representava uma restrição importante, visto que havia uma limitação dos recursos destinados à aquisição do pacote de simulação, limitado aos recursos concedidos pelo órgão de fomento para o projeto de pesquisa³⁸. Desta forma, foram feitos contatos com os desenvolvedores dos *softwares* Arena e ProModel que indicaram seus representantes no Brasil para o processo de cotação. Já o STROBOSCOPE poderia ser utilizado de forma gratuita, uma vez que seu uso seria acadêmico.

A partir da análise das propostas de aquisição dos *softwares* e de negociações na busca de adequação do custo de aquisição aos recursos financeiros disponíveis, somente a proposta de compra do Arena foi considerada exequível. A figura 16, a seguir, resume as ponderações realizadas com relação a cada um dos *softwares* analisados frente aos critérios considerados.

³⁸ A aquisição do *software*, bem como do *hardware* necessários ao desenvolvimento da pesquisa foram financiados pela FAPERGS, através edital PROADE3.

Critério	Software			
	Stroboscope	ProModel®	Arena®	Extend®
Facilidade de uso	↓	←	↑	↑
Adequação ao contexto	←	↓	↑	↑
Qualidade dos recursos de animação	←	↑	↑	←
Capacidades estatísticas	↑	↑	↑	↑
Custo de aquisição	↑	↓	↑	–
Seleção final	×	×	✓	×

Figura 16: avaliação dos *softwares* pré-selecionados vs critérios de seleção

Assim, com base na ponderação dos critérios acima expostos, optou-se pela utilização do *software* Arena para o desenvolvimento dos estudos desta pesquisa. O Arena é um pacote de simulação de propósito geral comercializados pela Rockwell Automation Inc., que utiliza construtos de modelagem, chamados módulos, agrupados em uma série de *templates*, tais como Processo Básico, Processo Avançado e Transferência Avançada. O *template* “Processo Básico” contém os módulos que são utilizados na maioria dos modelos. O painel “Processo Avançado” contém os módulos que são utilizados para desenvolver funções lógicas muito específicas, tais como escolher uma fila quando várias estão disponíveis ou coordenar o avanço de múltiplas entidades em diferentes áreas de um sistema. Já o painel “Transferência Avançada” contém os módulos que são utilizados para descrever a transferência de entidades de uma parte do sistema para outra (LAW; KELTON, 2000; KELTON; SADOWSKI; STURROCK, 2004). A figura 17 mostra os principais módulos do painel “Processo Básico” e suas principais funções no processo de modelagem.

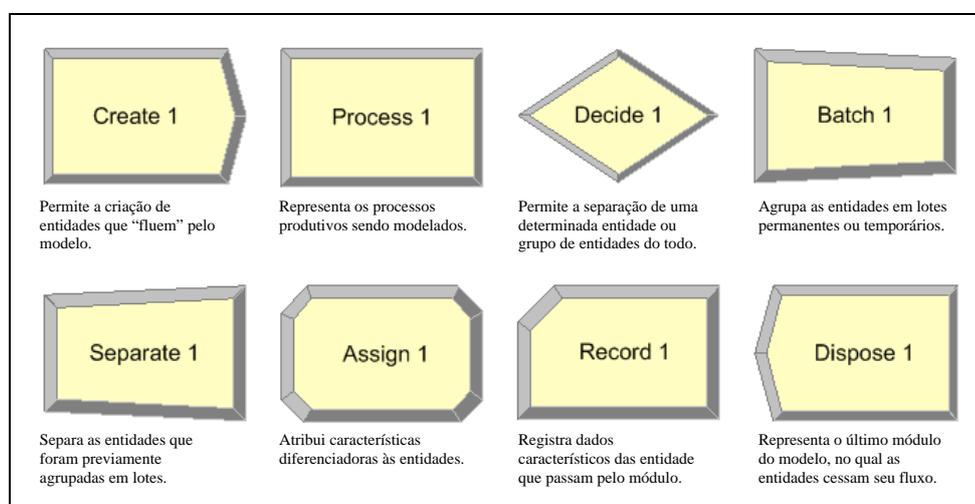


Figura 17: módulos do painel “processos básicos” do Arena

Um modelo é construído através de um processo de “arrastar e soltar” módulos na janela do modelo, conectando-as para indicar o fluxo de entidades através do sistema simulado. Então, os módulos são detalhados utilizando caixas de diálogo ou planilhas incorporadas no *software*. Um modelo pode ter um número ilimitado de níveis hierárquicos. O Arena possibilita uma animação bidimensional e também permite apresentar gráficos dinâmicos (KELTON; SADOWSKI; STURROCK, 2004).

É possível ler e escrever dados em arquivos de outros aplicativos, tais como MS-Excel, criando interfaces de ingresso de dados mais amigáveis, por exemplo. Para tanto, o Arena utiliza o *Microsoft Visual Basic for Applications* (VBA), o que permite também uma interface com o MS-Visio, possibilitando a construção de modelos básicos nesse aplicativo (LAW; KELTON, 2000, KELTON; SADOWSKI; STURROCK, 2004). Na versão profissional, utilizada neste trabalho, é possível criar módulos customizados e guardá-los em um novo *template* (LAW; KELTON, 2000, KELTON; SADOWSKI; STURROCK, 2004).

5.4.2 Treinamento do Pesquisador

Paralelamente à seleção do *software*, este pesquisador tomou parte em uma série de atividades no sentido de aprofundamento no tema simulação e treinamento na sua utilização. Este treinamento ocorreu em três etapas. A primeira consistiu da realização das disciplinas acerca de simulação, bem como da revisão bibliográfica a respeito do tema. A segunda etapa, a partir da aquisição do *software* do Arena, ocorreu com a leitura dos manuais do referido *software* e da familiarização com o mesmo, através do seu uso prático em modelos de teste.

Já a terceira etapa ocorreu como uma atividade inserida no Projeto GEHISTEC, na qual este pesquisador teve a oportunidade de realizar uma missão de estudos junto ao *Centro de Excelencia en Gestión de Producción – GEPUC, da Pontificia Universidade Católica de Chile*³⁹.

Com base nas discussões realizadas nessa missão, algumas considerações úteis para a elaboração das questões e proposições do estudo puderam ser feitas, especialmente com base na experiência na condução de estudos de simulação pelo referido grupo de pesquisa. Entre

³⁹ Este centro tem como objetivos o desenvolvimento e a difusão de conhecimentos sobre gestão e tecnologias de produção em áreas chaves da economia do país, entre elas a construção civil. Com este propósito, o GEPUC vem realizando atividades de pesquisa, educação e aprendizagem em colaboração com mais empresas e organizações associadas ao centro. Atualmente, o GEPUC conta com a participação de 7 pesquisadores, 3 profissionais e mais 15 estudantes de graduação e pós-graduação.

estas considerações diziam respeito a utilização de mecanismos que facilitassem a visualização do processo de simulação e seus resultados, como forma de tornar seu emprego “mais próximo” do usuário leigo, beneficiando o processo de tomada de decisão. Outro aspecto importante dizia respeito grande tempo necessário para o desenvolvimento do modelo frente ao pouco tempo disponível para a utilização do modelo na tomada de decisão. Nesse sentido, o grupo vinha pesquisando o grupo a utilização da simulação através de uma plataforma *web*, na qual, a partir da construção de modelos gerais de alguns setores industriais e de problemas específicos, dados poderiam ser ingressados pelas empresas e em um pequeno prazo os resultados da simulação estariam disponíveis.

5.4.3 Estudo Exploratório 1

5.4.3.1 Descrição da Empresa W

A Empresa W é uma empresa construtora de médio porte⁴⁰ que atua na região metropolitana de Porto Alegre, atuando a mais de 30 anos no mercado imobiliário, especificamente no nicho de mercado de edificações residenciais de médio e alto padrão. A empresa possui cerca de 300 funcionários diretos e 350 funcionários indiretos em seus canteiros de obras, sendo dividida em quatro departamentos: administrativo, financeiro, comercial e técnico.

A empresa vem aplicando conceitos e práticas relacionadas à Produção Enxuta e ao Sistema Toyota de Produção, como, por exemplo, a utilização de ferramentas do sistema *Just in Time* em seus procedimentos operacionais, possuindo sistema da qualidade certificado pela ISO 9001:2000, assim como pelo Sistema de Qualificação de Empresas, Serviços e Obras (SIQ), do PBQP-H, no nível A.

Uma característica importante dos empreendimentos da empresa é que aqueles do mesmo nicho de mercado são concebidos tendo como base algumas diretrizes fixas de projeto e quanto aos materiais e técnicas construtivas utilizados, que vem sendo aprimoradas à medida que novos empreendimentos vão sendo executados. Assim, o que diferencia um empreendimento de outro são alguns aspectos formais, acabamentos e a flexibilidade da distribuição interna das unidades habitacionais, obtida através da utilização de paredes de

⁴⁰ Segundo a classificação do Serviço Brasileiro de Apoio a Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE) é considerada microempresa aquela empresa que possui entre 01 e 19 funcionários. Já a empresa que possui entre 20 e 99 funcionários é considerada empresa de pequeno porte. A empresa que possui entre 100 e 499 funcionários pode ser enquadrada como empresa de médio porte. Finalmente, a empresa que possui mais do que 500 funcionários registrados é considerada uma empresa de grande porte.

gesso acartonado. Isto, por sua vez, permite que a empresa tenha um nível de padronização na execução destes empreendimentos superior àquele normalmente encontrado no setor.

5.4.3.2 Descrição do Empreendimento W1

O empreendimento W1 localizava-se na cidade de Porto Alegre/RS e consistia na execução de um edifício residencial de alto padrão, com área construída total de 18.826,08 m², consistindo de subsolo, térreo e segundo pavimento de uso comum e uma torre com dezessete pavimentos-tipo, além de coberturas privativas. A torre era composta por 4 apartamentos por andar, totalizando 68 unidades. O empreendimento contava ainda com área descoberta composta de piscina adulto e infantil, *playground*, quadra esportiva e áreas arborizadas. O prazo de execução era de 21 meses, tendo início em junho de 2006 e término previsto para fevereiro de 2008. A figura 18, abaixo, mostra uma imagem do empreendimento.



Figura 18: vista do empreendimento A

5.4.3.3 Descrição das Atividades Realizadas

O estudo foi desenvolvido entre novembro de 2006 e março de 2007. Nesse estudo, optou-se por modelar apenas um processo de produção de forma isolada, a invés de proceder a um estudo de elaboração do PSP de forma completa. Esta opção justificou-se por dois motivos: primeiro, por se tratar de um estudo exploratório, considerou-se que este deveria ter uma

duração restrita (em função dos prazos para realização da pesquisa), mas que possibilitasse a consecução de seus objetivos; segundo, pode-se considerar que o estudo desenvolvido representa uma das etapas do PSP, o detalhamento de processo críticos ao longo da execução do empreendimento, conforme o modelo de elaboração proposto (SCHRAMM, 2004).

Desta forma, foram procedidas reuniões (sete reuniões, com aproximadamente uma hora e meia de duração) com o engenheiro de obra para a coleta de dados que permitissem a modelagem do processo sob estudo. Além disto, foram realizadas análises a documentos da empresa no quais foram obtidos dados acerca das produtividades médias das equipes de produção. Após esta coleta, o modelo de simulação foi desenvolvido e alguns cenários foram simulados.

5.5 FASE DE DESENVOLVIMENTO

5.5.1 Descrição das Empresas

Nesta secção são descritas as duas empresas nas quais foram desenvolvidos os quatro estudos de caso da fase de desenvolvimento. Na Empresa X foram desenvolvidos os estudos de caso 1 e 2, enquanto que na Empresa Y, os estudos 3 e 4.

5.5.1.1 Descrição da Empresa X

A empresa X é uma empresa construtora e incorporadora de pequeno porte fundada em 1980 e situada na cidade de Canoas/RS. A empresa atua no mercado imobiliário da região metropolitana de Porto Alegre, especificamente no nicho de mercado de edificações comerciais e residenciais (de média e baixa rendas). A empresa tem sistema da qualidade certificado pela ISO 9001:2000 desde 2004, assim como pelo Sistema de Qualificação de Empresas, Serviços e Obras (SIQ), do PBQP-H, nível A desde 2003.

Esta empresa tem sido uma parceira no NORIE/UFRGS no desenvolvimento de pesquisas em gestão da produção e de desenvolvimento de produto desde 1996. Na gestão da produção, esta empresa emprega os preceitos do modelo de planejamento e controle da produção proposto por Bernardes (2001). Nos últimos anos a empresa X vem atuando intensamente na execução de empreendimentos habitacionais financiados através do programa Carta de Crédito

Associativo⁴¹. Outra característica importante da empresa é que empreendimentos do mesmo nicho de mercado são concebidos tendo como base algumas diretrizes fixas de projeto (tipologia, área, padrão, materiais e técnicas construtivas) que vêm sendo aprimoradas à medida que novos empreendimentos são executados.

A motivação da empresa em participar do estudo relacionou-se ao interesse da equipe de gestão da produção em formalizar o projeto do sistema de produção dos empreendimentos daquele nicho de mercado, bem como, a partir desta formalização, discutir e avaliar alternativas de melhoria, principalmente com relação aos fluxos de trabalho e seus impactos na redução dos prazos de execução de suas fases.

5.5.1.2 Descrição da Empresa Y

A empresa Y é uma empresa construtora e incorporadora criada em 1980 que faz parte de um grupo empresarial fundado em 1913. É atualmente um dos principais grupos de engenharia, construção e incorporação do Brasil. A empresa tem sua matriz na cidade de São Paulo e possui sete escritórios regionais: São Paulo, Campinas, Rio de Janeiro, Porto Alegre, Belo Horizonte, Fortaleza e Oeste Paulista – estando presente em cinquenta e nove cidades brasileiras.

A Regional Sul da empresa atua no mercado imobiliário da região sul do Brasil, especificamente no nicho de mercado de edificações comerciais e residenciais (de alta, média e baixa rendas). A empresa tem sistema da qualidade certificado pela ISO 9001:2000 desde 2003, assim como pelo Sistema de Avaliação da Conformidade de Empresas de Serviços e obras da Construção Civil (SiAC), do PBQP-H, nível A desde 2003. Em 2000, a empresa Y implantou um sistema de ERP (*Enterprise Resourcing Planning*) para a gestão integrada de seus empreendimentos.

⁴¹ O programa Carta de Crédito Associativo, gerido pelo Ministério das Cidades, tem como objetivo conceder financiamento a pessoas físicas, associadas em grupos formados por uma entidade organizadora do grupo associativo, que podem ser condomínios, sindicatos, cooperativas, associações, companhias de habitação (COHAB) ou empresas do setor da construção civil. O financiamento se destina à produção de lotes urbanizados, construção de unidade habitacional ou a aquisição de unidade nova produzida no âmbito do próprio programa, cujo preço de venda seja no máximo de R\$ 80.000,00. O responsável pela concessão de financiamento é a CAIXA, a pessoas físicas com renda familiar mensal superior a R\$ 3.900,00 e até R\$ 4.900,00 (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2009). Neste caso, a empresa construtora X representa a entidade organizadora que elabora o projeto, forma grupos de compradores, gerencia as obras e a aplicação dos recursos. Os grupos acompanham a construção desde a fase do projeto, enquanto a CAIXA libera os recursos para as obras e financia as famílias para aquisição das unidades.

Esta empresa tem sido uma parceira no NORIE no desenvolvimento de pesquisas na área de gestão da produção desde 2007. Na gestão da produção, recentemente esta empresa vem empregando os preceitos do modelo de planejamento e controle da produção proposto por Bernardes (2001).

5.5.2 Descrição do Estudos de Caso 1

5.5.2.1 Descrição do Empreendimento X1

O empreendimento X1 tratava-se de um condomínio fechado de casas assobradadas, com um total de 112 unidades habitacionais, divididos em 21 blocos com 4, 8 ou 10 unidades cada. Além das unidades habitacionais, previa-se a construção de áreas verdes, *playground*, salão de festas e cinco lojas comerciais. O empreendimento tinha início planejado para o mês de outubro de 2007 e prazo final previsto para dezembro de 2010.

As unidades habitacionais tinham área privativa de 89,0 m² e eram compostas no pavimento térreo por sala de estar e jantar, lavabo, cozinha e área de serviço e, no segundo pavimento, por três dormitórios e banheiro. A figura 19, a seguir, apresenta resumidamente os principais materiais e técnicas construtivas empregados no empreendimento.

Elemento Construtivo	Materiais/Técnicas Construtivas
Fundações	<i>Radier</i>
Paredes	Alvenaria estrutural de blocos de concreto
Lajes	Pré-moldadas
Cobertura	Estrutura de madeira e telhas cerâmicas
Acabamento das paredes internas e tetos	Gesso corrido
Acabamento das paredes externas	Reboco de argamassa e massa texturada pigmentada
Esquadrias	Janelas de PVC e portas de madeira

Figura 19: principais materiais e técnicas construtivas utilizadas no empreendimento X1

A figura 20, a seguir, apresenta a implantação do empreendimento, as plantas baixas da unidade habitacional e uma foto externa de um conjunto de sobrados.

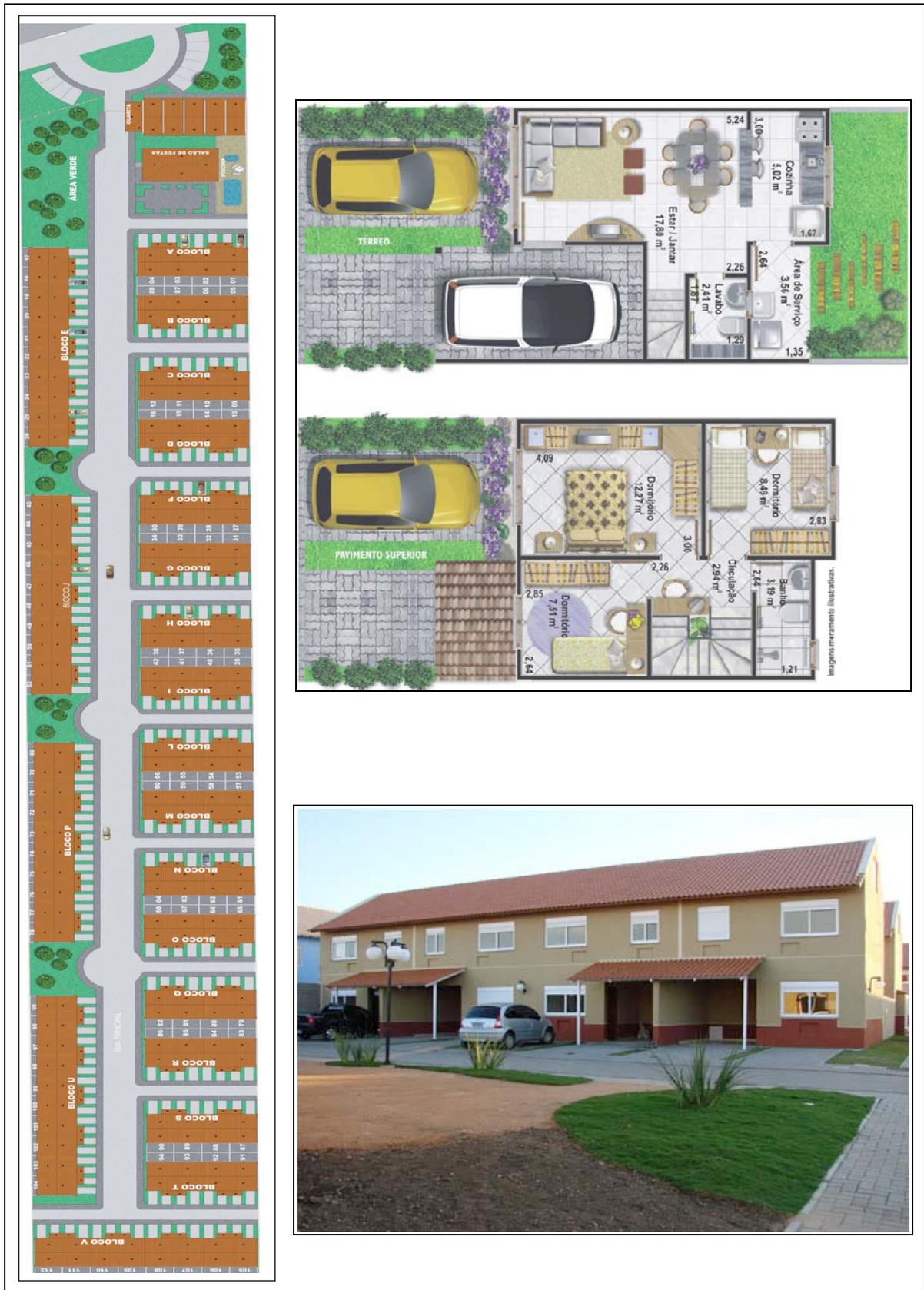


Figura 20: implantação, plantas baixas da unidade habitacional e foto de um bloco do empreendimento X1

5.5.2.2 Descrição das Atividades Realizadas

O estudo de caso foi iniciado durante o mês de agosto de 2007, em torno de dois meses antes do início previsto da fase de execução do empreendimento X1. Sua conclusão ocorreu em meados de outubro do ano de 2008. Tomaram parte das reuniões, além da equipe de pesquisadores⁴², o engenheiro responsável pela execução dos empreendimentos da empresa, a arquiteta responsável pelo desenvolvimento dos projetos, a arquiteta responsável pelos sistemas de planejamento e controle da produção e da qualidade; o mestre-de-obras geral da empresa, o técnico em edificações residente na obra, o responsável pelo setor de suprimentos da empresa e, eventualmente, principais subempreiteiros e fornecedores de materiais. As reuniões tinham, em princípio, uma periodicidade semanal, entretanto houve várias interrupções no fluxo destas reuniões em função do envolvimento da equipe da empresa com aspectos relativos à execução simultânea de outros empreendimentos, auditorias de qualidade, entre outros. No total, foram realizadas 26 ao longo dos quatorze meses do estudo.

Com base nas informações coletadas no início do estudo, algumas peculiaridades foram consideradas:

- a) a tipologia utilizada no empreendimento X1 vinha sendo empregada em empreendimentos em fase de construção, bem como em empreendimentos já construídos, e seria utilizado também em futuros empreendimentos da empresa. A empresa também já havia elaborado o PSP de um empreendimento bastante similar ao empreendimento X1, em execução naquele momento;
- b) além da comercialização de imóveis na planta, a empresa desejava produzir imóveis para estoque, com o objetivo de disponibilizá-los à pronta entrega para alguns clientes. Assim, havia uma estratégia mista de comercialização, na qual o ritmo de produção não era determinado diretamente pela formação de grupos de clientes (como previa o programa de financiamento do qual o empreendimento fazia parte);

⁴² Durante parte do desenvolvimento do estudo, além deste pesquisador, formaram a equipe de pesquisa a bolsista de iniciação científica Letícia R. Berr, que posteriormente foi substituída pelo também bolsista Guilherme L. Silveira. Também fez parte da equipe de pesquisadores a então mestrande Patrícia A. Tillmann que vinha realizando um estudo de caso na empresa acerca da implementação de uma estratégia de customização das unidades habitacionais no empreendimento X1.

- c) a empresa estava interessada em adotar uma abordagem de customização das unidades habitacionais como uma estratégia de conquista dos clientes indecisos e de obtenção de vantagem competitiva frente ao surgimento de novos competidores no mercado.

Uma vez que a tipologia do empreendimento já vinha sendo utilizada como um padrão na empresa, optou-se por elaborar o PSP reforçando a necessidade da tomada de decisões que possibilitasse sua replicação, com a redução do tempo necessários para seu desenvolvimento em empreendimentos futuros. Desta forma, o escopo do estudo focou no desenvolvimento do PSP do empreendimento e ao desenvolvimento de um modelo de simulação que apoiasse o processo e que pudesse ser reutilizado em empreendimentos futuros da empresa. Em paralelo ao desenvolvimento deste estudo, um estudo acerca da implementação na empresa de uma estratégia de customização estava sendo desenvolvido pela pesquisadora Patrícia A. Tillmann. Desta forma, estas pesquisas foram integradas e a elaboração do PSP do empreendimento buscou apoiar a implementação desta estratégia.

5.5.3 Estudo de Caso 2

5.5.3.1 Descrição do Empreendimento X2

O segundo estudo de caso foi desenvolvido no empreendimento X2, também um empreendimento da empresa X. O empreendimento X2 localizava-se na cidade de Novo Hamburgo/RS e consistia na execução de um condomínio de 68 casas assobradadas, de médio-padrão, com dois e três dormitórios e área privativa de aproximadamente 78,0 m² e 89,0 m², respectivamente, divididos em dezesseis conjuntos de casas, dos quais quinze conjuntos possuíam quatro e um possuía oito sobrados. O empreendimento contava ainda com área comum composta por salão de festas, quadra poliesportiva infantil, churrasqueira, *playground*, piscina, cancha de bocha e guarita. O início da fase de execução estava originalmente programado para o mês de janeiro de 2009 sendo a duração prevista de dezoito meses. A figura 21, a seguir, apresenta a implantação do empreendimento.



Figura 21: implantação do empreendimento X2

As características que diferenciavam este empreendimento do empreendimento X1 diziam respeito ao número de unidades habitacionais, sua implantação no terreno (número de blocos de casas e número de casas por bloco). Ainda, as unidades habitacionais do empreendimento X2, no que tange as unidades de três dormitórios, eram idênticas àquelas do empreendimento X1, com relação à área construída, disposição dos compartimentos, materiais e técnicas construtivas utilizadas. No caso das unidades de dois dormitórios, a diferenciação das demais era função apenas da área construída, ao número e disposição dos compartimentos e a existência de um abrigo para automóveis fora do corpo da casa.

5.5.3.2 Descrição das Atividades Realizadas

Este estudo de caso foi iniciado em dezembro de 2008, antecedendo em aproximadamente 45 dias o início previsto originalmente para a fase de execução. Sua conclusão ocorreu em maio de 2009. Tomaram parte das reuniões, além da equipe de pesquisadores⁴³, o engenheiro responsável pela execução dos empreendimentos da empresa, a arquiteta responsável pelos sistemas de planejamento e controle da produção e da qualidade, mestre-de-obras e o técnico em edificações residente na obra.

As reuniões tinham, em princípio, uma periodicidade semanal mas, assim como ocorreu no estudo de caso 1, houve algumas interrupções no fluxo destas reuniões. No total, foram realizadas quinze reuniões, ao longo dos seis meses de duração do estudo.

⁴³ Durante parte do desenvolvimento do estudo, além deste pesquisador, formaram a equipe de pesquisa a bolsista de iniciação científica Raquel H. Reck.

O escopo deste estudo foi o processo de elaboração do PSP do empreendimento X2 a partir das decisões que já haviam sido tomadas no estudo anterior para o empreendimento X1. Da mesma forma, avaliou-se a estratégia de reutilização do modelo de simulação anteriormente desenvolvido. Assim, buscou-se avaliar que melhorias poderiam ser implementadas no PSP do empreendimento com base na experiência da equipe de pesquisadores e de produção da empresa no empreendimento passado.

5.5.4 Estudo de Caso 3

5.5.4.1 Descrição do Empreendimento Y1

O empreendimento Y1 tratava-se de um condomínio fechado de 400 casas assobradadas geminadas, compostas de três dormitórios (sendo uma suíte), sala de estar e jantar, cozinha banheiro, área de serviço e pátio, agrupadas em 27 conjuntos de casas. As unidades tinham área construída de aproximadamente 156,0 m². A figura 22, a seguir, apresenta resumidamente os principais materiais e técnicas construtivas empregados no empreendimento.

Elemento Construtivo	Materiais/Técnicas Construtivas
Fundações	<i>Radier</i>
Paredes	Alvenaria estrutural de blocos de concreto
Lajes	Pré-moldadas
Cobertura	Estrutura de madeira e telhas cerâmicas
Acabamento das paredes internas e tetos	Gesso corrido
Acabamento das paredes externas	Reboco de argamassa e massa texturada pigmentada
Esquadrias	Janelas de PVC e portas de madeira

Figura 22: principais materiais e técnicas construtivas utilizadas no empreendimento Y1

O empreendimento contava ainda com área comum composta de piscinas, *playground*, clube, estacionamentos e áreas arborizadas. O prazo de execução era de 37 meses, sendo que a execução teve início em dezembro de 2007. A figura 23, abaixo, mostra uma implantação do empreendimento, enquanto a figura 24 apresenta uma imagem das unidades habitacionais do empreendimento.



Figura 23: implantação do empreendimento Y1



Figura 24: vista de duas unidades habitacionais geminadas do empreendimento Y1

O empreendimento era dividido em três fases de entrega, com 132, 138 e 130 casas, respectivamente, e com prazos de entrega previstos para janeiro de 2010, julho de 2010 e janeiro de 2011. A figura 25 apresenta a divisão do empreendimento Y1 nestas fases.



Figura 25: divisão das fases do empreendimento Y1

5.5.4.2 Descrição das Atividades Realizadas

O processo de elaboração do PSP do empreendimento foi iniciado em julho de 2008, aproximadamente 15 dias antes do início do empreendimento (fase de terraplenagem). Sua conclusão ocorreu em março de 2009. Este estudo de caso fez parte de um projeto de treinamento e capacitação em PSP promovido pelo NORIE/UFRGS para a empresa Y. Este projeto era dividido em dois conjuntos de ações integradas: (a) o treinamento da equipe de engenheiros da empresa acerca do PSP, a partir de seminários nos quais eram apresentados e discutidos os principais conceitos de PSP e do uso da simulação; e (b) a implementação em paralelo do processo de elaboração do PSP em dois empreendimentos da empresa, entre os quais estava o empreendimento Y1. Como forma de avaliar e discutir os principais benefícios e dificuldades na implementação desse processo com os demais participantes, a equipe de engenheiros do empreendimento Y1 apresentava a evolução do trabalho que vinha sendo realizado durante os seminários de treinamento.

O interesse da empresa Y na participação no projeto surgiu, como uma evolução do trabalho sendo realizado junto a empresa, uma vez que haviam sido realizados estudos anteriores em outros empreendimentos da empresa, nos quais houve a implementação do processo de planejamento e controle da produção, com base no modelo proposto pelo NORIE (BERNARDES, 2001). Naquela ocasião, inseriu-se, com bons resultados, o uso da linha de balanço como uma ferramenta de planejamento de longo prazo. Também corroborou para este interesse o fato de que o empreendimento Y1 representava a primeira experiência da regional

da empresa em relação àquela tipologia (condomínio de casas) e outros empreendimentos com aquelas características seriam futuramente lançados. Assim, o desenvolvimento do PSP do empreendimento representava uma maneira de formalizar a análise e discussão das características do sistema de produção do empreendimento de forma antecipada ao seu início.

Dessa forma, além da equipe de pesquisadores⁴⁴, tomaram parte do estudo o engenheiro de planejamento da empresa, o engenheiro-coordenador do empreendimento, o engenheiro de obra (substituído ao longo dos primeiros meses de execução por outro engenheiro que também tomou parte no estudo), o mestre-de-obras da empresa Y, o mestre-de-obras da empreiteira de mão-de-obra obra civil e, quando necessários, principais fornecedores de materiais e empresas subcontratadas (lajes pré-fabricadas, esquadrias de alumínio, esquadrias de madeira, instalações hidrossanitárias, instalações elétricas, cobertura, entre outros). As reuniões tiveram, em princípio, uma periodicidade semanal. No total, foram realizadas 20 reuniões, ao longo dos oito meses de duração do estudo.

O escopo deste estudo foi a avaliação do processo de elaboração do PSP do empreendimento e da utilização da simulação como uma ferramenta de apoio à tomada de decisão em um contexto diferente daquele encontrado na empresa X. No caso do empreendimento Y1, o estudo de caso representou a primeira experiência de implementação do PSP da empresa Y. Assim, buscou-se avaliar as principais dificuldades da sua implementação, bem como da oportunidade de uso da simulação no processo.

5.5.5 Estudo de Caso 4

5.5.5.1 Descrição do Empreendimento Y2

O empreendimento Y2 tratava-se de um condomínio residencial formado por 340 apartamentos, divididos em 17 blocos de edifícios com cinco pavimentos e quatro apartamentos por andar, dos quais onze blocos eram formados por apartamentos de três dormitórios, enquanto os demais por apartamentos de dois dormitórios. Os apartamentos eram compostos por sala de estar e jantar, cozinha e área de serviço integradas, banheiro social, além de dois ou três dormitórios. A área construída dos apartamentos variava entre 53,0 e 71,0 m². A figura 26, a seguir, apresenta resumidamente os principais materiais e técnicas construtivas empregados no empreendimento.

Elemento Construtivo	Materiais/Técnicas Construtivas
Fundações	<i>Estacas pré-moldadas</i>
Paredes	Alvenaria estrutural de blocos de concreto
Lajes	Pré-moldadas
Cobertura	Estrutura de madeira e telhas cerâmicas
Acabamento das paredes internas e tetos	Gesso corrido
Acabamento das paredes externas	Reboco de argamassa e massa texturada pigmentada
Esquadrias	Janelas de PVC e portas de madeira

Figura 26: principais materiais e técnicas construtivas utilizadas no empreendimento Y2

Além dos edifícios, o empreendimento possuía churrasqueira, piscina, salão de festas, *playground*, quadra, guaritas, espaço *gourmet*, piscina adulto, piscina infantil, praça de convívio e quadra poliesportiva. O início da fase de execução do empreendimento estava originalmente previsto para o mês de fevereiro de 2009, com prazo de entrega de 16 meses. A figura 27 apresenta a implantação do empreendimento, enquanto a figura 28 mostra uma vista de um dos dezessete blocos do empreendimento.

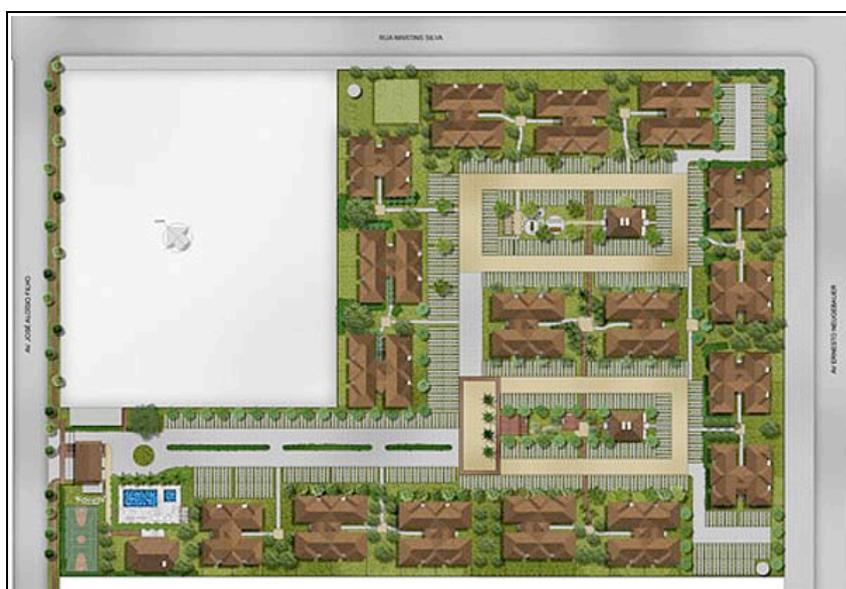


Figura 27: implantação do empreendimento Y2

⁴⁴ Neste estudo, além deste pesquisador, formou a equipe de pesquisa o bolsista de iniciação científica Guilherme L. Silveira, que no final do estudo foi substituído pela também bolsista Raquel H. Reck.



Figura 28: vista de um bloco do empreendimento Y2

5.5.5.2 Descrição das Atividades Realizadas

O estudo foi iniciado entre os meses de novembro de 2008 (antecedendo em aproximadamente três meses a data programada para o início da fase de execução). Sua conclusão deu-se em maio de 2009. Participaram das reuniões, além da equipe de pesquisadores⁴⁵, o engenheiro de planejamento da empresa (participou eventualmente do processo), o engenheiro-coordenador do empreendimento, além do engenheiro responsável pela execução do empreendimento (um engenheiro fora contratado durante o desenvolvimento do trabalho e posteriormente substituído por outro profissional que tomou parte no processo no final do estudo). Ainda tomaram parte de algumas reuniões fornecedores de argamassa industrializada, lajes pré-moldadas e blocos de concreto, além do gerente regional da empresa Y. As reuniões ocorriam, em princípio, duas vezes por semana. No total, foram realizadas 18 reuniões (num total de 36 horas), ao longo dos sete meses de duração do estudo.

A realização do PSP do empreendimento foi uma demanda originada pela própria empresa Y. Da mesma forma que a solicitação para a inclusão da simulação no estudo. Em paralelo a esse estudo vinha sendo realizada a elaboração do PSP em outro empreendimento da empresa, como parte do projeto anteriormente descrito. Desta forma, o escopo deste estudo foi a avaliação do processo de elaboração do PSP do empreendimento Y2, cuja tipologia diferia das tipologias encontradas nos outros empreendimentos que já haviam sido estudados. Da mesma forma, buscou-se avaliar um possível amadurecimento do processo de elaboração,

⁴⁵ Além deste pesquisador, formou a equipe de pesquisa a bolsista de iniciação científica Raquel H. Reck.

tendo em vista que parte da equipe que participou do estudo havia também participado do estudo anterior.

5.6 FASE DE ANÁLISE E REFLEXÃO

A análise dos dados foi procedida em duas etapas. Na primeira, cada um dos casos foi analisado separadamente (*within-case analysis*), buscando avaliar o processo de elaboração do PSP em cada um dos empreendimentos estudados de forma isolada. Já na segunda etapa, foi feita uma comparação dos vários casos entre si (*cross-case analysis*) buscando similaridades e diferenças entre eles que facilitassem a obtenção de conclusões a respeito do objeto de estudo.

Desta forma, à luz dos objetivos deste trabalho, buscou-se estabelecer critérios que permitissem avaliação do processo de elaboração do PSP nos empreendimentos estudados, bem como o desenvolvimento e emprego da simulação como ferramenta de apoio à tomada de decisão neste processo. Esta avaliação teve como premissa a utilização de múltiplas fontes de evidência, como forma de reforçar a consistência da análise dos dados. Outros trabalhos que propuseram avaliações de modelos gerenciais foram também utilizados como referência para definição desses critérios. Nesse sentido, contribuíram os trabalhos de Barros Neto (1999) e Saurin (2002). Assim, dois constructos foram identificados e utilizados neste trabalho: (a) utilidade; e (b) facilidade de uso.

Corroborou para a escolha do primeiro constructo – utilidade – as considerações de Kasanen, Lukka e Siitonen (1993), os quais afirmam que a real utilidade de uma construção gerencial (no caso o PSP elaborado para o empreendimento) nunca é provada antes que ela tenha passado por um teste prático e que o critério primário para medir os resultados dos estudos aplicados empregando a estratégia de pesquisa construtiva é a sua utilidade prática. Neste caso, o foco da avaliação é a construção, ou seja, o PSP elaborado para o empreendimento. Já o segundo constructo – facilidade de uso – foi escolhido como forma de avaliar, desta feita, o processo de elaboração do PSP. Por se tratarem de constructos amplos e de difícil mensuração, foi necessário desdobrá-los, utilizando alguns subconstructos que foram avaliados através de evidências ou variáveis (assinaladas nas figuras seguintes com a letra V) obtidas a partir da coleta de múltiplas fontes de evidência, no caso das evidências ou mensuradas diretamente, no caso de variáveis.

Desta forma, o constructo “utilidade” foi desdobrado em quatro subconstructos: (a) contribuição do PSP para a percepção de tomada de decisão de forma conectada; (b) utilização do PSP como referência na tomada de decisão na gestão do empreendimento; (c) contribuição para a sistematização do processo de tomada de decisão; e (d) contribuição do emprego da simulação para o processo de tomada de decisão do PSP. A figura 29 apresenta este desdobramento.

Constructo	UTILIDADE					
Subconstructo	Contribuição do PSP para a percepção da necessidade de tomada de decisão de forma conectada					
Evidências	Necessidade de envolver outros setores da empresa, fornecedores e subempreiteiros no processo de elaboração.		Necessidade de ampliação do escopo ou detalhamento dos processos sendo considerados.		Necessidade de avaliar o impacto de decisões isoladas no sistema de produção como um todo	
Fontes de evidência	Observação participante das reuniões de PSP					
Subconstructo	Utilização do PSP como referência na tomada de decisão da gestão do empreendimento					
Evidências/ Variáveis	Utilização das decisões do PSP como base no planejamento e controle do empreendimento.	Necessidade de atualização do PSP durante a fase de execução.	Interesse em relacionar o PSP às decisões estratégicas relacionadas ao empreendimento.	Interesse em estender o PSP a outros empreendimentos da empresa.	Ocorrência de renegociações com fornecedores e subempreiteiros com base nas decisões do PSP.	
Fontes de evidência/ Mensuração	Análise documental Observação direta	Observação participante	Entrevistas com os envolvidos Observação participante	Entrevistas com os envolvidos Observação participante	Observação participante	
Subconstructo	Contribuição para a sistematização do processo de tomada de decisão					
Evidências/ Variáveis	Aderência da seqüência de decisões tomadas ao modelo de elaboração do PSP.		Envolvimento (engajamento) dos participantes na consecução das demandas oriundas do processo de elaboração do PSP.		Introdução e discussão de conceitos de gestão da produção durante o desenvolvimento do estudo.	
Fontes de evidência/ Mensuração	Observação participante					
Subconstructo	Contribuição do emprego da simulação para o processo de tomada de decisão					
Evidências/ Variáveis	Ocorrência de demandas para a inclusão de novos cenários a serem simulados.	Número de cenários simulados ao longo do estudo (V)	Emprego das informações oriundas da simulação na tomada de decisão pelos participantes.		Intenção dos participantes em utilizar a simulação em outros empreendimentos.	
Fontes de evidência/ Mensuração	Observação participante	Contagem do número de cenários simulados	Observação direta Análise dos planos de produção Entrevista com os participantes	Entrevistas com os envolvidos		

Figura 29: desdobramento do constructo utilidade

O constructo “facilidade de uso” foi desdobrado nos seguintes subconstructos: (a) iniciativa dos participantes no processo de modelagem; (b) extensão do processo de elaboração do PSP; (c) contribuição para a comunicação e o entendimento das decisões entre os participantes; e (d) possibilidade de continuação do processo após o estudo. A figura 30 apresenta este desdobramento.

Constructo	FACILIDADE DE USO		
Subconstructo	Iniciativa dos participantes no processo de modelagem		
Evidências/ Variáveis	Ocorrência de solicitações de alterações do escopo ou detalhamento do modelo durante a elaboração do PSP.	Ocorrência de demandas dos participantes para o desenvolvimento de novos modelos ou teste de novos cenários.	
Fontes de evidência/ Mensuração	Observação participante		
Subconstructo	Extensão do processo de elaboração		
Evidências/ Variáveis	Tempo despendido na elaboração do PSP (V).	Tempo despendido no desenvolvimento dos modelos de simulação (V).	Número de módulos diferentes entre o modelo original e reutilizado (V).
Fontes de evidência/ Mensuração	Registro do tempo despendido	Registro do tempo despendido	Comparação entre modelos desenvolvidos
Subconstructo	Contribuição para a comunicação e entendimento das decisões entre os participantes		
Evidências/ Variáveis	Utilização das ferramentas geradas durante as discussões entre os participantes.	Utilização das ferramentas geradas para a comunicação e controle no canteiro de obras.	
Fontes de evidência/ Mensuração	Observação participante	Observação direta	
Subconstructo	Possibilidade de continuação do processo após o estudo		
Evidências/ Variáveis	Interesse dos participantes em utilizar o PSP em empreendimentos futuros.	Ocorrência de uso dos elementos do PSP sem a interferência do pesquisador.	
Fontes de evidência/ Mensuração	Entrevistas com os envolvidos	Observação direta	

Figura 30: desdobramento do constructo facilidade de uso

5.7 MÉTODOS E TÉCNICAS DE COLETA E ANÁLISE DE DADOS

Nesse estudo foi utilizado um conjunto de técnicas de coleta e análise de dados como forma de compor as evidências necessárias à consecução de seus objetivos. A vantagem mais importante do uso de múltiplas fontes de evidências, segundo Yin (2002), é o

desenvolvimento de linhas convergentes de evidências, as quais podem corroborar um mesmo fato ou fenômeno, permitindo testar as proposições do trabalho em um processo de triangulação. Essas ferramentas são caracterizadas a seguir.

5.7.1 Observação Direta

Yin (2002) afirma que, em geral, as provas observacionais são úteis para fornecer informações adicionais sobre o tópico que está sendo estudado. A observação é um tipo de registro importante das características relevantes do estudo de caso. Ao se realizarem visitas de campo, são criadas oportunidades para observações diretas. As observações do empreendimento foram realizadas ao longo dos primeiros meses de execução dos empreendimentos X1, X2 e Y1 (visto que o empreendimento Y2 ainda não havia iniciado quando do encerramento do estudo). Não houve uma periodicidade pré-determinada na realização das observações, mas as mesmas coincidiram com a realização das reuniões do PSP, que aconteceram nos respectivos canteiros de obra.

Basicamente, estas observações tiveram como foco identificar evidências da operacionalização das decisões do PSP na fase de execução, tais como: atendimento ao plano de ataque do empreendimento e à seqüência de execução das unidades-base; além do emprego das ferramentas geradas ao longo do processo de elaboração do PSP na fase de execução.

Uma fonte de registro das evidências foi baseada nos registros redigidos pelo pesquisador no momento da ocorrência dos fenômenos observados, através da utilização do caderno de campo (EASTERBY-SMITH; THORPE; LOWE, 1991). Além de apoiar o registro de evidências da observação direta, o caderno de campo foi utilizado durante todo o desenvolvimento dos estudos de caso, como forma de registro das reuniões de elaboração do PSP, principais demandas surgidas ao longo do processo, entre outras.

5.7.2 Observação Participante

De acordo com Yin (2002), a observação participante é uma modalidade especial de observação na qual o pesquisador não é apenas um observador passivo, assumindo uma variedade de papéis dentro do estudo de caso, vindo a participar dos eventos que estão sendo estudados.

Uma vez que o foco deste trabalho refere-se ao processo de elaboração do PSP, a observação participante foi uma das principais oportunidades para coleta de dados durante este trabalho. Nesse caso, durante as reuniões de elaboração do PSP este pesquisador assumiu um papel ativo na implementação e desenvolvimento do processo. Esse papel atuante do pesquisador é um pressuposto da pesquisa construtiva.

Desta forma, em todas as reuniões realizadas os resultados das observações foram anotados no caderno de campo (quem eram os participantes, a duração das reuniões, os assuntos tratados e seus desdobramentos). Além dos dados sobre a reunião, as principais reflexões acerca das informações coletadas foram registrados. Estas anotações serviram de base para discussões posteriores entre a equipe de pesquisa, bem como para criar um histórico do processo para futuras reflexões.

5.7.3 Análise de Documentos

A principal utilidade dos documentos é corroborar as informações obtidas através de outras fontes. Além disso, também é possível fazer inferências a partir da análise documental. A análise documental foi utilizada durante a realização dos estudos, apoiando o desenvolvimento do PSP nos empreendimentos estudados.

Os planos de longo prazo dos empreendimentos estudados foram utilizados como fontes de evidências da utilidade das decisões do PSP para a gestão dos empreendimentos. Da mesma forma, planos de curto prazo foram fontes de evidências quanto à operacionalização das decisões do PSP, no que diz respeito à observância do plano de ataque e seqüência de execução da unidades-base.

5.7.4 Entrevistas

Segundo Yin (2002) as entrevistas são fontes de evidências essenciais no desenvolvimento de estudos de caso já que uma de suas principais vantagens é que estas possibilitam a realização de inferências sobre os dados registrados segundo a percepção dos entrevistados.

Foi realizada uma entrevista semi-estruturadas, cujo roteiro encontra-se no apêndice A, com os envolvidos no processo de elaboração do PSP, nos estudos de caso 1 e 2. Buscou-se obter suas percepções acerca do processo de elaboração e do uso da simulação como ferramenta de apoio à tomada de decisão. Foram entrevistados o engenheiro de produção e a arquiteta

responsável pelos sistemas de planejamento e qualidade da empresa X. A entrevista ocorreu no final do estudo 2, referindo-se aos dois estudos realizados na empresa. Nos estudos de caso 3 e 4, o engenheiro coordenador dos empreendimentos Y1 e Y2 foi entrevistado por ocasião da preparação de uma reunião para apresentação dos resultados do estudos de caso 4 à equipe de engenharia da empresa Y. Esta entrevista procurou avaliar a utilidade do PSP, a partir da percepção deste quanto aos principais benefícios e dificuldades no processo de elaboração.

É importante salientar, entretanto, que ao longo de todos os estudos os seus participantes eram questionados sobre aspectos relevantes no desenvolvimento do processo. Estas questões tiveram como objetivo captar as principais impressões destes sobre o PSP e sobre o uso da simulação, principais dificuldades e benefícios percebidos. As respostas a esses questionamentos eram registradas no caderno de campo, sendo posteriormente analisadas e discutidas pela equipe de pesquisa.

6 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

6.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta os quatro estudos de caso desenvolvidos nesta tese. Faz-se uma descrição das atividades desenvolvidas no âmbito da elaboração do Projeto do Sistema de Produção dos empreendimentos e, em especial, do desenvolvimento e emprego da simulação como uma ferramenta de apoio à tomada de decisão. Cada estudo é concluído com uma análise à luz dos objetivos desta tese.

6.2 ESTUDO EXPLORATÓRIO

Conforme discutido anteriormente, o estudo realizado modelou apenas um processo produtivo de forma isolada, neste caso o processo de aplicação de revestimento externo dos dezoito pavimentos-tipo do empreendimento (compreendendo o intervalo entre o 3º e 20º pavimentos). A escolha deste processo ocorreu por sugestão do engenheiro de produção, considerando que o processo representava um processo crítico, pois sua execução determinava a possibilidade de antecipação de processos subsequentes e, desta forma, o prazo final do empreendimento. Ainda, a partir da realização deste estudo seria possível estender seus resultados a outros empreendimentos da empresa no mesmo nicho.

Assim, a necessidade de desenvolvimento do modelo de simulação surgiu como uma forma de estudar como diferentes estratégias de execução do referido processo poderiam resultar na redução do *lead time* deste processo sem, no entanto, o aumento da capacidade dos recursos de produção já previstos (principalmente mão-de-obra).

De forma resumida, o processo de revestimento consistia de quatro etapas: montagem dos jaús⁴⁶, aplicação de chapisco, aplicação de reboco e desmontagem dos jaús. O processo de aplicação de revestimento seria dividido por fachada – num total de 4, norte, sul, leste e oeste. Estas, por sua vez, seriam divididas em um número panos (faixas) que corresponderiam ao número de jaús utilizados em cada fachada, cada uma destas especificada a uma determinada equipe de trabalho.

De acordo com o plano de longo prazo do empreendimento, documentos-padrão para todos os empreendimentos da mesma tipologia executados pela empresa W, o processo de execução de argamassa de revestimento (designado nos documentos da empresa por “massa mista”), iniciaria somente após a conclusão do processo de elevação da alvenaria de todos os 18 pavimentos da torre. A partir deste momento, seria feita a montagem dos jaús, após a qual seria iniciada a aplicação do chapisco, partindo do 3º pavimento em direção ao 20º, ou seja, de baixo para cima. Concluído este processo, ocorreria uma espera de 7 dias para a cura da argamassa, após a qual o processo de aplicação de reboco e emboço ocorreria no sentido contrário, ou seja, de cima para baixo.

Com base nestas condições de execução, procedeu-se um estudo que simulasse o processo de execução de revestimento de fachada testando algumas estratégias de execução que visavam reduzir seu *lead time* total, através da redução do lote de transferência, ou seja, antecipar a execução do revestimento, iniciando-o sem a necessidade de aguardar o término da elevação de alvenaria.

Na prática, isto significa, estabelecer o número de pavimentos que deveriam ter a elevação da alvenaria concluída para que o processo de revestimento pudesse iniciar sem que este sofresse interrupções pela falta de alvenaria concluída, considerando a variabilidade nas durações dos processos de alvenaria e revestimento, este último em especial devido à alta variabilidade que normalmente existe entre as equipes. Assim, o processo de revestimento seria executado em dois lotes, o primeiro correspondendo a um número de pavimentos cujo *lead time* fosse no mínimo igual ao *lead time* do processo de alvenaria nos demais pavimentos, e o segundo correspondendo aos demais pavimentos.

⁴⁶ “Jaú” é um andaime suspenso por cabos ou cordas, que se move na vertical e é empregado nos trabalhos externos, especialmente em grandes alturas (HOUAIS, 2001).

O estudo de caso teve início no mês de novembro de 2006, a partir de uma reunião com o engenheiro da obra. Procedeu-se uma coleta dos dados necessários à caracterização do problema, através de uma entrevista com o engenheiro de produção e da análise de um conjunto de documentos da empresa (plano de longo prazo, planos do processo de revestimento utilizados em outros empreendimentos similares). Com base nestas informações, passou-se a elaboração de um modelo, no qual foram representadas as atividades que compunham o processo, assim como as suas interdependências, utilizando o próprio *software* de simulação, através da modelagem do processo no formato de fluxograma.

A partir da elaboração deste modelo, realizada pelo pesquisador, procedeu-se uma validação da sua lógica, por meio de uma técnica chamada inspeção estruturada (*structured walkthrough*) juntamente com o engenheiro de produção da empresa. Com base nessa inspeção, percebeu-se a necessidade da realização de algumas correções no modelo, especificamente através da inserção de algumas atividades que não haviam sido consideradas no processo de coleta de dados. A figura 31 apresenta a segunda versão do modelo conceitual.

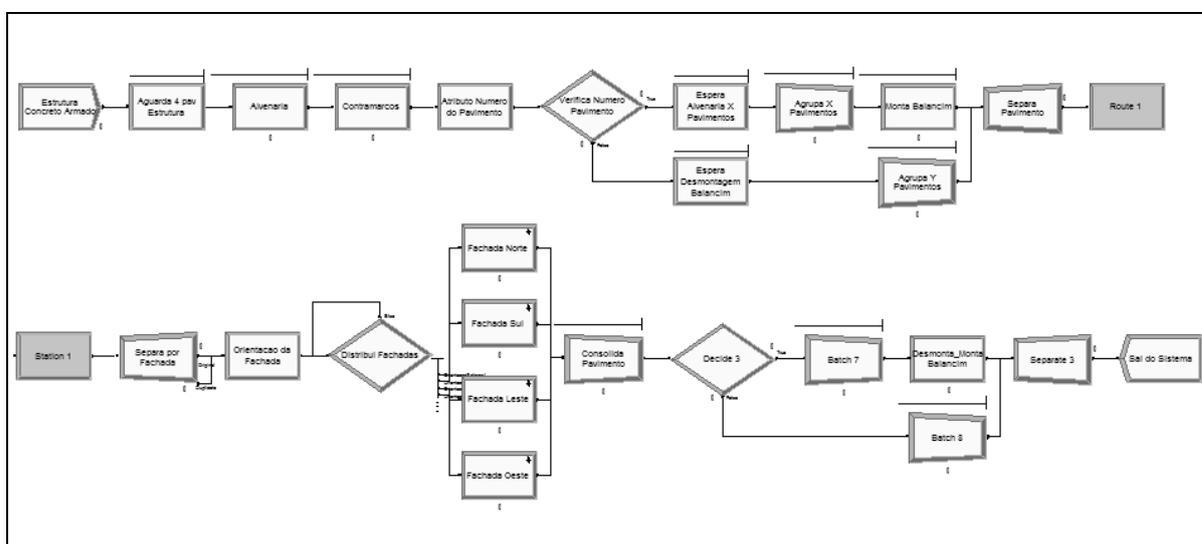


Figura 31: segunda versão do modelo conceitual desenvolvido

Para cada uma das atividades que compunham o modelo, buscou-se determinar, através de informações do engenheiro de produção, as funções distribuição de probabilidade de cada atividade. Inicialmente, pretendia-se estabelecer algumas distribuições com base em dados históricos de empreendimentos passados. Entretanto, isto não foi possível dado que no

empreendimento sob estudo ocorreram modificações no grau de ornamentação das fachadas, o que acarretou um aumento substancial nas durações.

Desta forma, optou-se por estabelecer as durações das atividades a partir da experiência do engenheiro de produção, na forma de uma distribuição triangular, na qual os parâmetros definidores foram a duração mais otimista, a duração mais pessimista e a duração mais provável das atividades. No caso das durações da atividade de aplicação do revestimento, estas foram obtidas a partir de dados de produtividade das equipes, utilizados como divisores da área de cada pano em cada pavimento.

Foram simulados sete cenários. O cenário 1 considerou a estratégia de execução originalmente planejada no plano de longo prazo do empreendimento, como previamente explicado. Outras seis estratégias alternativas foram também simuladas. Nestas, os dezoito pavimentos repetitivos foram divididos em dois lotes de produção, o que permitiria iniciar o processo de aplicação do revestimento mais cedo, antes do término de todo o processo de elevação da alvenaria (cenário 1). O andar no qual o edifício seria dividido para originar os lotes de produção foi chamado de “ponto de corte”. A tabela 01, abaixo, sumariza os cenários simulados e apresenta os *lead times* médios dos processos de estrutura, alvenaria e aplicação de revestimento, baseados em 40 replicações para cada cenário.

Tabela 01: cenários simulados

Cenário	Ponto de Corte (andar)	Lote 1 (andares)	Lote 2 (andares)	Lead Time Médio (dias úteis)	Desvio-padrão
1	20	18	0	195,05	1,77
2	16	14	4	183,83	2,61
3	15	13	5	177,65	2,59
4	14	12	6	170,46	2,49
5	13	11	7	164,88	2,26
6	12	10	8	160,71	1,35
7	11	9	9	162,54	1,30

Fonte: modelo de simulação

De acordo com os resultados, a redução do tamanho do lote de produção reduz os *lead times* médios dos processos considerados. O melhor resultado foi obtido no cenário 6, no qual houve uma redução de aproximadamente 35 dias úteis no *lead time* dos três processos, em função da antecipação do início do processo de revestimento e com a redução dos tempos de espera. Desta forma, comprovou-se que a simples antecipação do início da execução do

processo de revestimento podia reduzir o *lead time* dos processos sob consideração, sem o aumento na capacidade dos recursos utilizados, considerada a mesma em todos os cenários simulados.

6.2.1 Conclusões do Estudo Exploratório

A partir da experiência de utilização do *software* no desenvolvimento do modelo, foi possível avaliar a adequação do mesmo no processo de modelagem de processos da construção civil. De uma forma geral, pode-se dizer que não foram encontradas dificuldades no processo de modelagem do processo sob estudo. A modelagem através de blocos que compõem o fluxograma do processo permitiu que o processo de modelagem fosse facilitado. Assim, optou-se pelo desenvolvimento do modelo conceitual diretamente na tela do computador e, a partir da sua validação, este fosse incrementado para a elaboração do modelo final.

O processo de validação do modelo, realizada em conjunto com o engenheiro de produção utilizando a técnica de inspeção estruturada, foi bastante positivo no sentido de dar credibilidade do modelo por parte do engenheiro. Este processo foi muito facilitado pela animação do modelo. Embora bastante simplificada, já que somente as entidades foram animadas, esta permitiu que a lógica do modelo fosse avaliada e aprovada pelo engenheiro de produção.

Mesmo sem uma completa definição do processo de execução de revestimento, o desenvolvimento do modelo não foi interrompido pela falta de informações. Assim, optou-se pelo desenvolvimento evolutivo do modelo, empregando para tanto o conceito de submodelos oferecido pelo *software*. Desta forma, processos que careciam de maiores definições foram representados de forma simplificada por módulos de processo que eram detalhados posteriormente, a partir da disponibilidade das informações necessárias.

Duas dificuldades foram enfrentadas durante o processo de desenvolvimento do modelo que dizem respeito às características peculiares da construção civil. A primeira disse respeito à dificuldade na obtenção de dados históricos dos processos de produção, em função da natureza única dos mesmos. Dessa forma, lançou-se mão de definir as durações probabilísticas com base na opinião subjetiva do engenheiro de produção. Entretanto, percebeu-se que havia certa resistência por parte do engenheiro em considerar a existência de variabilidade nos processos. Para tanto, sempre que questionado sobre a possibilidade de que

certa duração determinística fosse ultrapassada, o mesmo afirmava que isto não aconteceria, já que o número de trabalhadores nas equipes poderia ser aumentado.

A segunda dificuldade diz respeito à quebra na seqüência de execução dos processos. Durante o processo de modelagem, em uma visita ao empreendimento, percebeu-se que embora o plano de longo prazo do empreendimento apontasse, como foi modelado, que o processo de elevação da alvenaria somente seria iniciado após a conclusão da estrutura de concreto armado em quatro pavimentos, isto não se verificou na prática. De acordo com o engenheiro de produção, este expediente é utilizado como uma forma de aumentar a quantidade de serviços medidos mensalmente. Da mesma forma, poderiam acontecer quebras de seqüências de atividades preestabelecidas, como forma de contornar alguma dificuldade técnica. Este tipo de expediente, entretanto, é típico da indústria da construção civil, conferindo certa flexibilidade ao processo de construção, necessária para lidar com o alto nível de incerteza característico.

O processo de desenvolvimento do modelo serviu como pano de fundo para discussões acerca dos processos considerados, embora o nível de interação do usuário no processo de construção do modelo fosse bastante limitado. Esta pequena interação se deveu à pouca disponibilidade de tempo do engenheiro de produção o que limitava as reuniões à apresentação da evolução do modelo e à discussões sobre a necessidade de novas informações.

O estudo de caso exploratório propiciou algumas reflexões com relação à utilização da simulação no processo de elaboração do PSP. Em primeiro lugar, deve-se buscar formas de aproximar mais o decisor do estudo, aumentando sua interação no processo e, desta forma, a credibilidade e utilidade dos modelos desenvolvidos, visto que esta interação foi aquém da inicialmente desejada. Em função da flexibilidade das decisões relacionadas aos processos de produção na construção civil, é oportuno buscar formas de conferir também certa flexibilidade aos modelos, facilitando e agilizando possíveis modificações, necessárias em virtude de alterações na estratégia de execução, capacidade dos recursos de produção, seqüência de produção, por exemplo. Uma possibilidade a ser explorada é a de criação de módulos que representem tais processos produtivos, e que condensem os detalhes de cada um destes e que possam ser facilmente alterados quanto a algumas configurações e sua posição na seqüência de execução.

6.3 ESTUDO DE CASO 1

6.3.1 Elaboração do PSP do empreendimento

Conforme apresentado anteriormente, o estudo de caso foi iniciado em torno de 2 meses antes do início previsto da fase de execução do empreendimento X1.

Ao todo, foram realizadas durante o desenvolvimento do estudo 26 reuniões, que se estendeu por 14 meses. Estas reuniões tinham em média 2 horas de duração (num total de aproximadamente 52 horas despendidas em reuniões). Além das reuniões, foram despendidas pela equipe de pesquisa outras 116 horas para preparação das reuniões, elaboração de ferramentas e desenvolvimento dos modelos de simulação empregados no estudo.

O desenvolvimento do PSP do empreendimento baseou-se na seqüência de elaboração proposta no trabalho de Schramm (2004). Das etapas propostas no modelo de elaboração do PSP, apenas a etapa de identificação e projeto de processos críticos não foi executadas. A figura 32, a seguir, apresenta um resumo do esforço despendido em horas em cada uma das etapas do processo de elaboração do PSP, seus participantes, bem como no desenvolvimento de ferramentas e modelos de simulação, além dos envolvidos em cada etapa.

Etapa do PSP	Participantes	Número de Reuniões/ Carga horária	Preparação e Apoio ao Processo	Período de Execução
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Definição da Seqüência de Execução da Unidade-base 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Engenheiro de Obra ▪ Responsável pelo Planejamento ▪ Responsável pelo desenvolvimento do projeto ▪ Mestre-de-obras ▪ Responsável pela gestão no canteiro 	14 reuniões (28 horas)	34 horas	agosto/07 a março/08
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pré-dimensionamento da Capacidade dos Recursos de Produção 				
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estudo dos Fluxos de Trabalho na Unidade-base 				
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Definição da Estratégia de Ataque do Empreendimento 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Engenheiro de Obra ▪ Responsável pelo Planejamento 	02 reuniões (04 horas)	02 horas	novembro/07
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estudo dos Fluxos de Trabalho no Empreendimento 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Engenheiro de Obra ▪ Responsável pelo Planejamento 	10 reuniões (20 horas)	80 horas	março/08 a outubro/08
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dimensionamento da Capacidade dos Recursos de Produção 				
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Identificação e Projeto de Processos Críticos 	Não realizado			
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Desenvolvimento do Módulo Genérico de Simulação 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Equipe de Pesquisa 		30 horas	dezembro/07 a fevereiro/08
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Desenvolvimento e Validação do Modelo de Simulação 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Engenheiro de Obra ▪ Responsável pelo Planejamento 		80 horas	fevereiro/08 a outubro/08

Figura 32: esforço despendido na elaboração do PSP no empreendimento X1

6.3.2 Descrição Detalhada das Atividades Realizadas

Após a coleta de informações preliminares sobre o empreendimento, a primeira etapa foi a discussão e análise de informações que permitissem estabelecer uma seqüência de execução padrão da unidade-base do empreendimento (definida como um módulo composto de 03 ou

04 casas, em função da existência de juntas de dilatação que permitiam que os conjuntos de casas fossem subdivididos nesses módulos).

Embora a empresa já viesse executando aquela tipologia construtiva, e assim conhecia os processos necessários para a sua execução, percebeu-se que não havia uma padronização na seqüência de atividades a serem executadas pelas equipes de produção. Conforme informações do engenheiro da empresa, interrupções nos fluxos de trabalho das equipes em função de interferências entre processos eram fatos frequentes. Outra necessidade dizia respeito à definição de tempos de ciclo para estes processos, bem como à composição de cada equipe para o alcance daquele tempo, como forma de facilitar o controle e de estabelecer parâmetros para exigir dos subempreiteiros a manutenção de um número mínimo de equipes e operários no canteiro.

Uma primeira versão da seqüência de execução das casas foi definida em uma série de reuniões com a participação do engenheiro de produção, da arquiteta responsável pelo planejamento, do mestre-de-obras geral e do técnico em edificações da obra. Para cada atividade foram registrados os tamanhos dos lotes de produção e transferência, além de um primeiro dimensionamento do número de operários da cada equipe. Também foram estimados os tempos de ciclo para a execução de cada processo. Nesse caso, solicitava-se aos participantes que fornecessem três valores para esses tempos, um valor otimista, um valor mais provável (moda) e um valor pessimista, de forma a se estabelecer uma distribuição triangular para tal tempo. Estas informações foram sendo consolidadas em um diagrama de precedência, com o objetivo de facilitar sua compreensão e utilização para a discussão, especialmente nas reuniões com subempreiteiros e fornecedores.

Alguns fornecedores e subempreiteiros-chave foram convidados a participar das reuniões. Essa participação foi necessária no momento em que os participantes perceberam a necessidade de obter desses algumas informações mais precisas sobre o processo construtivo, interdependências entre atividades, disponibilidade de mão-de-obra, bem como capacidade de fornecimento de materiais. Assim, o fornecedor de lajes pré-fabricadas e blocos de concreto, além dos subempreiteiros geral, de aplicação de gesso corrido em paredes e tetos, pintura e de instalações elétricas e hidráulicas foram convidados a participar da discussão e avaliação da seqüência de execução proposta. Com base nas suas contribuições, uma série de alterações foram realizadas, tanto nas relações de precedência entre atividades, como também nas durações das atividades e dimensionamento das equipes de execução.

Concomitantemente à elaboração do PSP, uma estratégia de customização para os produtos da empresa estava sendo discutida e analisada a partir de um estudo que estava sendo conduzido por outra pesquisadora da UFRGS⁴⁷. Nessa estratégia, foi estabelecida uma gama de possibilidades de mudanças a serem oferecidas aos clientes, baseada nas principais alterações solicitadas ou executadas por moradores em empreendimentos anteriores, identificadas através de avaliações pós-ocupação.

Embora a customização das unidades habitacionais já fosse uma prática da empresa, esta era executada de forma pouco estruturada. Os principais problemas advindos desta prática foram ressaltados pelo engenheiro de produção, com base nas experiências de empreendimentos passados: (a) se a unidade habitacional não houvesse sido construída, o cliente teria a possibilidade de inúmeras mudanças, o que vinha de encontro aos benefícios da tentativa de padronização do processo produtivo; (b) se a unidade habitacional estivesse em construção, algumas modificações poderiam impactar processos já executados, resultando em retrabalho; e (c) no caso de a unidade já estivesse concluída, algumas mudanças poderiam resultar na necessidade de demolição de elementos já concluídos.

O processo de customização gerava, muitas vezes, a necessidade de deslocar equipes de produção que estavam executando as unidades de acordo com o plano de ataque do empreendimento para realizar alterações em unidades já executadas, interrompendo o fluxo de trabalho e inserindo grande variabilidade no mesmo. Outro aspecto importante relacionava-se ao aumento na necessidade de controle dos processos produtivos, em função das diferentes configurações que as unidades poderiam assumir.

Desta forma, propôs-se redefinir a forma como o sistema de produção estava organizado até então pela empresa, de forma a criar as condições necessárias para a implementação da estratégia de customização pretendida. Este redesenho baseou-se em alguns pontos-chave: (a) necessidade de padronização da seqüência de execução das unidades habitacionais a fim de facilitar o controle sobre a sua execução e sobre o processo de customização; (b) renegociação com os principais fornecedores a fim de reduzir os lotes de entrega e facilitar a diversificação de especificações dos materiais utilizados; e (c) melhorar o fluxo de informações entre os envolvidos no processo de customização (equipe de arquitetura, equipe de produção, equipe

⁴⁷ Arquiteta Patrícia A. Tillmann, mestranda da UFRGS

de suprimentos e equipe de vendas) de forma a unificar as informações transmitidas ao cliente quanto às opções oferecidas (prazos, possibilidades, custos, entre outros).

Em função da estratégia de customização, a seqüência de execução da unidade habitacional foi dividida em duas etapas. A primeira correspondia à execução e conclusão de uma unidade “básica” que poderia ser estocada, independentemente da existência ou não de um cliente para ela. Nesta etapa, foram definidos pontos de tomada de decisão na seqüência de execução que determinavam os momentos-limite nos quais uma certa opção de customização deveria ser definida pelo cliente para sua consecução, de acordo com as possibilidades anteriormente elencadas. A segunda etapa, por sua vez, correspondia ao processo de customização realizado na unidade “básica” mantida em estoque pela empresa, a partir da sua aquisição por um cliente. A figura 33 apresenta um detalhe da seqüência de execução definida, mostrando um dos pontos de customização definidos pela empresa (em amarelo), no qual constavam as possibilidades de modificações possíveis àquela fase da seqüência construtiva.

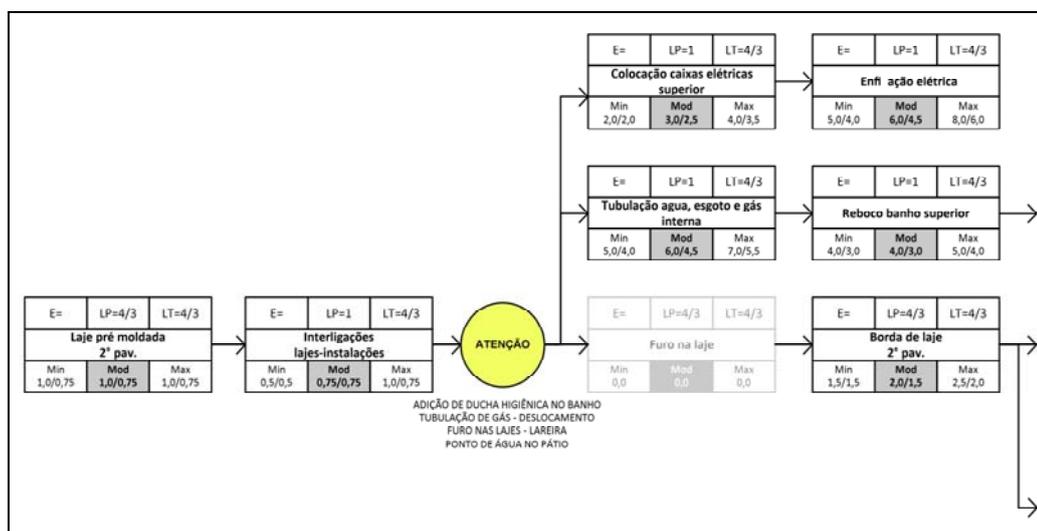


Figura 33: parte do diagrama de precedência elaborado para o empreendimento X1

A figura 34, a seguir, apresenta uma visão geral da seqüência proposta, evidenciando as duas etapas descritas.

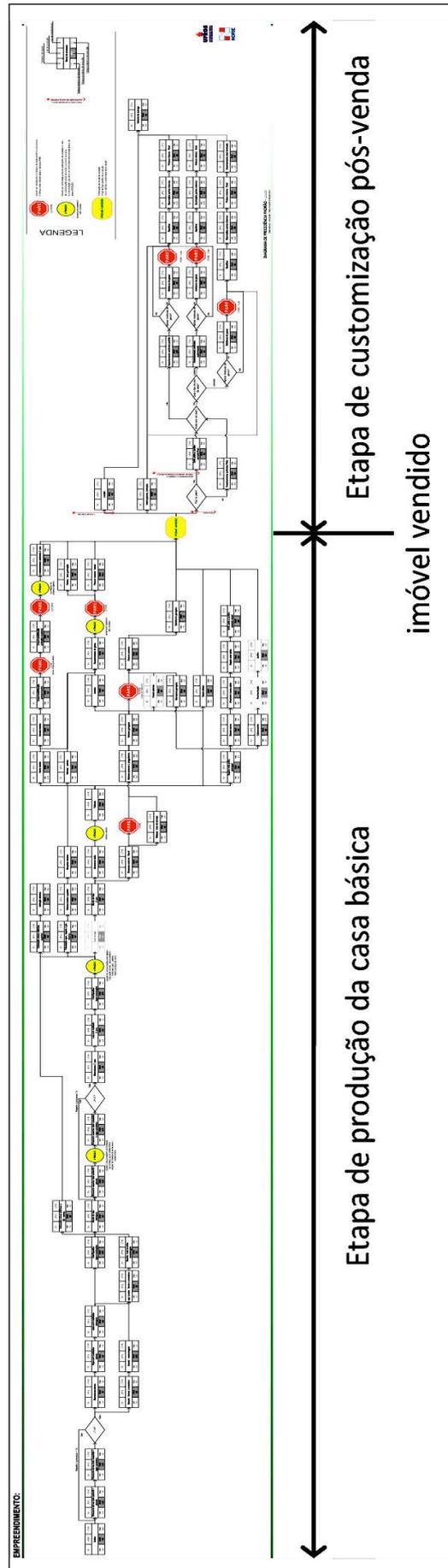


Figura 34: diagrama de precedência com a seqüência de execução da unidade-base do empreendimento X1

A figura 35, a seguir, apresenta um resumo das principais modificações permitidas aos clientes do empreendimento ao longo da fase de execução (imóvel não iniciado ou em construção).

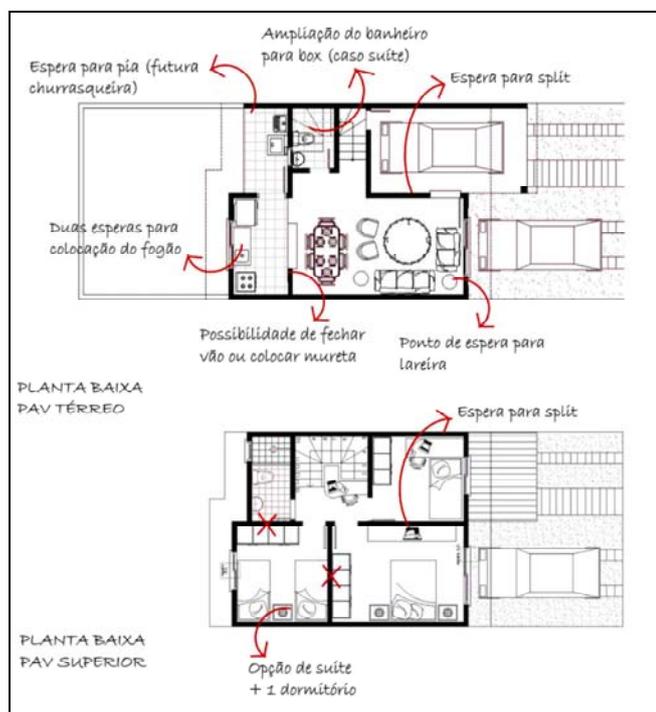


Figura 35: alternativas de customização fornecidas aos clientes no empreendimento X1 (TILLMANN, 2008)

Uma vez que a possibilidade de consecução de cada mudança estava condicionada à fase da seqüência de execução em que se encontrava a unidade habitacional no momento da aquisição pelo cliente, foram estabelecidos quatro níveis de customização. Estes se diferenciavam conforme o momento em que o cliente ingressava no processo em relação ao estágio no qual se encontrava a etapa de produção (TILLMANN, 2009): (a) nível 4: permitido àqueles clientes que adquirissem suas unidades ainda nas primeiras semanas da fase de construção; (b) nível 3: destinado a clientes que adquirissem suas unidades no segundo mês da fase de construção; (c) nível 2: destinado aos clientes que adquirissem suas unidades no terceiro mês da fase de construção; e (d) nível 1: nesse nível as solicitações poderiam ser enviadas até o final da obra, uma vez que se tratavam de modificações na unidade básica.

A customização da unidade básica (construção finalizada) possibilitava que o cliente optasse por mudanças nos acabamentos das casas – revestimentos cerâmicos de pisos e paredes,

laminados, louças e metais, acabamentos elétricos e pintura interna das unidades. Desta forma, as principais mudanças permitidas aos clientes que comprassem uma unidade habitacional após esta ter sido concluída estão resumidas na figura 36, a seguir.

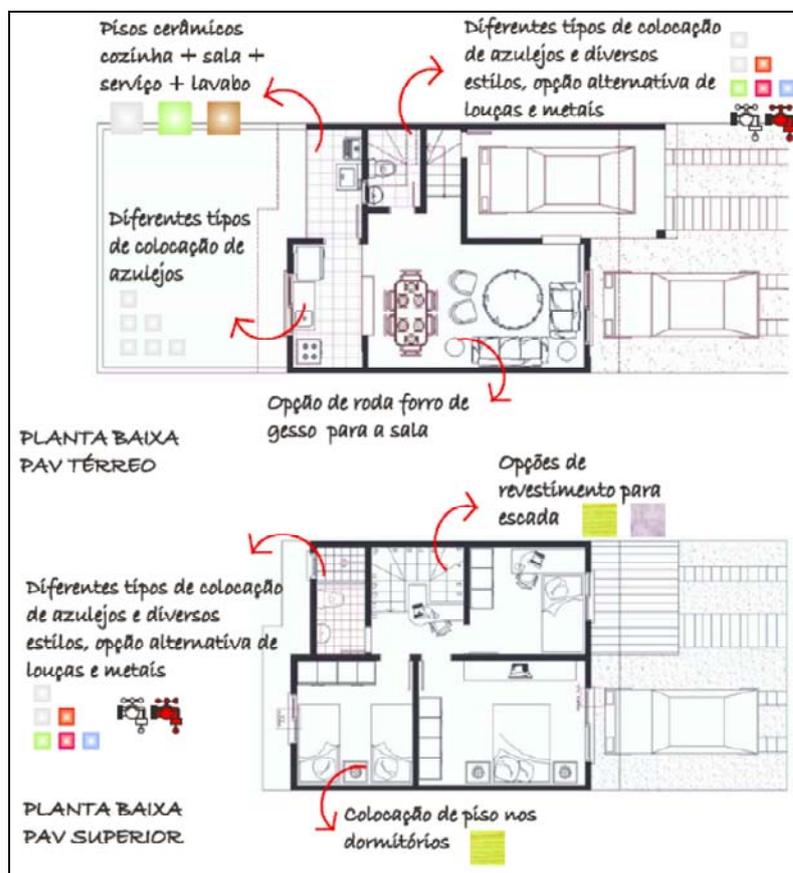


Figura 36: opções de customização das unidades básicas a partir da sua aquisição (TILLMANN, 2008)

A fim de tornar viável o processo de customização, foi necessária a seleção de fornecedores que fornecessem lotes menores de produtos com *lead times* de entrega reduzidos. Foram identificados alguns fornecedores locais com os quais foram realizadas negociações pelo setor de compras, juntamente com a arquiteta projetista. Esta negociação possibilitou um aumento na gama de opções de acabamentos oferecidos aos clientes, criando um número bastante grande de combinações possíveis.

A fim de sistematizar o processo, foi desenvolvida uma planilha eletrônica reunindo informações sobre a customização de cada unidade habitacional, orientando os diferentes setores da empresa. Esta planilha permitia que o cliente escolhesse suas opções de personalização entre as combinações possíveis. A figura 37 apresenta esta planilha.

Opções de Customização						
Cliente:	Clique aqui para inserir o nome do cliente.			Versão:	clique	
Obra:	Clique aqui p/ nome da obra		Bloco:	clique		Data:
Resp.:	Clique p/ resp. pela venda		Data de Conclusão:	passe o mouse		04.jun.08
1 COZINHA						
Código	Item	Opções	Modelo		Preço	
1.1	Piso	Padrão	Delta Nevlon P4 43x43 Rejunte Gelo		R\$ -	
1.2	Azulejo	Padrão	Barra - Delta Mont Blanc 36x36 Rejunte G		R\$ -	
2 ÁREA DE SERVIÇO						
Código	Item	Opções	Modelo		Preço	
2.1	Piso	Padrão	Delta Nevlon P4 43x43 Rejunte Gelo		R\$ -	
2.2	Azulejo	Padrão	Barra - Delta Mont Blanc 36x36 Rejunte G		R\$ -	
2.3	Louças	Padrão	Tanque Padrão		R\$ -	
3 LAVABO						
Código	Item	Opções	Modelo		Preço	
3.1	Piso	Padrão	Delta Nevlon P4 43x43 Rejunte Gelo		R\$ -	
3.2	Piso+Azulejo	Sem Azulejo	Sem Piso e Azulejo Combinados		R\$ -	
			Sem Piso e Azulejo Combinados		R\$ -	
			Sem Faixa		R\$ -	
3.3	Rodapé	Padrão	Lavabo sem rodapé		R\$ -	
3.4	Louças	Padrão	Bacia e Lavatório linha Colonial		R\$ -	
4 SALA						
Código	Item	Opções	Modelo		Preço	
4.1	Piso	Padrão	Sala sem Piso		R\$ -	
4.2	Rodapé	Padrão	Sala sem rodapé		R\$ -	
5 DORMITÓRIOS E CIRCULAÇÃO (2º PAVIMENTO)						
Código	Item	Opções	Modelo		Preço	
5.1	Piso					
5.2	Rodapé					
6 BANHO						
Código	Item	Opções	Modelo		Preço	
6.1	Piso					
6.2	Azulejo					
6.3	Faixa de Azulejo					
6.4	Louças					

Figura 37: planilha de registro das opções de customização do cliente

Com base nas escolhas do cliente, era possível fornecer a este uma previsão da data de entrega, levando em consideração o *lead time* de execução de cada processo, a seqüência de execução da unidade habitacional e o *lead time* de pedido e recebimento dos materiais, bem como o custo total dessas alterações. O setor de engenharia recebia um gráfico de *Gantt* (figura 38) que informava as modificações solicitadas, bem como a programação para sua execução. Já o setor de suprimentos, recebia os quantitativos de materiais e as datas-limite para solicitação junto aos respectivos fornecedores.

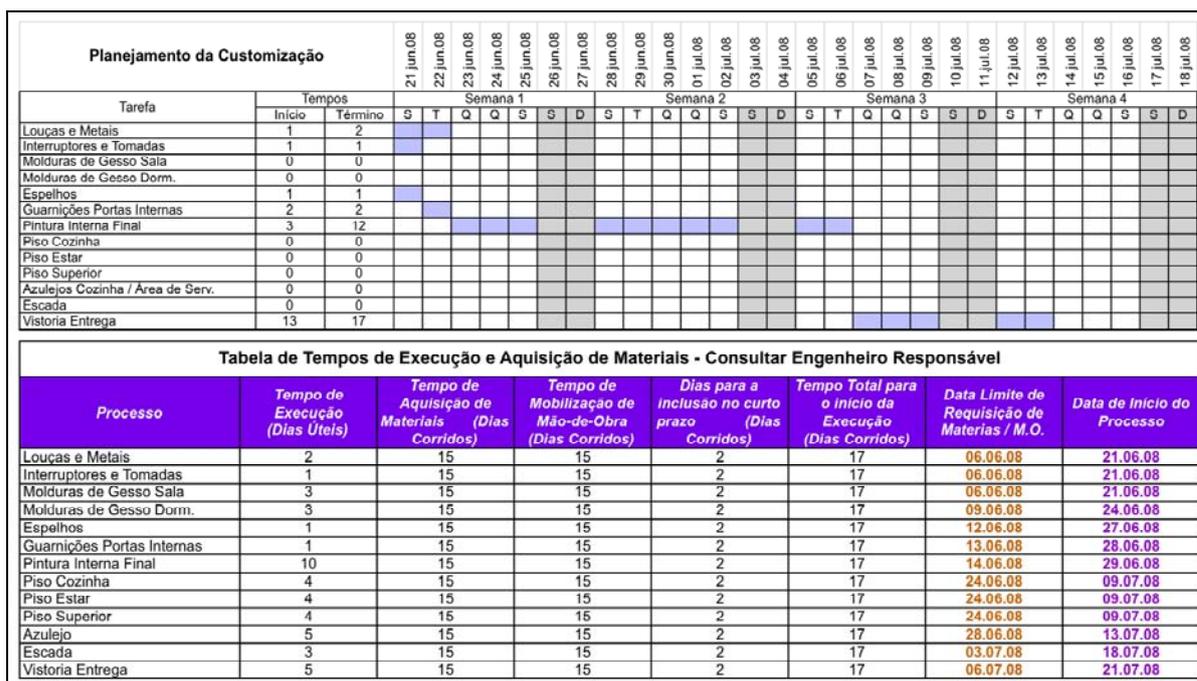


Figura 38: gráfico de Gantt com a programação da customização (acima) e planilha com as datas-limite para aquisição dos materiais (abaixo)

Ao mesmo tempo em que esta sistematização auxiliava a reduzir o nível de incerteza no processo produtivo, uma vez que, além de todas as atividades necessárias para a customização das unidades habitacionais e uma previsão das datas de início e fim dessas atividades, ela servia também de guia ao setor de vendas da empresa, no sentido de claramente estabelecer as opções de customização disponíveis, seus custos e prazos para sua consecução.

Em paralelo à definição da seqüência de execução da unidade-base, um estudo dos fluxos de trabalho para a execução da unidade-base foi elaborado. Para tanto, o estudo considerou a execução de dois conjuntos de casas, como forma de auxiliar na determinação dos tamanhos dos lotes de produção e transferência, bem como determinar os necessidades de sincronização entre processos, revendo, quando necessários, os tempos de ciclo necessários. Para tanto, uma linha de balanço foi elaborada, a fim de apoiar as discussões. A figura 39, a seguir, apresenta parte da linha de balanço elaborada.

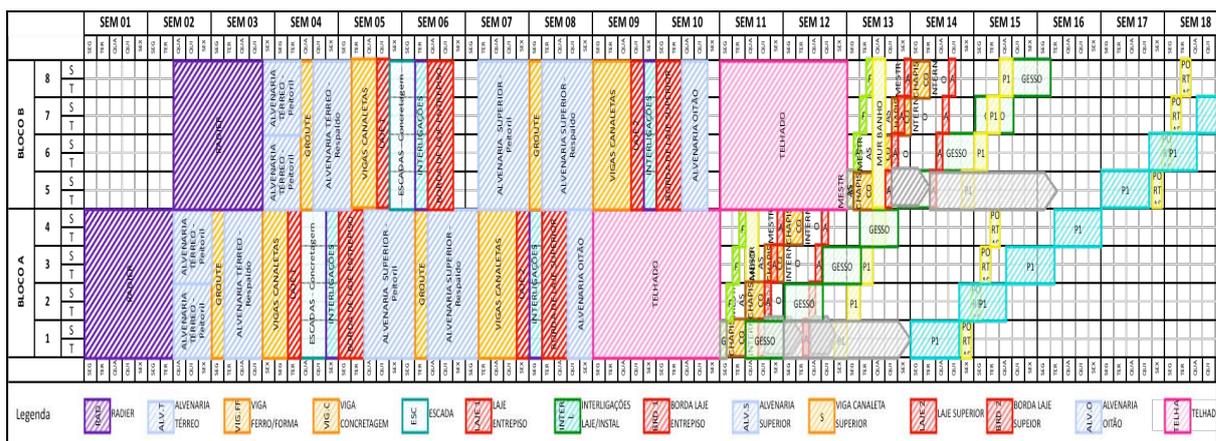


Figura 39: linha de balanço elaborada durante o estudo

A próxima decisão discutida foi a estratégia de ataque do empreendimento. Esta, entretanto, limitou-se à formalização de uma decisão que já havia sido tomada pelo diretor da empresa quando da definição do cronograma de vendas do empreendimento. A figura 40 apresenta graficamente a seqüência de execução dos blocos de casas, enquanto na sua parte inferior pode-se ver a seqüência na qual os blocos seriam executados. Neste caso, a prioridade era a execução dos blocos localizados na frente do empreendimento, uma vez que os mesmos eram de mais fácil comercialização e ficavam contíguos à área de uso comum que deveria ser entregue na primeira fase do empreendimento por exigência do banco financiador.

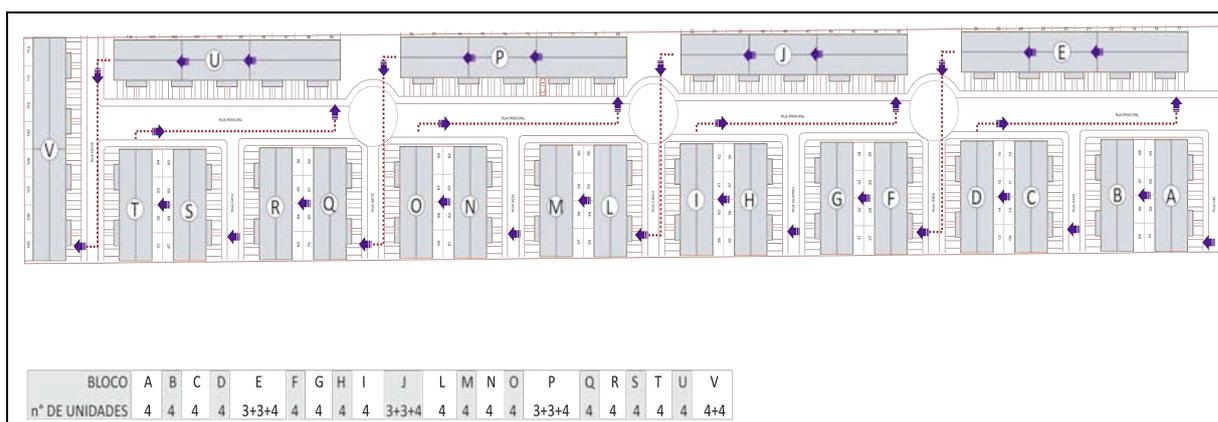


Figura 40: plano de ataque do empreendimento

6.3.2.1 Desenvolvimento do Modelo de Simulação do Empreendimento X1

A partir das definições que já haviam realizadas, já estavam disponíveis as informações necessárias para o desenvolvimento do modelo de simulação com vistas ao seu emprego na

etapa seguinte do PSP, a discussão acerca dos fluxos de trabalho do empreendimento. Um dos problemas potenciais do emprego da simulação dizia respeito ao tempo de desenvolvimento do modelo de simulação, que poderia vir a impactar na oportunidade de seu uso durante o PSP.

Desta forma, propôs-se um módulo genérico de simulação como forma de tentar reduzir o tempo necessário para o desenvolvimento do modelo e possibilitar sua utilização no decorrer do estudo. Assim, ainda durante as discussões acerca da seqüência de execução da unidade base, iniciou-se a construção do modelo de simulação do empreendimento. O intuito era de inseri-lo nas discussões da forma mais precoce possível, uma vez que esta era a primeira implementação prática realizada após o estudo exploratório, gerando a necessidade de investigar a melhor estratégia de construção do modelo e seu emprego no processo de elaboração do PSP.

Com base na experiência no desenvolvimento do modelo no estudo exploratório, quatro atributos foram definidos como fundamentais para a modelagem de um processo produtivo qualquer: tempo de ciclo, recursos utilizados (equipe ou equipamento), tamanho do lote de produção e tamanho do lote de transferência. Estes atributos já eram geralmente coletados para a definição da seqüência de execução e utilizados na elaboração do estudo dos fluxos de trabalho, através da linha de balanço.

Para a modelagem de cada processo, cinco módulos de simulação deveriam ser utilizados: (a) para a formação do lote de produção do processo corrente; (b) para seu processamento; (c) para o desmembramento do lote de produção; (d) para a formação do lote de transferência para o próximo processo; e (e) para o desmembramento do referido lote. Entretanto, com a evolução na modelagem do sistema de produção do empreendimento, percebeu-se que o tempo e o esforço necessários para caracterizar cada processo produtivo eram elevados e que isto impactaria no aumento do tempo total necessário para a construção do modelo completo.

A construção de um módulo de simulação que sumarizasse genericamente as características de um processo produtivo e que pudesse ser rapidamente configurado a partir da entradas de dados foi considerada como uma das estratégias possíveis para a redução do tempo de modelagem. Este “módulo genérico” poderia também fornecer uma interface para a coleta dados do processamento de cada entidade por ele processada (início e fim do processamento,

por exemplo). Assim, com base nestas premissas, elaborou-se um modelo conceitual do referido módulo, apresentado na figura 41, a seguir.

De uma forma geral, as entidades (unidades-base do empreendimento) ao ingressarem no módulo de simulação passam pelas seguintes etapas: (a) são agrupadas até formarem o lote de transferência do processo precedente, a partir da informação inserida na interface do módulo; (b) após serem desagrupadas, são agrupadas para formarem o lote de produção do processo corrente, cujo tamanho também é informado via interface; (c) a disponibilidade do recurso é verificada e, se este não está disponível, o lote de produção aguarda até a liberação do recurso por outro processo e então ocupa-o; (d) o tempo de início do processamento do lote é então registrado; (e) com base no tempo de ciclo, há o processamento do lote pelo recurso; (f) após o processamento, o recurso é liberado para que possa ser utilizado em outro processo; (g) após o desagrupamento do lote de produção, os tempos de conclusão do processamento são também registrados; e (h) as entidades saem do módulo.

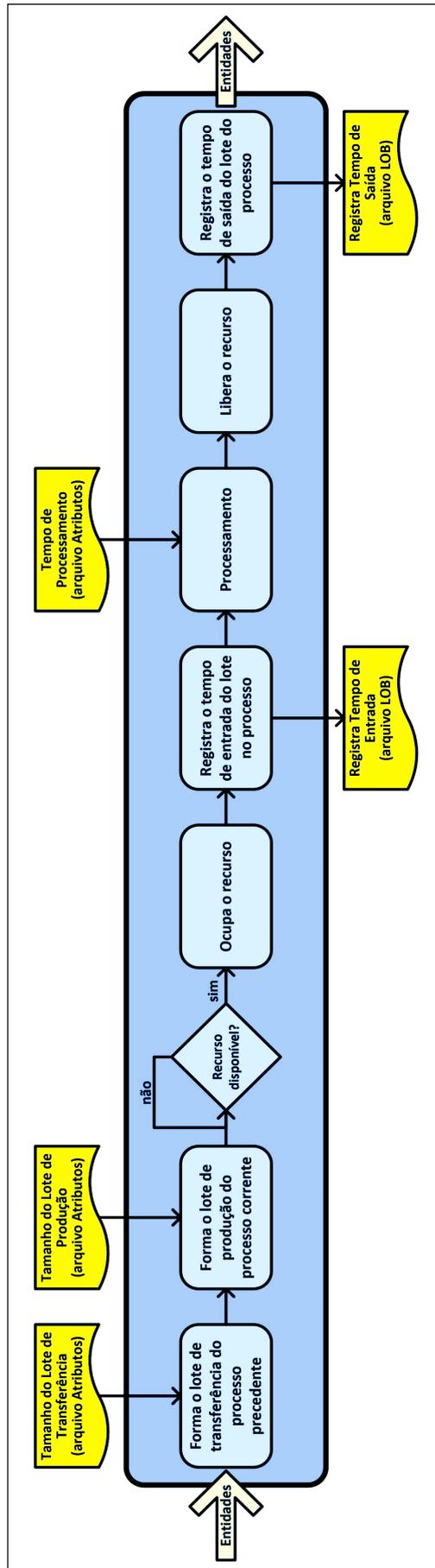


Figura 41: modelo conceitual do módulo genérico de simulação proposto

Com base neste modelo conceitual, o módulo genérico de simulação proposto neste trabalho foi construído. A estrutura do módulo é apresentada na figura 42, enquanto o módulo e sua interface para ingresso dos dados no *software* de simulação são apresentados na figura 43.

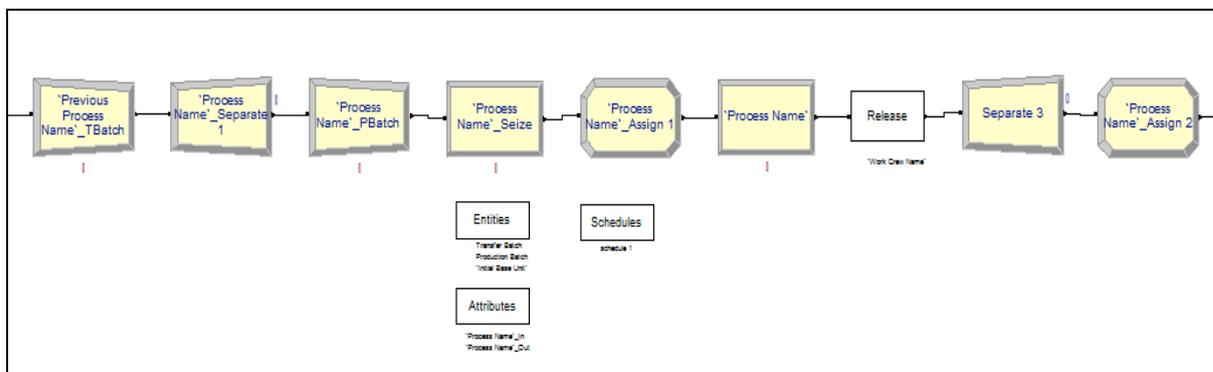


Figura 42: estrutura do modelo genérico proposto

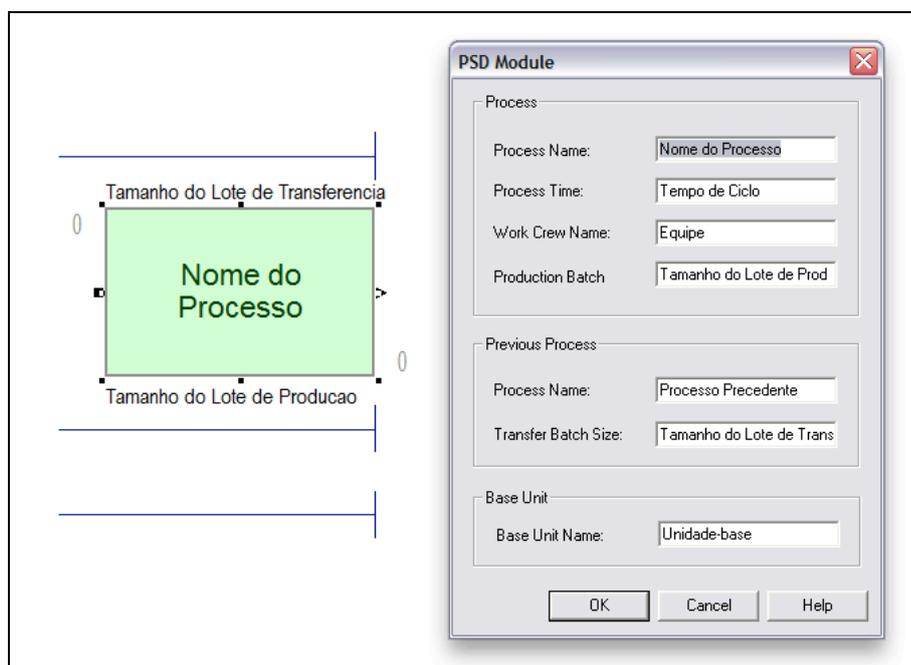


Figura 43: módulo genérico como visualizado no modelo de simulação (e) e a sua interface com o usuário para o ingresso de dados (d)

Desta forma, o módulo genérico de simulação permitiu que, através de onze ações (cliques de *mouse* ou digitação de dados), cada módulo substituísse 85 ações necessárias para modelar um processo na forma tradicional de modelagem. Com exceção dos campos de designação

dos processos correntes, processos precedentes e unidade-base, todos os dados dos demais campos poderiam ser inseridos através da interface com uma planilha eletrônica do MS-Excel®. Desta forma, após a elaboração do modelo, o modelo poderia ser modificado através desta interface, sem necessidade de digitação direta no ambiente do *software* de simulação utilizado. Já os dados coletados no módulo genérico (tempos de início e conclusão do processamento de cada entidade) poderiam ser também escritos diretamente em uma planilha eletrônica. Desta forma, com base neste documento, diversas planilhas ou ferramentas poderiam ser elaboradas: linhas de balanço, gráficos de avanço físico, curvas de agregação de recursos, entre outras.

Após a construção e testes do módulo de simulação genérico, a primeira versão do modelo foi concluída em fevereiro de 2008 e demandou 20 horas para sua consecução. Embora a conclusão do modelo tenha ocorrido tardiamente em relação ao início do empreendimento (outubro de 2007), àquela época a seqüência de execução ainda vinha sofrendo diversos refinamentos por parte da empresa (com informações oriundas da prática de canteiro), no sentido de estabelecer uma seqüência exequível e que considerasse corretamente as interdependências entre processos além de considerações de ordem técnica. Alguns especialistas (como para a alvenaria estrutural, por exemplo) foram consultados para contribuir nesta definição. Estas modificações acarretaram a necessidade de várias atualizações no modelo de simulação até que uma versão definitiva fosse obtida.

Face a estas várias modificações, a equipe de pesquisa optou por reconstruir o modelo (o que demandou 20 horas para sua consecução), de forma a melhor organizá-lo tanto visualmente, como com relação às interfaces com os arquivos de ingresso de dados, uma vez que um dos objetivos era a sua reutilização em outro estudo futuro. A figura 44, abaixo, apresenta o modelo final do empreendimento X1.

É importante salientar que tanto no estudo de caso 1, como em todos os demais estudos que compuseram este trabalho algumas fontes de incerteza não foram modeladas, tais como absenteísmo, quebra de equipamentos e condições adversas do tempo. Esta opção se deu uma vez que os sistemas produtivos modelados tratavam-se de sistemas inexistentes (sendo projetados) e o nível de abstração empregado para tal não justificava o esforço necessário para uma eventual coleta de dados referentes àquelas fontes de incerteza.

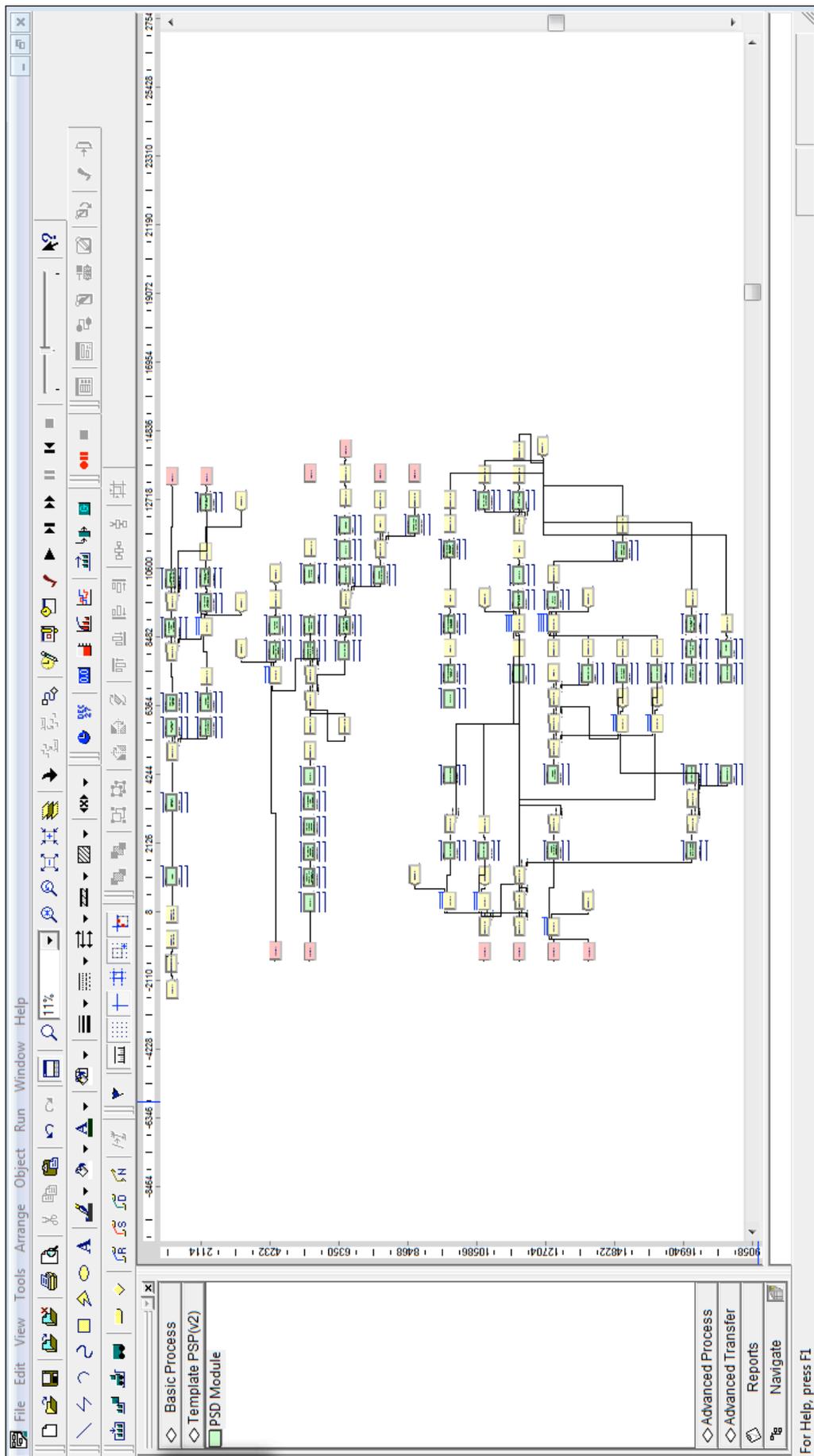


Figura 44: modelo construído para o empreendimento XI

Como anteriormente mencionado, a entrada de dados para configuração do modelo ocorria através de uma planilha eletrônica. Nesta planilha o usuário poderia configurar o tempo de ciclo (optou-se pela utilização da distribuição triangular em função da melhor compreensão da equipe da empresa e facilidade de obtenção destes dados), os tamanhos dos lotes de produção e transferência, além do número de unidades-base e seu agrupamento em blocos ou conjuntos. Esta planilha também simplificava a interface do modelo para o engenheiro de obra, uma vez que seria possível que este ingressasse novos dados ou modificasse dados já inseridos sem a necessidade de conhecimentos específicos sobre o *software* de simulação utilizado⁴⁸. A figura 45 apresenta parte da planilha utilizada para o ingresso de dados.

Bloco	Casa	Radier				
		Mín (dias)	Mod (dias)	Máx (dias)	Lote Prod (casas)	Lote Transf (casas)
M	1	5,00	7,00	10,00	4,00	4,00
	2	5,00	7,00	10,00	4,00	4,00
	3	5,00	7,00	10,00	4,00	4,00
	4	5,00	7,00	10,00	4,00	4,00
N	5	5,00	7,00	10,00	4,00	4,00
	6	5,00	7,00	10,00	4,00	4,00
	7	5,00	7,00	10,00	4,00	4,00
	8	5,00	7,00	10,00	4,00	4,00
O	9	5,00	7,00	10,00	4,00	4,00
	10	5,00	7,00	10,00	4,00	4,00
	11	5,00	7,00	10,00	4,00	4,00
	12	5,00	7,00	10,00	4,00	4,00
Q	13	5,00	7,00	10,00	4,00	4,00
	14	5,00	7,00	10,00	4,00	4,00
	15	5,00	7,00	10,00	4,00	4,00
	16	5,00	7,00	10,00	4,00	4,00

Figura 45: planilha de ingresso de dados no modelo

Uma vez que um dado cenário tivesse sido simulado, os dados coletados no arquivo da planilha eletrônica eram automaticamente formatados e apresentados na forma de uma Linha de Balanço. Este formato foi escolhido pois permitia que o usuário avaliasse os impactos das mudanças propostas em termos dos fluxos de trabalho das diversas equipes de produção, interferências entre estes fluxos, além do nível de atividades de espera do produto (estoque de

⁴⁸ Inicialmente, pretendia-se avaliar se a simplificação da interface do modelo com o usuário leigo através do uso da planilha de ingresso de dados poderia incentivá-lo a lidar com o modelo de simulação sem o apoio do pesquisador. Entretanto, a licença acadêmica do *software* utilizado não permite que seja utilizada uma versão “runtime” do referido *software*, tornando necessária a presença de uma chave de *hardware* para que o modelo seja utilizado.

produto em processo), avaliando ainda os impactos nos prazos parciais e finais do empreendimento.

A vantagem do registro destas informações no formato da Linha de Balanço é que, embora durante o processamento da simulação fosse possível avaliar dinamicamente aspectos relativos à lógica do modelo, não era possível avaliar o comportamento de todos os processos simultaneamente. Assim, a linha de balanço fornecia um registro estático do comportamento do modelo (do ponto de vista dos fluxos do produto e de trabalho) e dos impactos das mudanças propostas de uma forma visual, de forma a facilitar a compreensão pelo usuário.

Uma reunião com a equipe da empresa foi procedida com o intuito de verificar a lógica do modelo construído do ponto de vista das relações de dependência entre os processos, tamanhos dos lotes de produção e transferência, entre outros. Para tanto, além do procedimento de escrutínio do modelo, a linha de balanço originada também foi utilizada para esta verificação. Outra vantagem do registro do comportamento do modelo através da linha de balanço era a possibilidade avaliar o comportamento do modelo em busca de alguma inconsistência. Assim, cada processo foi avaliado pela equipe da empresa, com base nas informações coletadas para sua modelagem. Com base nesta reunião, algumas modificações foram realizadas, no sentido de corrigir algumas imperfeições relatadas.

A figura 46 apresenta parte de uma linha de balanço originada do modelo de simulação do empreendimento. No gráfico, o eixo das abscissas corresponde ao tempo em dias úteis, o eixo das ordenadas corresponde às unidades repetitivas (casa no empreendimento X1). Assim, cada barra corresponde à execução de um dado processo produtivo (caracterizado por uma cor) em uma unidade repetitiva em um determinado momento e com certa duração. Os valores plotados baseiam-se nas médias obtidas a partir de 30 replicações⁴⁹.

⁴⁹ Em todos os estudos, o número de replicações foi estabelecido para um nível de confiança mínimo de 95% e um erro admissível de 10% do valor da média.

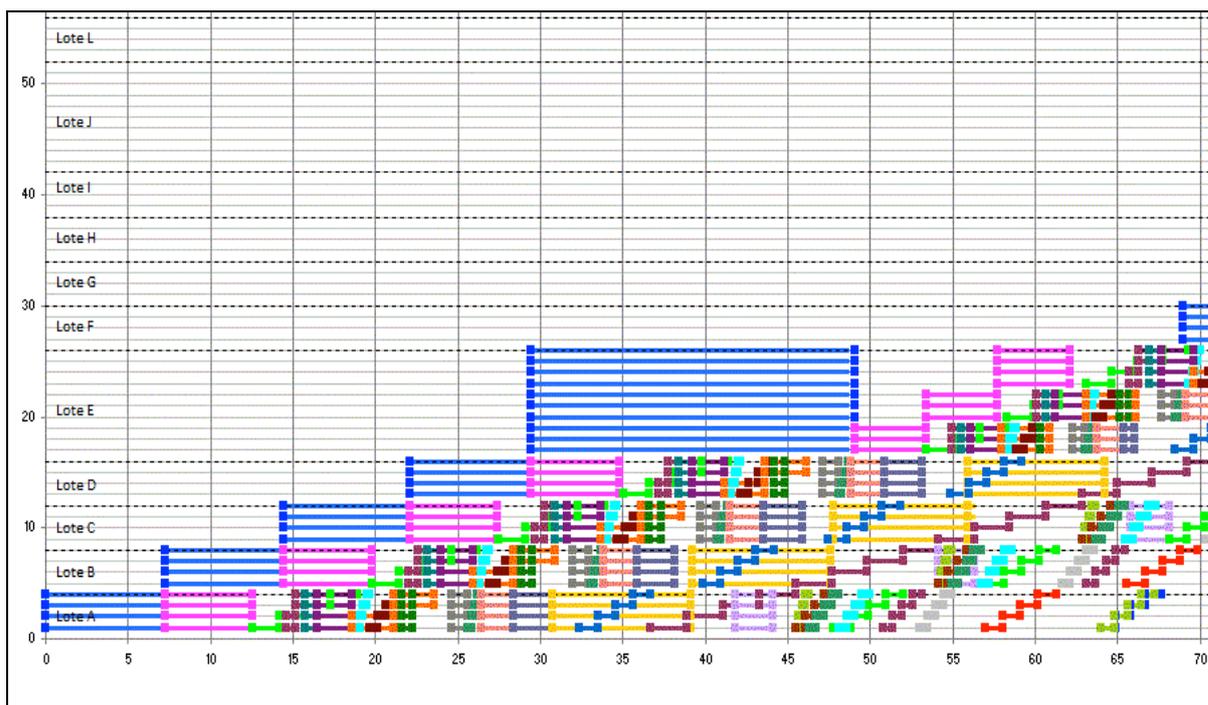


Figura 46: linha de balanço

6.3.2.2 Emprego do Modelo de Simulação do Empreendimento

O foco da análise dos resultados desta primeira utilização do modelo foi o estudo do fluxos de trabalho do empreendimento, bem como os impactos nos prazos de execução de cada bloco frente ao plano de vendas da empresa. Esta análise considerou o pré-dimensionamento dos recursos de produção (em termos do número de equipes de cada especialidade).

Entretanto, a utilização do modelo de simulação no processo de tomada de decisão ocorreu efetivamente a partir de maio de 2008. Naquela época a empresa preparava-se para a execução da segunda fase do empreendimento X1 (composta por 56 casas). A equipe da empresa demonstrou interesse em desenvolver um estudo mais detalhado dos fluxos de trabalho do empreendimento, bem como do dimensionamento dos recursos de produção.

Assim, o modelo anteriormente desenvolvido para abranger todo o empreendimento foi reconfigurado considerando a redução no número de unidades habitacionais, mudanças no plano de ataque desta segunda fase (em comparação à originalmente prevista para todo o empreendimento), bem como algumas novas alterações nas relações de precedência entre os diversos processos, representando mais fielmente a forma como a primeira fase vinha sendo executada. Com base neste modelo, uma nova verificação da linha de balanço originada do modelo foi realizada juntamente com a equipe da empresa.

Ao longo do estudo, houve uma demanda por parte da equipe de produção da empresa para a utilização do modelo. Esta demanda foi motivada por uma indefinição com relação à melhor estratégia de ataque da segunda fase. Enquanto o diretor da empresa era de opinião de que a execução dos *radiers* dos blocos deveria ser executada de forma ininterrupta, desconsiderando o início da execução da alvenaria nos blocos (e assim formando um estoque de *radiers* à frente do início da alvenaria), a equipe de produção da empresa era de opinião que o ritmo de execução dos *radiers* deveria acompanhar o ritmo da elevação da alvenaria, mantendo-se, entretanto, um pequeno estoque de proteção, mas reduzindo a quantidade de trabalho em progresso.

Desta forma, a equipe de produção solicitou a avaliação dos impactos da estratégia de execução ininterrupta de *radiers* frente à sua execução de forma que fosse mantido um pulmão (*buffer*) à frente dos *radiers*. Foram avaliados dois tipos de *buffers*: (a) um *buffer* de dois *radiers*; e (b) um *buffer* de tempo, neste caso cada *radier* seria executado de forma a estar concluído 5 dias antes do início da execução da alvenaria do respectivo bloco de casas. Duas métricas foram utilizadas para avaliar as propostas: (a) o impacto no prazo final do empreendimento; e (b) o impacto financeiro originado em cada cenário.

A fim de apoiar a tomada de decisão, os três cenários foram simulados e, a partir dos dados de saída do modelo, curvas de agregação de recursos (CAR) foram construídas e utilizadas juntamente com as linhas de balanço geradas. A fim de verificar se as diferenças entre as datas de conclusão eram estatisticamente significativas, procedeu-se o teste do intervalo de confiança para a diferença das médias com amostras pareadas. Nesta caso, as datas de conclusão dos três cenários foram comparadas duas a duas. A tabela 02 apresenta um resumo dos valores obtidos para as durações médias do empreendimento nos três cenários simulados.

Tabela 02: duração do empreendimento nos três cenários simulados

Cenário	Duração do Empreendimento (dias úteis)			
	Média	Desvio-Padrão	Intervalo de Confiança (95%)	
			Mínimo	Máximo
01 <i>Buffer</i> de 5 dias	310,2	3,6	303,0	317,4
02 Seqüencial	310,9	2,7	305,5	316,3
03 <i>Buffer</i> de 2 <i>radiers</i>	315,1	2,9	309,3	320,9

Fonte: modelo de simulação

Cabe destacar, entretanto, que os intervalos de confiança obtidos foram úteis apenas para a verificação das significância entre as médias obtidas nos diversos cenários simulados, não sendo possível sua utilização para precisar uma probabilidade de ocorrência de tais valores, uma vez que os dados que deram origem aos modelos basearam-se em durações probabilísticas subjetivamente obtidas junto aos participantes dos respectivos estudos.

Os resultados do modelo apontaram que as diferenças entre o prazo final do empreendimento (em dias úteis) nos cenários 01 e 02 não eram significativas. Já quando comparados os cenários de execução dos *radiers* de forma sequencial e ininterrupta (cenário 02), com prazo médio do empreendimento de aproximadamente 311 dias úteis, e o cenário 03, manutenção de um *buffer* de 2 *radiers* esta média era de aproximadamente 315 dias úteis, estas diferenças eram significativas. Esta diferença pode ser explicada pela manutenção de um *buffer* constante de 2 *radiers*, que implicava a postergação do início da elevação da alvenaria mesmo quando as equipes para sua execução já estavam disponíveis.

Da mesma forma, as diferenças eram significativas quando comparados os cenários 01 e 03. Com relação ao impacto financeiro de cada cenário, a empresa optou por comparar apenas as curvas de gasto. Para tanto, utilizou-se a priorização proposta por Kern (2005), de acordo com a qual através da classificação ABC dos itens do orçamento são determinados os itens que correspondem à aproximadamente 80% dos custo (em geral estes representam 20% dos itens totais). Esses itens foram então considerados para fins de cálculo do gasto, enquanto gastos com mão-de-obra e demais itens (em torno de 80% dos itens totais) foram distribuídos equitativamente ao longo do prazo do empreendimento. Com base neste procedimento, foram geradas curvas de gasto mensal, nas formas cumulativa e não cumulativa. A figura 47 apresenta um gráfico comparativo do gasto não-cumulativo a partir dos cenários simulados.

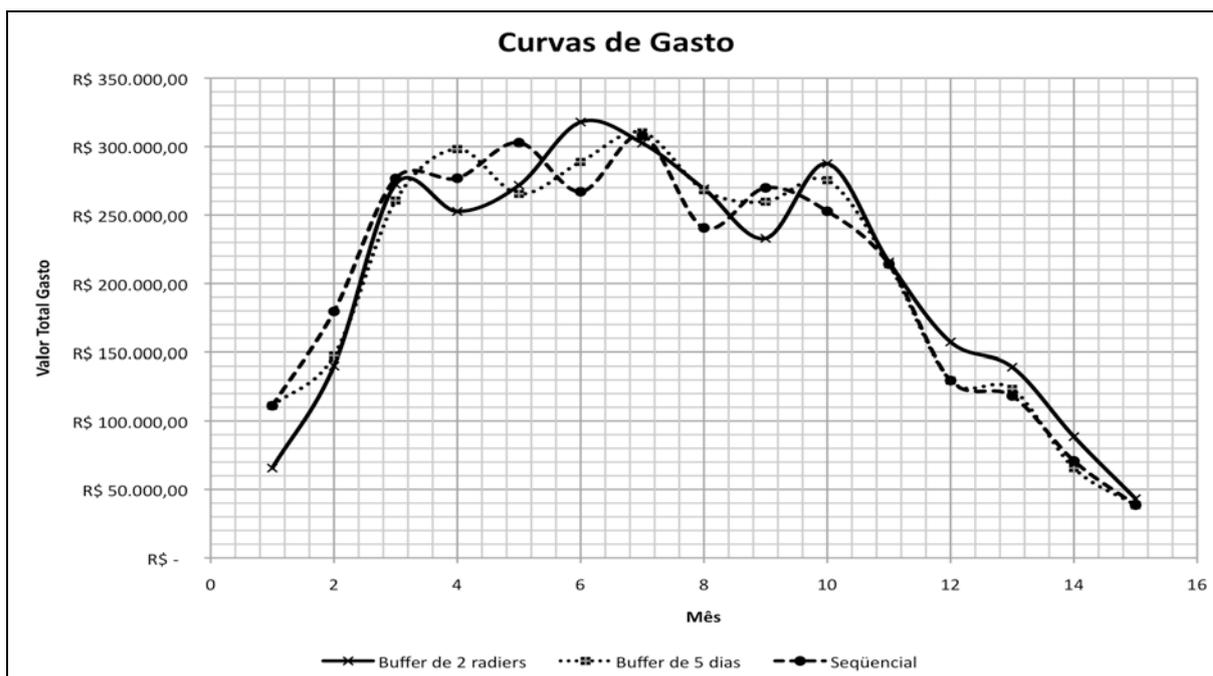


Figura 47: gráfico comparativo do gasto nos cenários simulados

Conforme a análise das curvas geradas, percebeu-se que a estratégia de manutenção de um buffer de 2 *radiers* era a que resultava os menores gastos no primeiro e segundo meses de obra, enquanto que a estratégia seqüencial resultava o maior gasto nos três primeiros meses de obra. Considerando que este último cenário não resultaria na redução efetiva do prazo do empreendimento, as duas opções de postergação do início dos *radiers* poderiam representar uma opção para capitalização da empresa nos primeiros meses da obra (considerando que a receita mensal é a mesma em qualquer uma daquelas situações).

Os resultados foram apresentados em uma reunião, da qual participaram a equipe de produção da empresa, juntamente com o diretor e a responsável pelo setor financeiro, e embasaram as discussões acerca das opções, cabendo a uma avaliação interna a opção por uma ou outra alternativa. Na prática, a empresa optou pela execução e conclusão dos *radiers* antecedendo ao início de cada bloco, de forma similar à estratégia simulada no cenário com *buffer* de 5 dias.

Outras reuniões foram realizadas para utilização da simulação. Neste ponto as discussões passaram a se referir à etapa de dimensionamento dos recursos de produção, prevista no modelo de elaboração do PSP (SCHRAMM, 2004). Nessa etapa, de acordo com o modelo, o pré-dimensionamento da capacidade dos recursos de produção é avaliado e alterações podem ser realizadas em função da necessidade de nivelamento dos recursos, por exemplo.

O foco dessas reuniões foi a tentativa de redução do prazo de conclusão individual dos 10 blocos restantes do empreendimento (adequando-os ao planejamento de vendas da empresa), bem como o prazo final do mesmo. Com base na análise da linha de balanço e dos relatórios gerados pelo modelo de simulação, percebeu-se que havia um grande desbalanceamento na utilização da equipe de eletricitas em relação às demais equipes alocadas. Enquanto a maioria das equipes era responsável pela execução de, no máximo, 03 processos, a equipe de eletricitas executava 09 processos diferentes nas unidades habitacionais, sendo mobilizada⁵⁰ 464 vezes durante todo o empreendimento, enquanto a equipe de execução de forro de banheiro era a (a segunda equipe mais vezes mobilizada (112 vezes). Outro agravante era que as atividades executadas por aquela equipes encontravam-se tanto no início como no final da seqüência construtiva. A figura 48 compara as mobilizações das equipes.

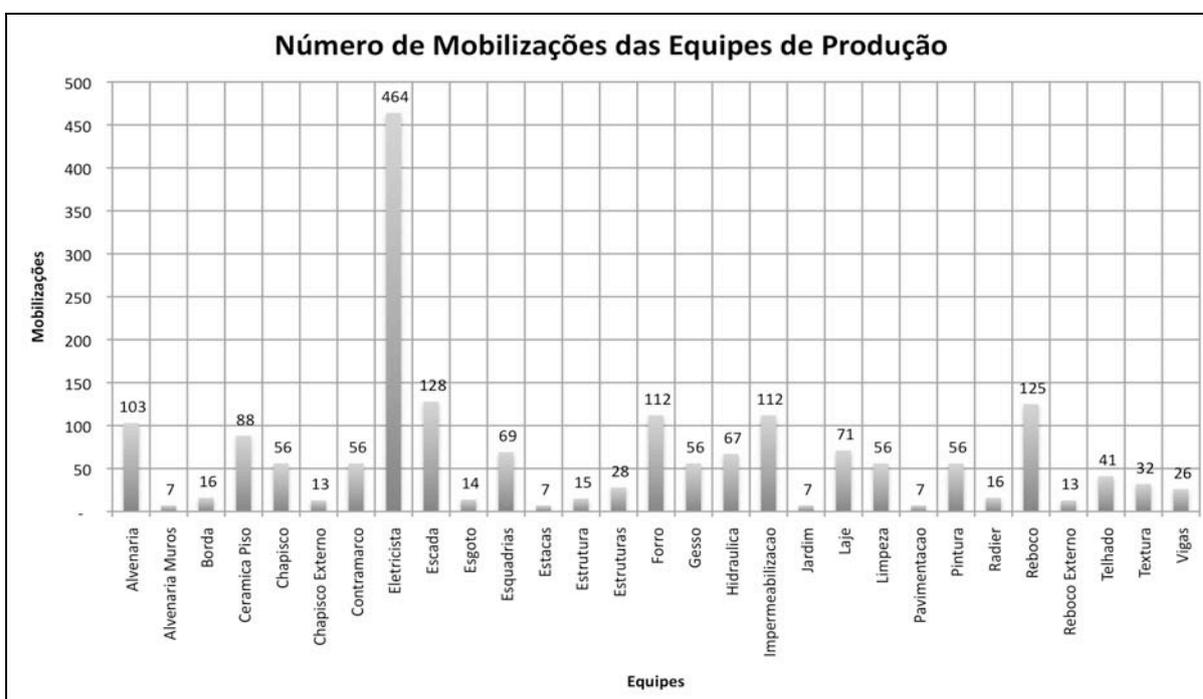


Figura 48: número de mobilizações das diferentes equipes do empreendimento X1

O índice de utilização desta equipe era também o segundo maior de todas as equipes do empreendimento (figura 49), com aproximadamente 60% de utilização (a maior utilização era a da equipe de reboco, com aproximadamente 70%).

⁵⁰ A mobilização de uma equipe de produção significava que a mesma deslocava-se a uma unidade habitacional específica a fim de executar um processo. Quanto maior o número de processos e menor o tamanho dos lotes de produção desses processos, maior a mobilização de uma equipe e, desta forma, maior é a probabilidade de que a mesma possa ser deslocada para a execução de uma unidade habitacional que não é prioritária na estratégia de ataque do empreendimento.

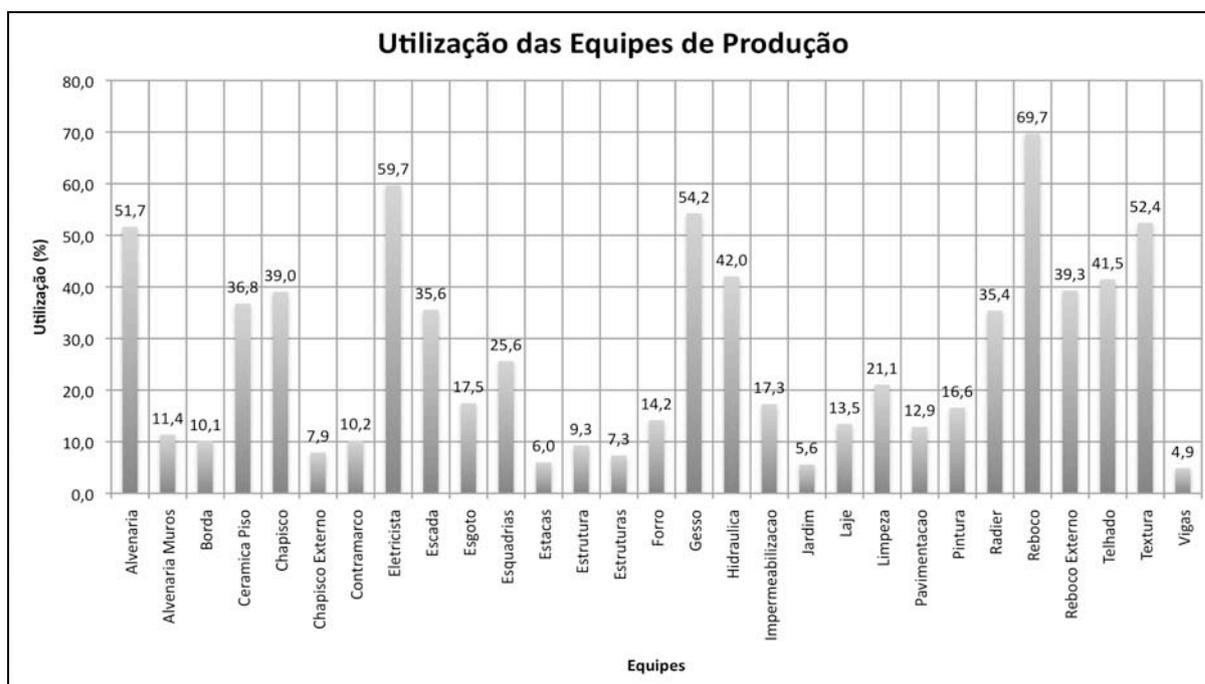


Figura 49: índice de utilização das equipes do empreendimento X1

De acordo com o engenheiro da empresa, este problema vinha sendo enfrentado na execução da primeira fase do empreendimento, corroborando a constatação baseada nos dados do modelo de simulação. Na prática, este desbalanceamento gerava um aumento no trabalho em progresso no empreendimento, representado pela espera dos processos subseqüentes e, em suma, o aumento nos *lead times*, tanto parciais dos blocos como total do empreendimento (conforme tabela 03, a seguir). Além dos dados numéricos, os efeitos do desbalanceamento também puderam ser verificados na análise da linha de balanço. Com base nesta constatação, procedeu-se uma avaliação dos impactos gerados pelo aumento no número de equipes de eletricitas, redistribuindo as atividades entre estas equipes.

Um novo cenário (cenário 02) foi simulado e seus resultados comparados com o cenário original (equipe única de eletricitas). Nesse cenário, o número de equipes foi aumentado para sete (valor escolhido em função do agrupamento das atividade que seriam atribuídos às equipes) e os dados das datas de conclusão médias de cada bloco⁵¹ (em dias úteis) comparados. Esses dados são apresentados na tabela 03, a seguir.

⁵¹ Nos três cenários as datas de início dos blocos são as mesmas.

Tabela 03: datas de conclusão média dos blocos do empreendimento no dois cenários simulados (valores para 30 replicações)

Conjunto	Cenário 01 (1 equipe)		Cenário 02 (7 equipes)	
	Conclusão média	Desvio-padrão	Conclusão média	Desvio-padrão
M	106,1	2,2	101,0	2,1
N	163,2	2,5	130,5	3,9
O	168,0	2,6	144,8	3,6
Q	220,3	2,6	167,9	4,8
R	225,0	2,6	180,4	4,4
S	274,4	3,0	203,9	3,9
T	279,1	3,0	216,8	3,3
U	331,3	2,5	253,6	4,7
V	385,7	2,5	294,6	6,6
P	444,2	3,4	328,4	4,8

Fonte: modelo de simulação

Os resultados do teste do intervalo de confiança para a diferença das médias com amostras pareadas indicam que as diferenças entre as médias dos dois cenários eram significativas e que o aumento no número de equipes de eletricitas de uma para sete possibilitaria uma redução de aproximadamente 115 dias úteis na média do *lead time* total do empreendimento (-25,9%), bem como uma redução nas datas de conclusão individuais dos blocos, possibilitando sua conclusão antecipada em relação ao cenário original (com uma única equipe de eletricitas).

A análise destes resultados suscitou uma discussão bastante interessante entre a equipe de pesquisa e a equipe da empresa. O impacto da redução dos *lead times* dos blocos e do empreendimento a partir do aumento seletivo de capacidade de uma equipe dentre as demais foi demonstrada através da análise da linha de balanço gerada pelo modelo. Como comentado pelo engenheiro de obra, o emprego de uma única equipe de eletricitas em vários processos ao longo da seqüência de execução da unidade-base vinha acarretando o deslocamento desta equipe para execução de unidades que não eram prioridade na estratégia de ataque do empreendimento. No caso, as equipes priorizavam que seu fluxo de trabalho não sofressem interrupções em detrimento da obediência ao plano de ataque planejado. Desta forma, enquanto uma casa aguardava o início de um processo executado pela equipe, esta mesma equipe poderia estar executando outra unidade em um outro bloco de casas que seriam entregues posteriormente (não prioritárias na seqüência de ataque). A mesma situação pode ser visualizada na linha de balanço.

Com base nessa discussão, a necessidade de priorização das atividades na seqüência de execução da unidade-base e das unidades-base de acordo com a estratégia de ataque do empreendimento foram enfatizadas. A alocação de um maior número de equipes para os processos que envolviam os eletricitistas pôs em discussão o sistema de contratação de mão-de-obra, uma vez que a alocação de para a execução de atividades exclusivas mostrava-se mais adequada. O impacto, em termos de prazo final, bem como a visualização dos períodos em que as unidades habitacionais permaneciam esperando a disponibilidade dos recursos (através da linha de balanço), tornaram estas necessidades mais transparentes.

6.3.3 Avaliação do Estudo de Caso 1

Conforme apresentado, o processo de elaboração do PSP foi avaliada com base em dois constructos principais: utilidade e facilidade de uso, que foram posteriormente desdobrados em subconstructos. Desta forma, nesta secção o estudo é avaliado no que concerne a cada um desses constructos e subconstructos.

6.3.3.1 Utilidade

No que diz respeito à **contribuição do PSP para a percepção da necessidade de tomada de decisão de forma conectada**, o processo de elaboração do PSP contribuiu para que os participantes percebessem a necessidade de tomar decisões de forma conectada. Isto pode ser percebido a partir de duas evidências. A primeira, foi a necessidade de envolver os principais subempreiteiros e fornecedores no processo, a fim de discutir e avaliar a exequibilidade de algumas decisões tomadas.

Para a definição da seqüência de execução da unidade-base, a proposta inicial elaborada pela equipe de gestão da empresa foi posteriormente discutida e revisada com os subempreiteiros de obra civil, instalações elétrica e hidráulica, aplicação de gesso e pintura, além do fornecedor de lajes pré-fabricadas. Os subempreiteiros contribuíram com as definições relativas à precedência das atividades, ao dimensionamento das equipes de produção, ao dimensionamento dos lotes de produção e transferência e dos tempos de ciclo.

No caso específico do fornecedor de lajes pré-fabricadas, sua participação foi necessária para viabilizar a estratégia de ataque dos conjuntos de casas, uma vez que esta decisão estava

diretamente relacionada à quantidade, tipos e periodicidade com que as lajes deveriam ser entregues no canteiro.

A segunda evidência, foi a necessidade de também envolver outros setores da empresa nas discussões, em função da implementação da abordagem de customização das unidades habitacionais. Para tanto, houve a necessidade de discussões entre a responsável pelo desenvolvimento do projeto e os responsáveis pela gestão da produção envolvendo, posteriormente, o setor de suprimentos da empresa. Um aspecto bastante marcante dessas reuniões disse respeito às discussões sobre os impactos negativos que a abordagem de customização – como até então realizada pela empresa – vinha causando no processo produtivo (conforme apresentado anteriormente). Assim, houve a necessidade de diversas iterações entre as áreas de projeto e produção, até que um consenso fosse atingido e uma nova estratégia de customização definida.

Já o surgimento de algumas demandas, por parte da equipe da empresa, para a avaliação dos impactos de decisões isoladas no sistema de produção como um todo, notadamente a avaliação, em termos dos impactos nos gastos e no prazo do empreendimento, de estratégias alternativas de execução do processo de *radiers*, bem como da utilização dos resultados desse estudo nas discussões envolvendo a equipe de produção e a diretoria da empresa (cujas opiniões eram divergentes), também corroborou para evidenciar a percepção da necessidade de tomada de decisão conectada.

Já quanto à **utilização do PSP como referência na tomada de decisão na gestão do empreendimento**, com base na análise dos planos de longo e de curto prazo, na observação direta do canteiro de obras e nas entrevistas realizadas com membros da equipe de produção da empresa, pode-se afirmar que as decisões oriundas do PSP foram implementadas de forma parcial na fase de execução do empreendimento.

Houve um engajamento por parte do engenheiro de produção em comunicar a seqüência de execução padronizada da unidade-base do empreendimento, através de reuniões com o mestre-de-obras e o técnico em edificações da empresa, responsáveis pela gestão no canteiro de obras. Entretanto, percebeu-se pouco ênfase em um controle mais estrito do fluxo de trabalho da equipes de produção, no sentido de garantir que as mesmas executassem seus processos de forma a concluí-los e executá-los com qualidade para que fosse seguido o plano de ataque do empreendimento. Nesse sentido, algumas discussões foram realizadas sobre a

necessidade de controle do número de operários em cada equipe, a fim de tentar alcançar os tempos de ciclo propostos, e as datas de entrega de trabalho entre um processo e outro por parte da equipe de gestão na obra (através do uso de *checklists*, por exemplo). A análise dos planos de curto prazo indicou que muitos pacotes de trabalho planejados não continham informações sobre as equipes responsáveis, limitando-se a registrar o subempreiteiro responsável, nem o período planejado para sua execução. Esta omissão acabava contribuindo para que não fosse enfatizado este tipo de controle.

Como anteriormente descrito, tanto os resultados dos estudos da estratégia de ataque dos *radiers* como o de dimensionamento das equipes de eletricitas foram efetivamente empregados durante a fase de execução. De acordo com o plano de curto prazo e com o engenheiro de obra, optou-se por executar os *radiers* de forma a concluí-los um pouco antes do início da execução da alvenaria dos blocos. Já com relação ao número de equipes de eletricitas, houve a contratação de uma equipe extra para complementar o efetivo em obra, uma vez que o número de equipes disponíveis vinha acarretando interrupções no fluxos de trabalho dos processos posteriores, como avaliado com o uso da simulação.

Com relação à **contribuição para a sistematização do processo de tomada de decisão**, de uma forma geral, a elaboração do PSP do empreendimento seguiu as etapas preconizadas no modelo de elaboração (SCHRAMM, 2004). Das seis etapas propostas, apenas a etapa de identificação e projeto de processos críticos não foi executada, uma vez que o estudo foi concluído durante a fase de execução e todos os processos já haviam sido iniciados.

Cabe destacar que a algumas etapas foi dispensado uma maior atenção para o seu desenvolvimento. Esta atenção refletiu-se no tempo demandado para sua consecução e no número de reuniões dedicadas à sua discussão (o esforço para a realização do PSP será discutido na análise do constructo facilidade de uso).

A definição da seqüência de execução da unidade-base, bem como o pré-dimensionamento das capacidades dos recursos de produção receberam especial atenção por parte da equipe da empresa. Em primeiro lugar, havia consenso de que a definição de uma seqüência de execução padronizada para os empreendimentos daquele nicho de mercado seria benéfica, uma vez que a mesma tipologia era utilizada em outros empreendimentos da empresa. Além disto, essa definição era fundamental para viabilizar a estratégia de customização que a empresa queria adotar.

Em segundo lugar, esta decisão representava uma informação de entrada para o estudo dos fluxos de trabalho na unidade-base e no empreendimento (etapas seguintes previstas no modelo de elaboração). Em especial, uma vez que se utilizaria a simulação para apoio nesta última decisão, mudanças na seqüência de execução impactariam diretamente no tempo de desenvolvimento do modelo (reduzindo a necessidade de retrabalho).

Desta forma, esta etapa efetivamente formalizou uma decisão que, embora outros empreendimentos similares já tinham sido executados, a seqüência de execução não havia sido discutida ou formalizada com vistas à sua análise e melhoria.

A atenção dispensada a esta decisão, gerou uma seqüência de execução bastante detalhada, com considerações sobre relação de precedência entre atividades, além das outras informações incluídas na ferramenta gerada para sua representação. Este detalhamento, se positivo por um lado, acabou acarretando diversas revisões do documento, a partir da avaliação feita pelo engenheiro e pelo técnico em edificações fora das reuniões do estudo. Esses ajustes freqüentes demandaram um tempo relativamente longo a esta etapa, bem como ao desenvolvimento do modelo de simulação.

A etapa de estudo dos fluxos de trabalho do empreendimento, acabou sendo desenvolvida em conjunção com a etapa anterior, uma vez que a definição dos lotes de produção e transferência dependiam, de certa forma, dos impactos desses nos fluxos de trabalho. O foco, nesse caso, recaiu sobre alguns processos em particular (como elevação de alvenaria e montagem de lajes).

A definição das estratégias ataque do empreendimento resumiu-se a formalizar uma decisão que já havia sido tomada pela direção da empresa juntamente com o engenheiro de obra. Esta decisão, na empresa Y, era tomada antes da etapa de comercialização do empreendimento e definia quais blocos de casas seriam entregues primeiro e como os blocos restantes deveriam ser entregues.

O estudo dos fluxos de trabalho no empreendimento foi realizado utilizando o modelo de simulação como principal ferramenta. Esse estudo foi viabilizado, uma vez que uma das formas de representar as saídas do modelo era uma linha de balanço utilizada durante as discussões. Como já discutido, em função do longo tempo de desenvolvimento das fases anteriores, seu emprego resumiu-se à segunda fase do empreendimento. Além de discutidas

durante as reuniões, as linhas de balanço geradas eram analisadas pelo engenheiro de obra em outro momentos.

A etapa de dimensionamento dos recursos de produção foi realizada em conjunção com o estudo dos fluxos de trabalho, a partir do modelo de simulação. Basicamente, foram analisados impactos do aumento de algumas equipes ou redistribuição das atividades entre equipes e seus impactos nos fluxos de trabalho e nos prazos do empreendimento.

Ao longo do estudo, percebeu-se que havia um engajamento da equipe da empresa na consecução das demandas surgidas ao longo das discussões como, por exemplo, a obtenção de informações junto a fornecedores e à própria obra, definições de decisões pendentes.

Durante o desenvolvimento do estudo, alguns conceitos relacionados à gestão da produção foram discutidos. Durante as discussões acerca da implementação da abordagem de customização, as vantagens da flexibilidade de produto⁵² foi introduzida.

A utilização da linha de balanço permitiu a visualização dos conceitos de lote de produção e lote de transferência, conceitos fundamentais para a modelagem dos processos produtivos para a simulação. Diferentes combinações entre tamanhos de lotes de produção e transferência foram testados ao longo das reuniões e seus efeitos percebidos pela equipe. A possibilidade de redução nos *lead times* de produção a partir da redução dos tamanhos dos lotes também foram discutidas ao longo do processo.

Concomitantemente, a diferença entre os fluxos de trabalho e o fluxo do produto ou, conforme Shingo (1996) em seu “Mecanismo da Função Produção”, entre operações e processos, também foram evidenciadas a partir do uso da linha de balanço. Nesse sentido, percebeu-se que havia um esforço para permitir aos recursos produtivos a manutenção de um fluxo ininterrupto de trabalho, em detrimento da manutenção de um fluxo contínuo do produto (unidades habitacionais). Desta forma, a necessidade de balanceamento das atividades como forma de obtenção de uma situação de equilíbrio entre fluxos de trabalho ininterruptos e fluxo contínuo de produto foi também discutida.

Outro aspecto bastante importante disse respeito a ênfase dada à necessidade de terminação⁵³ dos processos produtivos. Uma vez que o PSP introduz a noção de controle por unidade-base

⁵² Segundo Slack *et al.* (1997), flexibilidade de produto é a habilidade de introduzir novos produtos ou de realizar modificações nos existentes.

(uma unidade discreta) e não por percentual executado (como tradicionalmente adotado na construção), torna-se fundamental que terminação de um processo seja controlada. Esta por sua vez, diz respeito não só a conclusão de todas as atividades previstas, como também que as mesmas seja executadas obedecendo ao requisitos de qualidade.

Por fim, quanto à **contribuição do emprego da simulação para o processo de tomada de decisão**, como discutido anteriormente neste trabalho, a utilização da simulação ocorreu principalmente nas etapas finais da elaboração do PSP. Durante este estudo houve a solicitações por parte da equipe da empresa, no sentido de gerar algumas simulações de cenários de diferentes estratégias de ataque da execução dos *radiers* foi uma solicitação da equipe de obra, como forma de embasar as discussões com o diretor da empresa.

Ao todo, neste estudo, foram simulados cinco cenários, sendo três no estudo relativo à estratégia de ataque do processo de *radiers* e dois considerando números diferentes de equipes de eletricitas. Este número de cenários, relativamente baixo frente a possíveis oportunidades, deveu-se por dois motivos: (a) esta era a primeira experiência de implementação da simulação no PSP por parte o pesquisador e da empresa; e (b) o longo tempo de desenvolvimento do estudo que fez com que o estudo se estendesse ao longo da fase de execução.

Os cenários simulados tiveram como foco a avaliação de opções de programação detalhada da obra , verificando seu impactos em termos de *lead times* dos blocos e do empreendimento. Entretanto, seus resultados contribuíram para o dimensionamento da capacidade dos recursos.

Com base na análise dos planos de curto prazo e nas informações da equipe de produção (conforme discutido no item 6.2.4.1.2), algumas decisões tomadas (como a estratégia de ataque dos *radiers* e a contratação de uma equipe extra de eletricitas) tiveram como base informações oriundas do emprego da simulação durante o processo de elaboração do PSP.

6.3.3.2 Facilidade de Uso

Com relação à **iniciativa dos participantes no processo de modelagem**, o desenvolvimento do modelo de simulação neste estudo foi totalmente conduzido pela equipe de pesquisa. O escopo do modelo foi definido com base nos processos que faziam parte da seqüência de

⁵³ Preferiu-se utilizar o termo “terminação” ao invés de “terminalidade” por este último tratar-se de um neologismo ainda não consolidado. Neste caso, terminação, de acordo com Holanda (2004) refere-se ao ato de terminar, concluir; dar fim.

execução da unidade-base desenvolvida no início do processo. Com base neste modelo, por solicitação da equipe de obra, foram simulados os três cenários para a execução dos *radiers*.

Já no que diz respeito à **extensão do processo de elaboração**, o tempo despendido para a elaboração do PSP foi bastante superior aos dos estudos que originaram o modelo de elaboração, bem como aqueles realizados por Rodrigues (2006). No caso do estudo de caso 1, foram despendidas 52 horas às reuniões realizadas e 116 horas relacionadas à preparação do processo, incluindo o desenvolvimento do modelo de simulação.

Conforme os dados apresentados na figura 32, as etapas executadas demandaram muito mais tempo para seu desenvolvimento do que os estudos de caso que deram origem ao referido modelo (naquele caso, prescreveu-se um esforço de aproximadamente 08 a 12 horas de reuniões e 12 horas para desenvolvimento de ferramentas). A maioria do tempo despendido para a elaboração do PSP concentrou-se na definição da seqüência de execução da unidade-base e no pré-dimensionamento dos recursos de produção e, posteriormente, nos estudos dos fluxos de trabalho no empreendimento.

O aumento no tempo de desenvolvimento do PSP e sua concentração naquelas duas etapas aconteceu por que a empresa estava especialmente interessada na padronização da seqüência de execução da unidade-base do empreendimento, tendo em vista a utilização daquela unidade-base em outros empreendimentos futuros e a definição de uma seqüência de execução padronizada era fundamental para a modelagem do sistema de produção do empreendimento, como base para o desenvolvimento do modelo de simulação. Além disso, a customização das unidades-base dependia e influenciava tal definição e

A extensão do processo causou a impossibilidade de empregos das decisões do PSP de forma integrada ainda no início da fase de execução do empreendimento, sendo possível sua conclusão apenas para sua segunda fase. Desta forma, uma das propostas do PSP, a de antecipar decisões sobre a estruturação do sistema de produção do empreendimento, não foi alcançada. Entretanto, algumas decisões tomadas ao longo do processo vieram a ser empregadas na segunda fase da obra (no caso a mudança da estratégia de ataque dos *radiers* e aumento no número de equipes e eletricitas). Para tanto, houve a necessidade de adequá-lo.

Em função de ter sido a primeira implementação da simulação, bem como em função das diversas alterações propostas pela equipe da empresa na seqüência de execução da unidade-base do empreendimento, o desenvolvimento do modelo de simulação despendeu ao todo 60

horas para seu desenvolvimento (a equipe de pesquisa decidiu por refazer o modelo como forma de melhor organizá-lo em função das diversas mudanças solicitadas). Contudo, havia uma perspectiva de redução deste tempo, a partir da sua reutilização no empreendimento seguinte.

Outro aspecto que contribuiu para aumentar a extensão do estudo deve-se ao nível de detalhamento empregado. A seqüência de execução da unidade-base do empreendimento (que gerou o modelo de simulação e, conseqüentemente, o estudo dos fluxos de trabalho no empreendimento), consistia de 52 processos (mais 10 processos na etapa de customização pós-venda que não faziam parte do modelo de simulação). Desta forma, houve um aumento da complexidade do sistema de produção sendo modelado e o respectivo aumento no tempo necessário para sua consecução.

Por fim, quanto à **contribuição para a comunicação e entendimento das decisões entre os participantes**, as ferramentas geradas ao longo do PSP foram efetivamente utilizadas nas discussões durante as reuniões de desenvolvimento do estudo. A principal ferramenta desenvolvida no estudo foi o diagrama de seqüência de execução da unidade-base do empreendimento. Esta ferramenta foi amplamente utilizada nas reuniões, não envolvendo apenas os membros da empresa, mas também na discussões com subempreiteiros e fornecedores. Esta ferramenta foi, conforme apresentado anteriormente, utilizada no canteiro de obras como referência.

Já a linha de balanço originada pelo modelo de simulação foi uma tentativa de tornar as saídas do modelo mais facilmente compreensíveis para a equipe da empresa. Uma avaliação do seu uso durante as reuniões permite dizer que seu objetivo foi parcialmente alcançado, uma vez que a ferramenta ficou restrita às reuniões entre as equipes de pesquisa e da empresa, não sendo utilizada para comunicação com participantes externos a essas equipes. Essa dificuldade reside no tipo de representação obtida, bem como ao nível de detalhamento utilizado, que geravam uma ferramenta de difícil compreensão rápida, dependendo de uma avaliação mais demorada para seu entendimento.

Entretanto, para a equipe da empresa a ferramenta permitiu alcançar seus objetivos, uma vez que era utilizada durante as reuniões junto com a equipe de pesquisa. Alguns filtros foram utilizados a fim de reduzir o número de processos representados e tornar as discussões mais

focadas. Cabe ressaltar que o engenheiro de obra utilizou ferramenta em avaliações fora das reuniões, trazendo dúvidas e sugestões para discussão.

6.4 ESTUDO DE CASO 2

6.4.1 Elaboração do PSP do empreendimento

Conforme apresentado, o segundo estudo de caso foi desenvolvido no empreendimento X2, também da empresa X. Foi iniciado aproximadamente 45 dias antes do início previsto da fase de execução (janeiro de 2009). Posteriormente, a empresa decidiu adiar o início da obra para abril de 2009, em virtude de atrasos decorrentes da aprovação do licenciamento do projeto junto aos órgãos ambientais.

Ao todo, foram realizadas durante o desenvolvimento do estudo 15 reuniões, que se estendeu por seis meses. Estas reuniões tinham em média 2 horas de duração, perfazendo um total de aproximadamente 30 horas despendidas em reuniões. Além das reuniões, foram despendidas pela equipe de pesquisa cerca de 32 horas para preparação das reuniões, elaboração de ferramentas e adaptação do modelo de simulação empregado no estudo. A figura 50, a seguir, apresenta um resumo do esforço despendido em horas em cada uma das etapas do processo de elaboração do PSP, seus participantes, bem como no desenvolvimento de ferramentas e modelos de simulação, além dos envolvidos em cada etapa. Das etapas propostas no modelo de elaboração do PSP algumas não foram executadas: o estudo dos fluxos de trabalho na unidade-base e a identificação e projeto de processos críticos.

Etapa do PSP	Participantes	Número de Reuniões/ Carga horária	Preparação e Apoio ao Processo	Período de Execução
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Definição da Seqüência de Execução da Unidade-base 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Engenheiro de Obra ▪ Responsável pelo Planejamento 	02 reuniões (04 horas)	06 horas	Dezembro/08 a Janeiro/09
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pré-dimensionamento da Capacidade dos Recursos de Produção 				
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estudo dos Fluxos de Trabalho na Unidade-base 	Não realizado			
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Definição da Estratégia de Ataque do Empreendimento 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Engenheiro de Obra ▪ Responsável pelo Planejamento 	01 reunião (02 horas)	02 horas	Dezembro/08
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estudo dos Fluxos de Trabalho no Empreendimento 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Engenheiro de Obra ▪ Responsável pelo Planejamento 	08 reuniões (16 horas)	24 horas	Janeiro/09 a Março/09
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dimensionamento da Capacidade dos Recursos de Produção 				
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Identificação e Projeto de Processos Críticos 	Não realizado			
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Desenvolvimento e Validação do Modelo de Simulação 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Engenheiro de Obra ▪ Responsável pelo Planejamento 		06 horas	janeiro/09

Figura 50: esforço despendido na elaboração do PSP no empreendimento X2

Além das onze reuniões de desenvolvimento do PSP, foram realizadas mais quatro reuniões de discussão e apresentação de ferramentas de controle de execução.

6.4.2 DESCRIÇÃO DETALHADA DAS ATIVIDADES REALIZADAS

A primeira etapa do processo de elaboração do PSP do empreendimento foi a discussão acerca da seqüência de execução da unidade-base. Com base na seqüência anteriormente

discutida para o empreendimento X1, foram realizadas apenas algumas adequações, em função da experiência adquirida na execução daquele empreendimento. Para tanto, foram realizadas duas reuniões nas quais participaram o engenheiro da obra, a arquiteta responsável pelo planejamento e controle da produção e pelo sistema de qualidade, mestre-de-obras e técnico em edificações.

As principais mudanças solicitadas na seqüência de execução disseram respeito: (a) à relação de precedência entre algumas atividades; (b) à readequação dos tempos de ciclo dos processos em função da redução de área das casas com dois dormitórios; e (c) a mudanças nas composições das equipes. Estas solicitações foram utilizadas para a redefinição do diagrama de seqüência de execução da unidade-base, que foi reapresentado para análise e aprovação pelos participantes, e, posteriormente, para atualização do modelo de simulação (que foi realizada em 06 horas de trabalho). Foram realizadas discussões sobre a estratégia de ataque do empreendimento. Essa decisão já havia sido tomada pela empresa, a partir do plano de vendas e da necessidade de inclusão na primeira entrega de unidades das áreas de uso comum (salão de festas, piscina, *playground*, cancha de bocha e guaritas). A seqüência definida para a execução dos blocos (dividida em 13 etapas) é apresentada na figura 51.

Fase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Blocos	ABC	JL	M	G	D	O	N	H	P	Q	I	F	E

Figura 51: seqüência de execução dos blocos do empreendimento X2

É importante salientar que a definição das datas de início e término dos blocos não levou em consideração uma avaliação mais pormenorizada a capacidade do sistema de produção em atendê-las, nem priorizava a manutenção das equipes de produção mobilizadas no canteiro de obras. Durante o estudo, algumas dessas datas foram consideradas inexeqüíveis frente as esses aspectos e sua revisão sugerida pela equipe de produção da empresa.

Neste estudo buscou-se avaliar a possibilidade de reutilização do modelo de simulação construído para o empreendimento X1. No total, todas as alterações foram realizadas em 06 horas de trabalho, a partir das quais o modelo estava totalmente adequado às características do empreendimento X2. Foram realizados dois tipos de adaptação no modelo de forma a permitir seu emprego no empreendimento sob estudo: (a) mudanças na rede de precedência: referem-se a mudanças em algumas relações de precedência entre processos, bem como nas equipes

alocadas para a sua execução; e (b) mudanças nas planilhas de entrada e saída de dados: foi alterado o número de unidades repetitivas (68 no empreendimento X2 contra 112 – depois 56 – no empreendimento X1). Também foram alterados os tempos de ciclo e tamanhos dos lotes de produção e transferência dos processos, bem como tempos de início de cada bloco.

A primeira reunião de discussão dos resultados da simulação aconteceu no início do mês de fevereiro de 2009, já que houve uma interrupção do estudo entre o final de dezembro de 2008 e o final de janeiro de 2009 em função do período de férias da equipe da empresa. Nessa reunião foram apresentados os resultados de um cenário-base que caracterizava-se por: (a) execução dos *radiers* de forma seqüencial e ininterrupta; (b) execução de todos os processos de elevação de alvenarias por uma única equipe (térreo e segundo pavimentos, oitões, muretas nos *boxes* dos banheiros e muros); (c) execução das alvenarias dos pavimentos seguindo uma seqüência de dois conjuntos térreos e dois conjuntos de segundos pavimentos (montagem de lajes executadas no intervalo entre a execução da alvenarias no primeiro e no segundo bloco); e (d) equipe única de eletricitas.

A análise dos resultados foi realizada utilizando principalmente a linha de balanço gerada com os resultados do modelo, a partir da análise dos fluxos de trabalho das equipes dos processos considerados críticos (*radiers*, alvenarias, cobertura, reboco interno e externo, gesso corrido, pintura interna e externa, entre outros), bem como pela comparação dos *lead times* de execução de cada bloco e final do empreendimento com aqueles inicialmente previstos pela empresa. Na prática, entretanto, o *lead time* de conclusão da fase 1 – blocos A, B e C – foi utilizado para a avaliação da exeqüibilidade de cada cenário simulado, uma vez que era o único prazo que já havia sido informado aos clientes, enquanto os demais poderiam ser reavaliados com base nos resultados do modelo.

Desta forma, este cenário resultou em um *lead time* médio de execução da fase 1 (baseado em 30 replicações) de 216 dias úteis, enquanto o *lead time* médio final para execução do empreendimento era de 660 dias úteis. Estes *lead times* estavam bastante além dos valores previstos inicialmente pela empresa que eram de 156 e 451 dias úteis, respectivamente, ou seja, ultrapassavam em aproximadamente três meses o prazo de conclusão da fase 01 e em nove meses e meio o prazo final do empreendimento (considerando 22 dias úteis por mês). Novamente, assim como no empreendimento X1, verificou-se que estes *lead times* eram função da espera das casas até a disponibilidade da equipe de eletricitas. A falta de disponibilidade desta equipe devia-se ao fato de que esta estava indisponíveis executando

outras casas fora da seqüencia de execução prioritária). Assim, outros dois cenários foram simulados: o primeiro com 07 equipes e o segundo com 03 equipes de eletricitista. A tabela 04 apresenta uma comparação entre os dois novos cenários e o cenário-base, no que diz respeito aos *lead times* médios de conclusão da fase 01 e final do empreendimento (valores baseados em 30 replicações).

Tabela 04: lead times parciais e total do empreendimento X2 nos três cenários simulados

Resultados	Planejamen to de vendas da empresa	Cenário					
		01		02		03	
		01 eq. eletricitista	03 eq. eletricitistas	07 eq. eletricitistas	Média	Desvio-padrão	Média
Fase 01 (Blocos ABC)	156	215,7	5,7	175,7	2,2	176,0	2,6
Empreendimento	451	660,2	6,2	442,7	9,5	409,0	3,4

Fonte: modelo de simulação

Com base nestes dados, percebeu-se que o emprego de 07 equipes de eletricitistas permitiria uma redução de 40 dias úteis (aproximadamente 2 meses) no *lead time* médio da fase 01 e de 251 dias úteis (aproximadamente 11 meses) no *lead time* médio total do empreendimento. Entretanto, se fossem utilizadas 03 equipes, a redução do *lead time* total médio seria de aproximadamente 217 dias úteis e o mesmo *lead time* total médio do cenário com 07 equipes. Assim, a equipe de produção optou por adotar esta última alternativa (cenário 02).

Com base no teste do intervalo confiança para a diferença das médias com amostras pareadas as diferenças entre as médias dos três cenários eram significativas para os *lead times* médios totais e para os *lead times* da fase 01 (neste último com exceção dos valores para os cenários 02 e 03). Procedeu-se uma análise dos processos alocados às equipes de eletricitistas. Baseado nesta análise, o engenheiro da empresa solicitou que fosse realizada a realocação de atividades a estas equipes, em função da natureza de cada processo (obra bruta ou atividades de acabamento). Assim, a figura 52 apresenta um comparativo entre as alocações de atividades às três equipes de eletricitistas.

Equipes eletricitas	Alocação inicial	Alocação final
Equipe 01	- Eletrodutos e corte de caixas térreo - Colocação caixas elétricas superior - Interruptores e tomadas	- Eletrodutos e corte de caixas térreo - Eletrodutos e corte de caixas superior - Interligações lajes instalações térreo - Interligações lajes instalações superior
Equipe 02	- Interligações lajes instalações térreo - Interligações lajes instalações superior - Eletrodutos e corte de caixas superior - Enfição elétrica	- Painel elétrico - Colocação caixas elétricas superior - Colocação caixas elétricas e CD térreo
Equipe 03	- Colocação caixas elétricas e CD térreo - Painel elétrico - Cabeamento	- Interruptores e tomadas - Cabeamento - Enfição elétrica

Figura 52: alocação de atividades às equipes de eletricitas

Outra alteração solicitada diz respeito ao detalhamento das atividades que compunham o processo de execução de *radiers*. De acordo com o engenheiro, baseado na experiência de empreendimentos passados, a execução de *radiers* envolvia o compartilhamento de equipes com outros processos de construção. Desta forma, o mesmo tinha interesse em avaliar os impactos deste compartilhamento na disponibilidade das equipes e no prazo do empreendimento, bem como avaliar como diferentes estratégias de execução dos *radiers* impactavam no *lead time* do empreendimento. Assim, foram coletados dados para a caracterização das atividades componentes do processo de execução de *radiers*, a fim de atualizar o modelo de simulação. Com base nesses dados, o diagrama de seqüência de execução das unidades-base do empreendimento também foi atualizado, conforme apresentado na figura 53, a seguir.

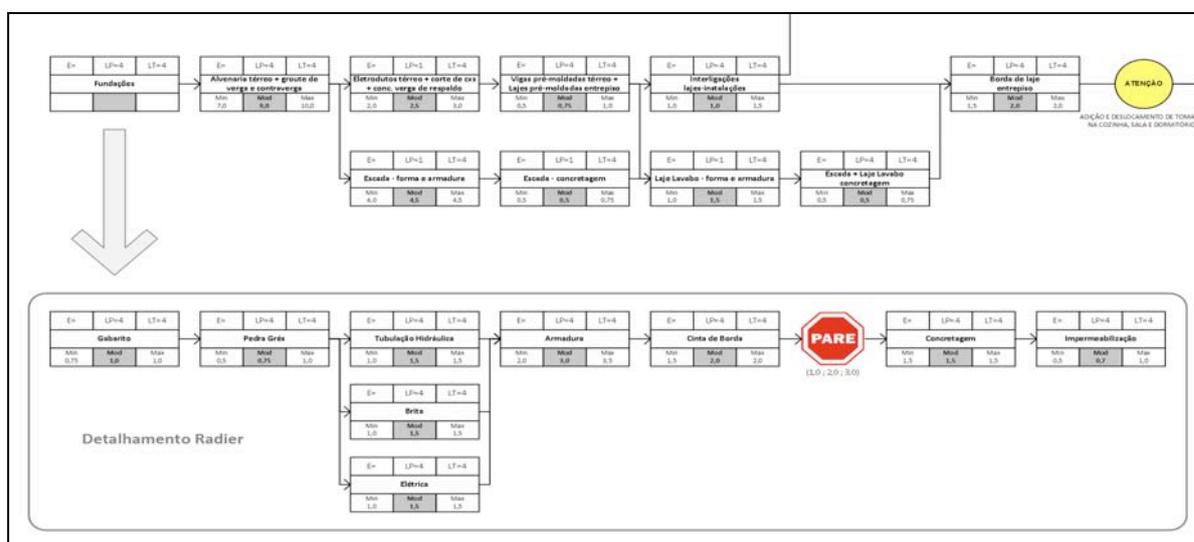


Figura 53: parte do diagrama de seqüência de execução do empreendimento X2 com o detalhamento da execução de *radiers*

O modelo foi atualizado com base nestas informações. A atualização consistiu na inserção de um sub-modelo contendo as atividades que compunham o processo de execução de *radiers*, bem como na adequação das planilhas de entrada e coleta de dados, sendo necessárias em torno de duas horas e meia de trabalho para sua consecução. Após a verificação do modelo, uma nova rodada de simulações foi realizada. Nesta rodada, o engenheiro solicitou a avaliação de um cenário em que a dois *radiers* fossem executados por mês. Neste cenário, o *lead time* médio de execução da fase 01 do empreendimento era 169 dias úteis, enquanto o *lead time* total do empreendimento era de 389 dias.

Estes resultados, juntamente com a linha de balanço foram apresentados à equipe da empresa. Durante as discussões, a equipe optou por avaliar outros dois cenários: (a) alocação de outra equipe para execução de parte dos processos que antes eram executados pela equipe única de alvenaria, como mureta de banho, oitões e muros externos (que passaria a ser responsável apenas pela execução da alvenaria dos dois pavimentos); e (b) mudança da estratégia de execução da alvenaria das casas, com alocação de três equipes (uma executando alvenaria de pavimentos térreos; a segunda executando alvenaria de pavimentos superiores; e a terceira executando os demais processos de alvenaria). A tabela 05, a seguir, resume os cenários simulados e seus indicadores.

Tabela 05: sumário dos três cenários simulados

Cenário	Fase 01		Empreendimento		Execução de <i>radiers</i>		Número de equipes de alvenaria		
	Lead time médio	Desvio-padrão	Lead time médio	Desvio-padrão	Seq.	2 / mês	01	02	03
04	168,1	5,1	388,8	3,4		x	x		
05	189,1	4,0	405,8	2,4	x			x	
06	210,8	7,3	518,3	5,3	x				x

Fonte: modelo de simulação

Tanto o cenário 05 como o cenário 06 foram simulados no decorrer da reunião. O cenário 05 foi simulado e os dados resultantes (relatório e linha de balanço) analisados. Então, com base nesta análise, o cenário 06 foi proposto, simulado e analisado pelos participantes (30 replicações demandavam aproximadamente 10 minutos). Esperava-se que o aumento do número de equipes de alvenaria de 02 para 03, com a alocação de uma das equipes para execução exclusiva do pavimento térreo e outra para execução do pavimento superior reduzisse significativamente o *lead time* do empreendimento. Entretanto, este efeito não foi

observado. De acordo com os dados do modelo, o aumento do número de equipes de alvenaria acarretaria um efeito contrário nos *lead times* médios da fase 01 e total do empreendimento. Esta conclusão foi corroborada pela análise da linha de balanço.

Em função do aumento no número de equipes de alvenaria houve um correspondente aumento no ritmo de execução deste processo. Contudo, a análise da linha de balanço mostrou aos participantes que, ao contrário do fluxo de trabalho da equipe de alvenaria do pavimento térreo, o fluxo de trabalho da equipe de execução de alvenaria do segundo pavimento experimentaria varias interrupções, em face, principalmente, da necessidade de aguardar a disponibilidade da equipe responsável pela execução da tarefa precedente à ela – no caso execução de borda de laje. Esta interrupção no fluxo de produção geraria um incremento de aproximadamente 46% no *lead time* médio total do processo de elevação de alvenaria. Em um fluxo ininterrupto de trabalho, as 68 unidades seriam executadas, em média, em 100 dias de trabalho, enquanto que, em função das demoras, o mesmo número de unidades seria executado, em média, em 146 dias de trabalho.

Constatou-se que a equipe de carpinteiros além de ser responsável pelo processo de execução de borda de laje, era também responsável pelos processos de execução de gabaritos; forma e armadura de escada; forma e armadura da laje do lavabo; borda de laje de térreo e borda de laje do segundo pavimento. Para a execução desses processo, a equipe de carpinteiros era mobilizada 205 vezes ao longo do empreendimento, com um percentual de utilização de 52,6%. A figura 54 apresenta parte das linhas de balanço geradas a partir dos dados do modelo de simulação, para os cenários 05 (acima) e 06 (abaixo), respectivamente.

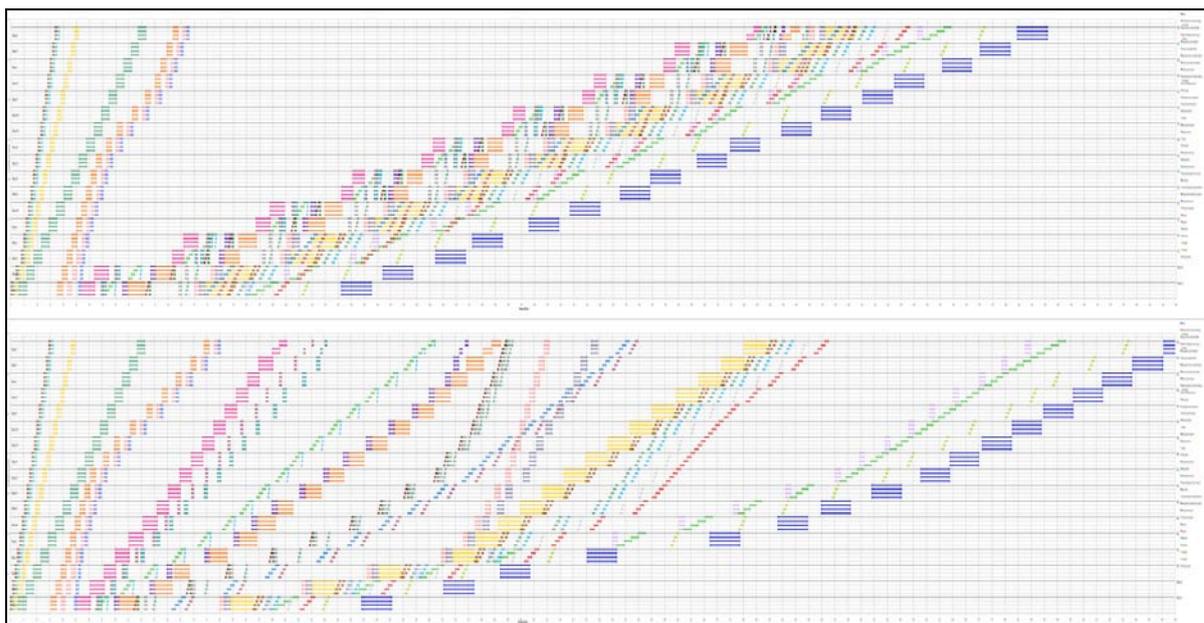


Figura 54: linhas de balanço geradas a partir dos dados dos cenários 05 (acima) e 06 (abaixo)

Da mesma maneira que no estudo do empreendimento X1, foram simulados alguns cenários a pedido da equipe da empresa, desta vez combinando o emprego de 01 ou 02 equipes de carpinteiros e alternando a estratégia de ataque dos *radiers* de forma sequencial ou limitado à execução de dois *radiers* por mês. A tabela 06 abaixo, apresenta um resumo dos cenários e dos resultados obtidos.

Tabela 06: sumário dos quatro novos cenários simulados

Cenário	Fase 01		Empreendimento		Execução de <i>radiers</i>		Equipes de carpinteiros	
	Média	Desvio-padrão	Média	Desvio-padrão	Seq.	2 por mês	01	02
07	210,8	7,3	518,3	5,3	x		x	
08	159,3	4,5	390,1	6,4		x	x	
09	162,9	3,7	444,8	8,5	x			x
10	150,3	4,0	382,5	3,8		x		x

Fonte: modelo de simulação

Estes resultados possibilitaram o entendimento de que a maior redução dos *lead times* médios da fase 01 e total do empreendimento poderiam ser obtidos utilizando-se 02 equipes de carpinteiros, além de empregar uma estratégia de execução de 02 *radiers* por mês, uma vez que esta estratégia reduziria o número mensal de mobilizações da equipe de carpinteiros para a execução dos *radiers*, deslocando-as da execução de atividades necessárias para o avanço de

casas já iniciadas (redução do trabalho em progresso). A figura 55 apresenta a linha de balanço resultante dos cenários 09 e 10, respectivamente.

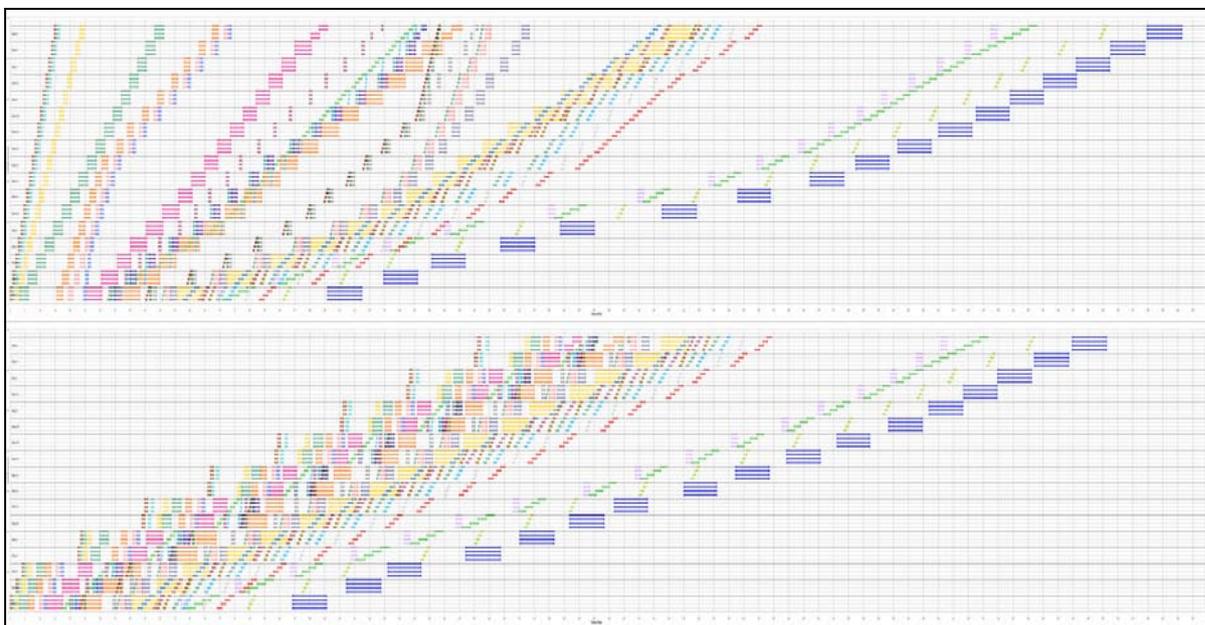


Figura 55: linhas de balanço dos cenários 09 (acima) e 10 (abaixo)

Outros 07 cenários foram simulados, sendo que três deles foram propostos pela equipe da empresa e simulados durante a realização das reuniões de PSP. Estes cenários consideravam diferentes estratégias de ataque para a execução dos *radiers* (04 *radiers* por mês, por exemplo), início dos blocos de acordo com o planejamento original da empresa, entre outros. Outro cenário simulado considerou o aumento do tempo de ciclo dos processos de elevação de alvenaria dos pavimentos térreo e superior (antes de 5, 5 e 6 dias para tempos de mínimo, moda e máximo, respectivamente, para 7, 9 e 10 dias) e o aumento da equipe de execução de reboco externo com a redução do tempo de ciclo desta atividade em 50%.

Após estas discussões, a equipe da empresa optou pela elaboração de um plano de longo prazo com as seguintes considerações, tendo como base as variáveis consideradas durante o estudo: (a) alvenarias executadas por 03 equipes, sendo 02 alocadas exclusivamente para execução do térreo e do segundo pavimento; (b) alocação de 03 equipes de eletricitas para as atividades; (c) *radiers* executados sequencialmente; (d) 2 equipes de carpinteiros; (e) redução de 50% no tempo de ciclo do processo execução de reboco externo; e (f) aumento do tempo de ciclo do processo de execução de alvenaria (em face do emprego de mão-de-obra de um novo subempreiteiro não habituado com o processo).

Desta forma, este cenário resultou em *lead times* médio para a fase 01 de 145 dias e total do empreendimento de 339 dias úteis (contra 156 e 451 dias úteis previstos inicialmente pela empresa), atendendo plenamente às datas previstas. A figura 56, abaixo, apresenta a linha de balanço gerada a partir do modelo final do empreendimento X2. Além de permitir a redução dos *lead times*, através, principalmente, da redução de atividades de espera, o cenário escolhido propiciava a manutenção de um fluxo ininterrupto de trabalho para as principais equipes do empreendimento, notadamente as de execução de alvenarias, reboco interno e externo, cobertura, gesso corrido e pintura, entre outras.

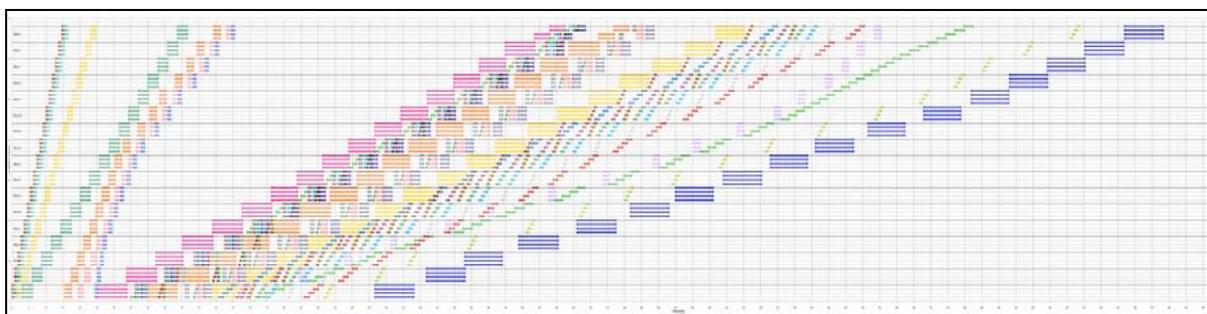


Figura 56: linha de balanço final do empreendimento X2

6.4.2.1 Ferramentas de Apoio à Operacionalização do PSP

Após a conclusão da fase de utilização da simulação, iniciou-se o processo de elaboração de ferramentas de referência ao processo de planejamento e de apoio ao processo de controle da produção. Em comum, ambos os tipos de ferramentas buscavam auxiliar na aderência do planejamento às decisões do PSP. Estas ferramentas representaram um esforço adicional para contribuir com a gestão do empreendimento que não havia sido realizada no estudo de caso 1.

Uma das ferramentas elaboradas foi o diagrama de precedência, cujo objetivo principal era o de fornecer informações relativas à seqüência de execução padronizada da unidade-base. Esta ferramenta foi utilizada durante o processo de elaboração do PSP e aperfeiçoada para incluir outras informações, como as atividades críticas do ponto de vista da manutenção dos ritmos de trabalho e do ponto de vista do controle de qualidade. Estas informações foram incluídas por sugestão do engenheiro da empresa X, uma vez que o mesmo sentia falta de uma forma visual de enfatizar estas informações a toda a equipe de produção do empreendimento. Desta forma, foram escolhidas, dentre todas as atividades que compunham a seqüência de execução da unidade-base, 25 atividades-chave para a manutenção do ritmo de produção do

empreendimento. Também foram escolhidas 12 atividades críticas do ponto de vista da qualidade, baseado na ocorrência de problemas passados nestes processos. Estes processos foram assinalados no diagrama de seqüência, com um ponto de exclamação e com uma borda vermelha, respectivamente (conforme figura 57, a seguir).

A partir do seu desenvolvimento, este diagrama de precedência foi impresso e fixado no escritório do empreendimento, após sua discussão com o mestre-de-obras e o técnico em edificações do empreendimento. Ainda, por sugestão do engenheiro de obra, um código de cores foi utilizado para identificar as principais equipes e seus respectivos processos. A figura 57 apresenta parte do diagrama de seqüência de execução do empreendimento X2. É importante salientar que esta ferramenta tinha como objetivo apenas explicitar a seqüência na qual os processos se sucederiam na fase de execução. Embora contivesse informações sobre a duração das atividades, esta não era utilizada da mesma forma que um diagrama PERT/CPM. Sua utilização se dava como apoio à elaboração dos planos de curto prazo.

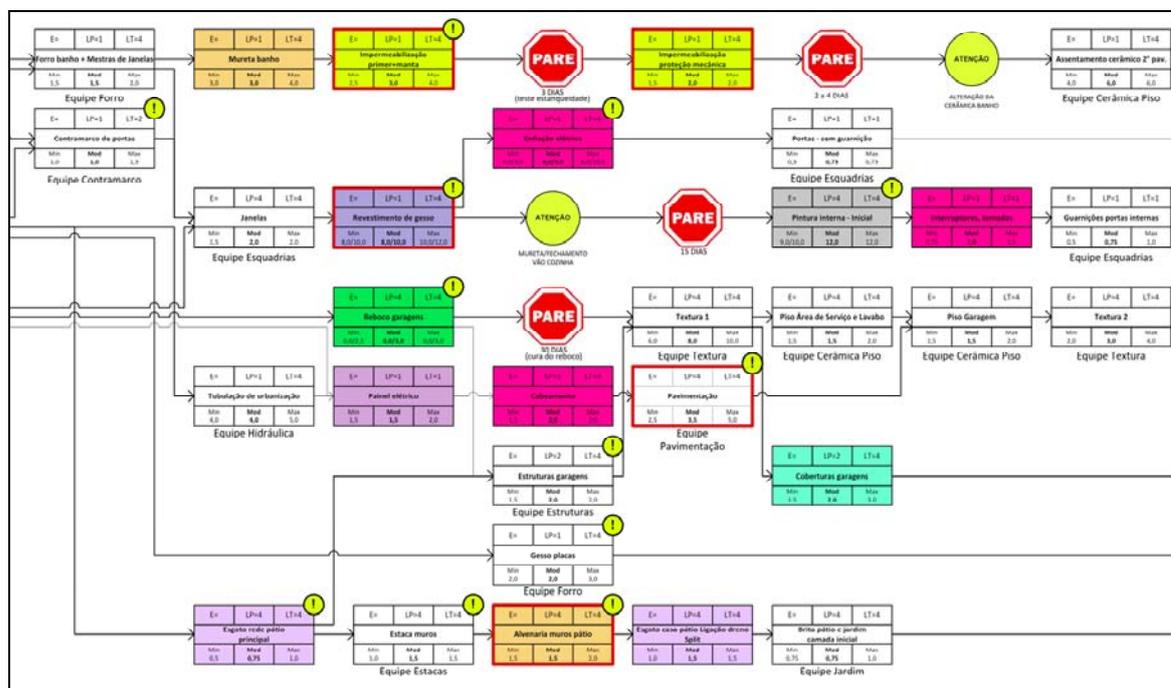


Figura 57: diagrama de seqüência do empreendimento X2

Outra ferramenta de referência utilizada foi a própria a linha de balanço (figura 56). Através dela foi possível compreender o fluxo de trabalho das equipes responsáveis pelos diversos processos produtivos da forma como foram idealizados, bem como possíveis interferências e impactos de um processo em particular nos demais. Outras ferramentas, como o leiaute do

canteiro e o plano de ataque do empreendimento foram também executados pela equipe da empresa.

Durante o desenvolvimento do estudo 2, problemas relacionados à aderência da execução ao PSP do empreendimento X1 foram relatados pelos participantes. Estas dificuldades relacionavam-se, principalmente, à dificuldade da manutenção da estratégia de ataque prevista, em termos de seqüência de execução e trajetória das equipes. As principais causas apontadas pelo engenheiro da empresa era a falta de priorização na execução dos processos de acordo com a seqüência de casas prevista e pela abertura de frentes de trabalho não prioritárias, algumas em função da não remoção de restrições - a empresa não realizava o planejamento de médio prazo de forma estruturada.

Já no grupo das ferramentas de apoio ao processo de controle da produção, foram elaboradas ferramentas que permitissem, basicamente, o monitoramento do avanço físico dos principais processos produtivos. A partir dos dados gerados pelo modelo de simulação e utilizados inicialmente para a elaboração da linha de balanço, elaborou-se uma planilha de monitoramento do avanço físico de nove processos considerados críticos pela equipe da empresa (assinalados no diagrama de seqüência).

Esta ferramenta foi discutida e refinada em conjunto com a equipe da empresa. Era constituída de uma planilha na qual constavam as datas de início e conclusão dos processos (dados das médias oriundos dos resultados do modelo de simulação). A figura 58 apresenta parte desta planilha (as células sombreadas indicam as datas início e conclusão de um lote de produção).

Casas	Alvenaria Térreo + Groute + Contraverga				Alvenaria Superior + Groute + Contraverga				Colocação Caixas Elétricas Superior			
	Início		Conclusão		Início		Conclusão		Início		Conclusão	
	Projetado	Executado	Projetado	Executado	Projetado	Executado	Projetado	Executado	Projetado	Executado	Projetado	Executado
1	09.06.09		19.06.09		29.06.09		10.07.09		20.07.09		21.07.09	
2	09.06.09		19.06.09		29.06.09		10.07.09		21.07.09		22.07.09	
3	09.06.09		19.06.09		29.06.09		10.07.09		22.07.09		23.07.09	
4	09.06.09		19.06.09		29.06.09		10.07.09		23.07.09		24.07.09	
5	19.06.09		02.07.09		10.07.09		23.07.09		03.08.09		04.08.09	
6	19.06.09		02.07.09		10.07.09		23.07.09		04.08.09		05.08.09	
7	19.06.09		02.07.09		10.07.09		23.07.09		05.08.09		06.08.09	
8	19.06.09		02.07.09		10.07.09		23.07.09		06.08.09		07.08.09	
9	02.07.09		14.07.09		24.07.09		04.08.09		13.08.09		14.08.09	
10	02.07.09		14.07.09		24.07.09		04.08.09		14.08.09		17.08.09	
11	02.07.09		14.07.09		24.07.09		04.08.09		17.08.09		18.08.09	
12	02.07.09		14.07.09		24.07.09		04.08.09		18.08.09		19.08.09	
13	14.07.09		27.07.09		05.08.09		18.08.09		27.08.09		28.08.09	
14	14.07.09		27.07.09		05.08.09		18.08.09		28.08.09		31.08.09	
15	14.07.09		27.07.09		05.08.09		18.08.09		31.08.09		31.08.09	
16	14.07.09		27.07.09		05.08.09		18.08.09		31.08.09		01.09.09	
17	27.07.09		06.08.09		18.08.09		31.08.09		09.09.09		10.09.09	
18	27.07.09		06.08.09		18.08.09		31.08.09		10.09.09		11.09.09	
19	27.07.09		06.08.09		18.08.09		31.08.09		11.09.09		14.09.09	
20	27.07.09		06.08.09		18.08.09		31.08.09		14.09.09		15.09.09	
21	06.08.09		19.08.09		31.08.09		11.09.09		22.09.09		23.09.09	
22	06.08.09		19.08.09		31.08.09		11.09.09		23.09.09		24.09.09	
23	06.08.09		19.08.09		31.08.09		11.09.09		24.09.09		25.09.09	
24	06.08.09		19.08.09		31.08.09		11.09.09		25.09.09		28.09.09	
25	19.08.09		28.08.09		11.09.09		23.09.09		05.10.09		06.10.09	
26	19.08.09		28.08.09		11.09.09		23.09.09		06.10.09		07.10.09	
27	19.08.09		28.08.09		11.09.09		23.09.09		07.10.09		08.10.09	
28	19.08.09		28.08.09		11.09.09		23.09.09		08.10.09		09.10.09	
29	28.08.09		09.09.09		23.09.09		05.10.09		14.10.09		15.10.09	
30	28.08.09		09.09.09		23.09.09		05.10.09		15.10.09		16.10.09	
31	28.08.09		09.09.09		23.09.09		05.10.09		16.10.09		19.10.09	
32	28.08.09		09.09.09		23.09.09		05.10.09		19.10.09		20.10.09	
33	09.09.09		21.09.09		05.10.09		14.10.09		26.10.09		27.10.09	
34	09.09.09		21.09.09		05.10.09		14.10.09		27.10.09		28.10.09	
35	09.09.09		21.09.09		05.10.09		14.10.09		28.10.09		29.10.09	
36	09.09.09		21.09.09		05.10.09		14.10.09		29.10.09		29.10.09	
37	21.09.09		30.09.09		14.10.09		26.10.09		04.11.09		05.11.09	
38	21.09.09		30.09.09		14.10.09		26.10.09		05.11.09		06.11.09	

Figura 58: planilha de controle de avanço físico do empreendimento X2

Nesta planilha, a equipe de planejamento poderia consultar as datas de início de um determinado processo por unidade habitacional, bem como controlar o avanço físico deste processo a partir do ingresso das suas datas de conclusão por casa. Este controle poderia ser visualizado através de um gráfico de avanço físico por processo (na figura 60, um exemplo para o processo de elevação e alvenaria). Este gráfico era formado por quatro linhas: datas de início e conclusão médios (em azul na figura 60), limite inferior das datas de início (correspondendo a menos dois desvios-padrão da média) e o limite superior das datas de conclusão (correspondendo a mais dois desvios-padrão da média), representados pelas linhas verde e vermelha, respectivamente. Outras duas linhas seriam plotadas com base nos dados inseridos pelo usuário ao longo da etapa de produção e comparados às linhas existentes.

A planilha de controle de avanço físico foi elaborada para permitir tanto o monitoramento do ritmo de produção (o avanço físico propriamente dito), como também a execução das casas conforme os lotes de produção estabelecidos e de acordo com a trajetória definida no plano de ataque do empreendimento, uma vez que as casas estavam identificadas pelos seus números. Desta forma, buscou-se reforçar a importância da aderência ao plano de ataque do empreendimento definido na elaboração do PSP.

Após o desenvolvimento das ferramentas, estas foram apresentadas e discutidas com o pessoal operacional da empresa, mestre-de-obras e técnicos em edificações, de forma a familiarizá-los com seu uso e preenchimento. A ferramenta vinha sendo utilizada nas reuniões de planejamento, como forma de apoiar o planejamento de curto prazo.

Uma avaliação do preenchimento da planilha nos primeiros meses da fase de execução do empreendimento foi realizado, juntamente com informações prestadas pela equipe de engenharia da empresa X. A figura 59, a seguir, apresenta a planilha preenchida. As células em vermelho apontam para datas de início e conclusão dos processos além das datas previstas. Já células com datas em verde representam inícios e conclusões antecipadas às datas previstas.

Casas	Alvenaria Térreo + Groute + Contraverga				Alvenaria Superior + Groute + Contraverga			
	Início		Conclusão		Início		Conclusão	
	Projetado	Executado	Projetado	Executado	Projetado	Executado	Projetado	Executado
1	09.06.09	13.05.09	19.06.09	06.06.09	29.06.09	21.07.09	10.07.09	25.08.09
2	09.06.09	13.05.09	19.06.09	06.06.09	29.06.09	21.07.09	10.07.09	25.08.09
3	09.06.09	13.05.09	19.06.09	06.06.09	29.06.09	21.07.09	10.07.09	25.08.09
4	09.06.09	13.05.09	19.06.09	06.06.09	29.06.09	21.07.09	10.07.09	25.08.09
5	19.06.09	20.05.09	02.07.09	18.06.09	10.07.09	17.07.09	23.07.09	05.08.09
6	19.06.09	20.05.09	02.07.09	18.06.09	10.07.09	17.07.09	23.07.09	05.08.09
7	19.06.09	20.05.09	02.07.09	18.06.09	10.07.09	17.07.09	23.07.09	05.08.09
8	19.06.09	20.05.09	02.07.09	18.06.09	10.07.09	17.07.09	23.07.09	05.08.09
9	02.07.09	17.08.09	14.07.09	04.09.09	24.07.09	29.09.09	04.08.09	19.10.09
10	02.07.09	17.08.09	14.07.09	04.09.09	24.07.09	29.09.09	04.08.09	19.10.09
11	02.07.09	17.08.09	14.07.09	04.09.09	24.07.09	29.09.09	04.08.09	19.10.09
12	02.07.09	17.08.09	14.07.09	04.09.09	24.07.09	29.09.09	04.08.09	19.10.09
13	14.07.09	26.08.09	27.07.09	18.09.09	05.08.09	29.09.09	18.08.09	19.10.09
14	14.07.09	26.08.09	27.07.09	18.09.09	05.08.09	29.09.09	18.08.09	19.10.09
15	14.07.09	26.08.09	27.07.09	18.09.09	05.08.09	29.09.09	18.08.09	19.10.09
16	14.07.09	26.08.09	27.07.09	18.09.09	05.08.09	29.09.09	18.08.09	19.10.09
17	27.07.09		06.08.09		18.08.09		31.08.09	
18	27.07.09		06.08.09		18.08.09		31.08.09	
19	27.07.09		06.08.09		18.08.09		31.08.09	
20	27.07.09		06.08.09		18.08.09		31.08.09	
21	06.08.09		19.08.09		31.08.09		11.09.09	
22	06.08.09		19.08.09		31.08.09		11.09.09	
23	06.08.09		19.08.09		31.08.09		11.09.09	
24	06.08.09		19.08.09		31.08.09		11.09.09	
25	19.08.09	16.09.09	28.08.09	26.10.09	11.09.09		23.09.09	
26	19.08.09	16.09.09	28.08.09	26.10.09	11.09.09		23.09.09	
27	19.08.09	16.09.09	28.08.09	26.10.09	11.09.09		23.09.09	
28	19.08.09	16.09.09	28.08.09	26.10.09	11.09.09		23.09.09	
29	28.08.09		09.09.09		23.09.09		05.10.09	
30	28.08.09		09.09.09		23.09.09		05.10.09	
31	28.08.09		09.09.09		23.09.09		05.10.09	
32	28.08.09		09.09.09		23.09.09		05.10.09	
33	09.09.09		21.09.09		05.10.09		14.10.09	
34	09.09.09		21.09.09		05.10.09		14.10.09	
35	09.09.09		21.09.09		05.10.09		14.10.09	
36	09.09.09		21.09.09		05.10.09		14.10.09	
37	21.09.09		30.09.09		14.10.09		26.10.09	
38	21.09.09		30.09.09		14.10.09		26.10.09	
39	21.09.09		30.09.09		14.10.09		26.10.09	
40	21.09.09		30.09.09		14.10.09		26.10.09	
41	30.09.09	19.06.09	12.10.09	21.07.09	26.10.09	31.07.09	05.11.09	08.09.09
42	30.09.09	19.06.09	12.10.09	21.07.09	26.10.09	31.07.09	05.11.09	08.09.09
43	30.09.09	19.06.09	12.10.09	21.07.09	26.10.09	31.07.09	05.11.09	08.09.09
44	30.09.09	19.06.09	12.10.09	21.07.09	26.10.09	31.07.09	05.11.09	08.09.09

Figura 59: planilha de monitoramento da aderência ao PSP

O plano de ataque do empreendimento não havia sido integralmente cumprido. Enquanto originalmente a seqüência de execução dos três primeiros blocos era A, B e C (casas 01-12), a

seqüência efetivamente executada foram os blocos A, B e J (01-08 e 41-44). Esta mudança teve duas causas: (a) a direção da empresa mudou a seqüência em função da existência de demanda para aquele bloco; e (b) a área onde seria construído o bloco C não havia sido aterrada a tempo por falta do projeto de contenções (remoção de restrição). O impactos dessas dificuldades podem ser vistos na figura 60, a seguir.

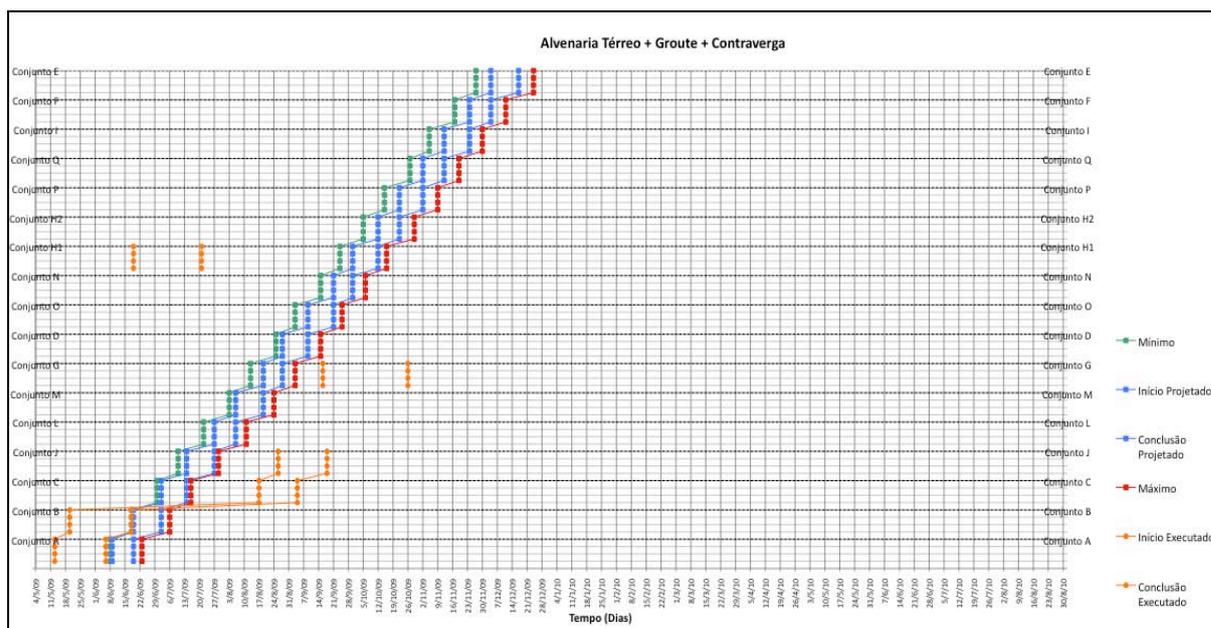


Figura 60: exemplo de gráfico de avanço físico do empreendimento X2

Além disto, o plano de ataque do processo de elevação de alvenarias – que previa a utilização de uma equipe executando alvenarias do pavimento térreo e outra executando o pavimento superior – também não vinha sendo seguido. Neste caso, a falta de projeto estrutural também impossibilitava a execução das lajes pré-fabricadas e sua disponibilização no canteiro. Desta forma, houve a alocação de apenas uma equipe de alvenaria que executaria pavimentos térreos na medida da disponibilidade de *radiers*, até que o projeto estrutural estivesse disponível.

A falta de frentes de trabalho para as equipes de produção e a perspectiva de interrupção nos fluxos de trabalho dessas equipes provocou dois efeitos: (a) a saída do empreiteiro de mão-de-obra, alegando que a falta de frentes de trabalho para as equipes já contratadas trazia prejuízos financeiros a ele; e (b) grande rotatividade de mão-de-obra do novo empreiteiro contratado, que eram remunerados por produção.

6.4.3 Avaliação do Estudo de Caso 2

6.4.3.1 Utilidade

Com relação à **contribuição do PSP para a percepção da necessidade de tomada de decisão de forma conectada**, por ter ocorrido na seqüência do estudo de caso 1 e por se tratar de um empreendimento com características bastante similares ao primeiro, o processo de elaboração do PSP baseou-se nas decisões que já haviam sido tomadas no empreendimento anterior. Enquanto a maioria dos contratos de fornecimento seriam realizadas com os mesmos fornecedores daquele empreendimento, havia ainda uma indefinição sobre a contratação do principal subempreiteiro, o empreiteiro geral, que só foi resolvida pouco antes do início da fase de execução. Desta forma, as reuniões desenvolvidas tiveram basicamente como participantes a equipe da empresa, enquanto o subempreiteiro de obra civil só veio a participar da elaboração do PSP perto da sua conclusão.

Quando comparado ao modelo desenvolvido no primeiro estudo de caso, o modelo utilizado neste estudo, além das adequações necessárias, manteve o escopo do modelo anterior. Entretanto, a pedido do engenheiro, foi realizado um detalhamento do processo de execução de *radier*, considerando as atividades que o compunham, uma vez que era desejo do engenheiro avaliar a utilização das equipes de produção que também executavam outros processos no empreendimento. Esta solicitação de detalhamento visou a avaliação dos impactos do dimensionamento das equipes de produção e da alocação de atividades a elas.

Já com relação à **utilização do PSP como referência na tomada de decisão da gestão do empreendimento**, a partir das simulações realizadas durante o estudo, mostrou-se que a estratégia de ataque até então utilizada para o processo de elevação de alvenaria causaria um aumento significativo nos *lead times* dos blocos de casas. Desta forma, a empresa optou por alterar a estratégia de ataque utilizada no empreendimento X1, executando a elevação de alvenarias em duas frentes de trabalho paralelas (térreo e segundo pavimento) com duas equipes independentes, ao invés de apenas uma.

Como no estudo anterior, o plano de longo prazo do empreendimento foi gerado a partir das decisões oriundas do PSP. Com base na linha de balanço gerada pelo modelo de simulação, o plano de longo prazo foi elaborado pelo engenheiro de obra utilizando o MS-Project. Segundo a equipe de planejamento, o grau de detalhamento utilizado teve impactos positivos e negativos. Como impacto negativo, a dificuldade de visualização da linha de balanço gerada a

partir da simulação foi assinalada como uma causa para sua não utilização como referência ao planejamento de longo prazo do empreendimento. Entretanto, segundo a equipe, o detalhamento permitiu um conhecimento mais profundo e detalhado sobre os impactos dos diferentes ritmos das equipes de produção, bem como sobre a seqüência de execução das unidades-base do empreendimento.

Já as planilhas de monitoramento dos ritmos e aderência ao plano de ataque dos processos considerados mais importantes, segundo a responsável pelo planejamento, vinham sendo utilizadas durante as reuniões de planejamento. Entretanto, de acordo com esta, sua utilização não vinha sendo constante, uma vez que como apenas alguns processos estavam contemplados nela, seu emprego não vinha acontecendo em todas as reuniões, uma vez que o empreendimento estava em sua fase inicial.

Na entrevista de avaliação, o engenheiro da empresa declarou que gostaria de utilizar a simulação ainda na fase de definição dos prazos de entregas parciais e finais dos empreendimentos. Segundo ele, estas datas eram habitualmente fixadas pelo diretor da empresa e a utilização da simulação poderia auxiliá-lo nas discussões sobre a exequibilidade dessas datas. Ainda segundo o engenheiro da empresa, o fato de que os empreendimentos de um mesmo nicho de mercado tinham como base uma tipologia comum, possibilitaria a construção de modelos que pudessem apoiar esta discussão e a avaliação antecipada de que estratégias de execução seriam necessárias para sua consecução.

Com relação ao interesse da equipe de gestão em estender o PSP a outros empreendimentos, o engenheiro da empresa vinha, por iniciativa própria, adequando a seqüência de execução das unidades-base do empreendimento X2 a um novo empreendimento (neste caso de unidades térreas) e demonstrou interesse na adequação futura do modelo de simulação e seu emprego no desenvolvimento do PSP desse novo empreendimento.

No que diz respeito à **contribuição para a sistematização do processo de tomada de decisão**, neste estudo, a seqüência de execução preconizada no modelo de elaboração do PSP foi seguida, embora as primeiras duas decisões previstas tenham sido reduzidas à avaliação e revisão das decisões do PSP tomadas no estudo anterior. Duas etapas do modelo não foram executadas: o estudo do fluxo de trabalho na unidade-base, uma vez que a unidade-base do empreendimento X2 era semelhante a estudada no empreendimento X1; e a identificação e projeto de processos críticos. A seqüência de execução da unidade-base do empreendimento

foi revisada, algumas relações de precedência alteradas e os tempos de ciclo revistos. Com base nestas modificações foram realizadas as adequações no modelo de simulação que foi empregado no estudo dos fluxos de trabalho do empreendimento e no dimensionamento da capacidade dos recursos de produção. Nesta etapa houve um maior aprofundamento das discussões em relação ao estudo anterior, refletido pelo número de cenários simulados e pelo tempo despendido na sua realização

Por fim, com relação à **contribuição do emprego da simulação para o processo de tomada de decisão**, assim como no estudo 01, os modelos de simulação utilizados foram desenvolvidos pela equipe de pesquisa com base nas informações coletadas nas reuniões de elaboração do PSP. Esses modelos foram utilizados para o teste de cenários que aconteciam com base em demandas surgidas ao longo das reuniões. Conforme descrito, parte dos cenários foram simulados ao longo das próprias reuniões a partir da evolução dessas discussões.

Neste sentido, a utilização da linha de balanço como ferramenta para representação dos resultados do modelo em termos de fluxos de trabalho mostrou-se útil. Quando os cenários eram simulados fora das reuniões, as linhas de balanço eram impressas e comparadas pela equipe da empresa nas reuniões. Quando geradas nas reuniões eram visualizadas na tela do computador e os resultados discutidos.

No estudo, dezessete cenários foram testados. O emprego da simulação permitiu que fossem exploradas diversas alternativas, principalmente relacionadas a estratégias de ataque de alguns processos, ao número de equipes e a alocação de atividades a estas equipes. A principal medida para avaliação dos resultados dos cenários eram os prazos de conclusão dos blocos e do empreendimento e seu atendimento ao plano de vendas da empresa.

Em comparação ao estudo de caso 1, houve um aumento bastante acentuado no emprego da simulação no estudo 2. A equipe da empresa utilizou da simulação como uma forma de explorar o sistema de produção do empreendimento. Segundo a responsável pelo sistema de planejamento da empresa, a simulação permitiu um melhor conhecimento do sistema de produção, dos impactos relacionados às decisões sobre os ritmos dos processos de produção e as relações de precedência entre processos. O uso mais intenso da simulação deveu-se ao fato de que o modelo foi empregado com mais antecedência em relação ao início do empreendimento. Isso foi viabilizado pela estratégia de reutilização utilizada e pelas poucas modificações necessárias no modelo anteriormente desenvolvido, o que reduziu o esforço

para sua elaboração e um maior tempo disponível para seu emprego. Como já discutido, o engenheiro de obra e a responsável pelo sistema de planejamento afirmaram que tinham interesse em estender o uso da simulação para empreendimentos futuros da empresa. Segundo o engenheiro a simulação poderia ser utilizada como uma ferramenta de apoio à tomada de decisão já na fase de definição do plano de vendas do empreendimento, a fim de avaliar sua exequibilidade.

6.3.3.2 Facilidade de Uso

No que diz respeito à **iniciativa dos participantes no processo de modelagem**, embora o desenvolvimento do modelo tenha ficado a cargo da equipe de pesquisa, diversos cenários foram demandados pela equipe da empresa ao longo do estudo. Estes cenários foram sendo estabelecidos de acordo com a evolução das discussões. O interesse em detalhar o processo de execução de *radiers* foi uma iniciativa do engenheiro da obra, como forma de melhor entender os impactos da alocação das equipes responsáveis pela execução daquele processo em outros processos produtivos ao longo da obra. Percebeu-se ainda que, dada a semelhança entre os dois empreendimentos estudados, o objetivo da equipe de engenharia da empresa passou a ser o aprofundamento nas discussões acerca do PSP, questionando e sugerindo um número maior de cenários a serem simulados, explorando diversas alternativas.

Com relação à **extensão do processo de elaboração**, a maior parte do tempo despendido para a elaboração do PSP concentrou-se nas etapas de estudo dos fluxos de trabalho no empreendimento e dimensionamento da capacidade dos recursos de produção. Comparado com o estudo 1, a extensão do processo de elaboração teve uma redução bastante importante. O número de horas despendidas em reuniões para a elaboração do PSP no estudo 2 foi de aproximadamente 60% do tempo despendido no primeiro estudo. Já as horas despendidas na preparação das reuniões (nas quais estão incluídas as horas necessárias para o desenvolvimento do modelo de simulação) foram de aproximadamente 30% das necessárias no estudo 1. Vale ressaltar que, embora duas etapas previstas no modelo de PSP não tenham sido desenvolvidas, estão computadas neste tempo quatro reuniões nas quais foram desenvolvidas as ferramentas monitoramento que foram utilizadas na fase de execução.

A comparação entre o modelo original, desenvolvido para o empreendimento X1, e o modelo utilizado no estudo de caso 2, revelou que as mudanças realizadas resumiram-se a inserção dez novos módulos de processos.

Outros aspectos (número de unidades, estratégia de ataque, tamanho de lotes, recursos produtivos alocados) foram modificados facilmente nas planilhas de entrada e saída de dados. Estas modificações consumiram seis horas de trabalho. Neste caso, pode-se avaliar que a estratégia de reutilização do modelo, com vistas a redução do tempo de desenvolvimento do modelo, foi bem sucedida. Entretanto, cabe destacar que a reutilização foi facilitada pela similaridade entre os dois empreendimentos. Como já discutido, a redução do tempo de desenvolvimento proporcionou maior tempo para sua utilização no processo de elaboração do PSP. Alternativamente, esta redução poderia viabilizar a postergação do processo de elaboração do PSP para um momento mais próximo ao início da fase de execução, quando o nível de incerteza sobre o empreendimento tende a diminuir (como por exemplo definições quanto à contratação de fornecedores, disponibilidade de mão-de-obra, entre outros).

Já com relação à **contribuição para a comunicação e entendimento das decisões entre os participantes**, em função do número de cenários simulados, a linha de balanço gerada a partir dos resultados do modelo assumiu papel importante nas discussões. Como uma ferramenta de visualização dos resultados da simulação, percebeu-se que a mesma apresentou alguns benefícios: (a) criou um registro estático do comportamento do sistema de produção com base nos dados do processo de simulação, permitiu que se tivesse uma visão completa do sistema e não apenas baseada nos indicadores numéricos fornecidos pelo modelo; e (b) permitiu que as lógicas do modelo fossem verificadas e as correções necessárias visualmente identificadas.

Com base no PSP foram elaboradas ferramentas de monitoramento da operacionalização das decisões do PSP durante a fase de execução, que focaram no monitoramento do avanço físico, reforçando a idéia de execução das unidades estritamente na seqüência de execução e na trajetória pré-definidas, bem como dos lotes de produção e transferência estabelecidos para os processos. De acordo com a avaliação da planilha e com base nas afirmações da responsável pelo sistema de planejamento, a planilha vinha sendo utilizada para o monitoramento, durante as reuniões de curto prazo realizadas no canteiro de obra.

Por fim, com relação à **possibilidade de continuação do processo após o estudo**, de acordo com as declarações do engenheiro e da responsável pelo sistema de planejamento, havia interesse em utilizar o PSP em empreendimentos futuros. Como já discutido, o engenheiro vinha adaptando a seqüência de execução da unidade-base do empreendimento X2 a outro empreendimento que estava por ser iniciado à época da conclusão do estudo de caso. Entretanto, não há evidências de que o processo foi formalizado e a seqüência de elaboração

seguida. O mesmo interesse foi demonstrado com relação à simulação, de forma particular. Entretanto, o uso desta ferramenta depende da participação de especialistas no processo de modelagem e simulação, o que pode representar um entrave à continuação de seu emprego.

6.5 ESTUDO DE CASO 3

6.5.1 Elaboração do PSP do Empreendimento

Conforme apresentado, o estudo de caso foi iniciado em julho de 2008, aproximadamente 15 dias antes do início da execução do empreendimento. O estudo era parte de um projeto de treinamento e capacitação em PSP promovido pelo NORIE/UFRGS para a empresa Y. Este projeto consistia de uma série de seminários acerca dos conceitos do PSP, além da implementação do PSP em dois empreendimentos da empresa, entre os quais estava o empreendimento Y1. O interesse da empresa Y na realização do PSP residia no fato de que o empreendimento Y representava a primeira experiência da regional da empresa em relação àquela tipologia (condomínio de casas) e havia a expectativa de lançar futuros empreendimentos com as mesmas características.

Ao contrário dos estudos anteriores, optou-se neste estudo por dividi-lo em duas etapas. A primeira etapa consistiu na elaboração do PSP do empreendimento com base no modelo de elaboração já apresentado. A segunda etapa consistiu no desenvolvimento e utilização do modelo de simulação do empreendimento. Tal estratégia foi utilizada em função de dois motivos principais: (a) esta era a primeira implementação do PSP na empresa, então havia o objetivo de capacitar a equipe gerencial na consecução das etapas previstas no modelo; e (b) havia pouco tempo disponível para a elaboração do PSP e o tempo necessário para a elaboração do modelo de simulação poderia acarretar um aumento no tempo necessário para o desenvolvimento do estudo, postergando a conclusão do PSP em relação à etapa de execução das casas da primeira fase do empreendimento. Desta forma, esperava-se utilizar a simulação para uma revisão do PSP da segunda e terceira fases do empreendimento.

O estudo se estendeu por oito meses. Ao todo, foram realizadas vinte reuniões, das quais quinze para o desenvolvimento da primeira etapa do estudo, denominada de “fase determinística do PSP”, enquanto outras cinco reuniões foram realizadas para o desenvolvimento da “fase dinâmica do PSP”, a partir do emprego da simulação. As reuniões

aconteciam duas vezes por semana, como forma de reduzir a extensão do estudo, e tinham, em média, duas horas de duração. Ao todo, foram despendidas quarenta horas em reuniões (trinta na primeira fase, mais dez na segunda). Além das reuniões, foram despendidas pela equipe de pesquisa outras vinte e oito horas para preparação das reuniões e elaboração de ferramentas da primeira fase e mais 48 horas no desenvolvimento e discussão dos modelos de simulação empregados no estudo.

Além da equipe de pesquisadores, participaram do estudo o engenheiro de planejamento da empresa, o engenheiro-coordenador do empreendimento, o engenheiro de obra, o mestre-de-obras da empresa Y, o mestre-de-obras do subempreiteiro geral e, eventualmente, fornecedores de materiais e demais subempreiteiros (lajes pré-fabricadas, esquadrias de alumínio, esquadrias de madeira, instalações hidrossanitárias, instalações elétricas, cobertura, entre outros), além dos principais projetistas. A figura 61, a seguir, apresenta um resumo do esforço despendido em horas em cada uma das etapas do processo de elaboração do PSP, assim como seus participantes.

Etapa do PSP	Participantes	Número de Reuniões/ Carga horária	Preparação e Apoio ao Processo	Período de Execução
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Definição da Seqüência de Execução da Unidade-base 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Engenheiro de Planejamento ▪ Engenheiro-coordenador ▪ Engenheiro de Obra ▪ Mestre-de-obras da Empresa Y 	04 reuniões (08 horas)	06 horas	julho/08 a agosto/08
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pré-dimensionamento da Capacidade dos Recursos de Produção 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mestre-de-obras do Subempreiteiro ▪ Principais Subempreiteiros ▪ Principais projetistas 			
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Definição da Estratégia de Ataque do Empreendimento 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Engenheiro de Planejamento ▪ Engenheiro-coordenador ▪ Engenheiro de Obra 	01 reuniões (02 horas)	02 horas	julho/08
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estudo dos Fluxos de Trabalho na Unidade-base 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Engenheiro de Planejamento ▪ Engenheiro-coordenador ▪ Engenheiro de Obra ▪ Mestre-de-obras da Empresa Y ▪ Mestre-de-obras do Subempreiteiro ▪ Principais Subempreiteiros 	09 reuniões (18 horas)	20 horas	agosto/08 a setembro/08
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estudo dos Fluxos de Trabalho no Empreendimento 				
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dimensionamento da Capacidade dos Recursos de Produção 				
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Identificação e Projeto de Processos Críticos 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Engenheiro de Planejamento ▪ Engenheiro-coordenador ▪ Engenheiro de Obra ▪ Fornecedor de blocos de concreto 	01 reunião (02 horas)	02 horas	setembro/08 a outubro/08
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Desenvolvimento e Emprego do Modelo de Simulação 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Engenheiro de Planejamento ▪ Engenheiro de Obra ▪ Mestre-de-obras 	04 reuniões (08 horas)	40 horas	dezembro/08 a março/09

Figura 61: esforço despendido na elaboração do PSP no empreendimento Y1

6.5.1.1 Desenvolvimento da Fase Determinística do PSP

Seguindo o modelo de elaboração do PSP (SCHRAMM, 2004), procedeu-se as discussões acerca da seqüência de execução da unidade-base do empreendimento (no caso, duas casas geminadas). Durante estas discussões, percebeu-se que, embora o início da execução do empreendimento estivesse próxima, uma série de indefinições ainda existiam. Estas indefinições diziam respeito, principalmente, a detalhes construtivos, tecnologias construtivas

a serem empregadas, como também a indefinições com relação a alguns fornecedores de materiais e serviços.

A definição da seqüência de execução padronizada do empreendimento foi estabelecida após uma série de 04 reuniões. Durante estas reuniões, os participantes discutiram e analisaram formas alternativas de execução da unidade-base, considerando possíveis restrições e vantagens entre as alternativas. Além da seqüência em que as atividades seriam desenvolvidas, foram também definidos seu tempos de ciclo (em termos de uma distribuição triangular) e principais recursos a serem utilizados.

Durante esta etapa, tomaram parte das reuniões os subempreiteiros geral, instalações hidrossanitárias, cobertura, esquadrias de alumínio e madeira, além do fornecedor de blocos e lajes pré-fabricadas de concreto. Estes participaram das reuniões, discutindo e modificando a seqüência de execução da unidade-base, em função da identificação de interferências ou dependências técnicas entre suas atividades. Estas discussões serviram, ainda, como oportunidade para completar a avaliação do projeto das unidades-base e identificar decisões pendentes ou necessidades de reavaliações e mudanças nos projetos ainda em desenvolvimento.

A execução das unidades-base foi dividida em duas etapas: a primeira de execução das casas sem acabamentos (como colocação de metais, segunda demão de pintura interna, entre outras); a segunda consistia na execução dos acabamentos (anteriormente descritos). Esta divisão ocorreu em função do número elevado de unidades a serem produzidas em cada uma das fases e a necessidade contratual de entrega destas unidades em uma única vez. Assim, as primeiras casas a serem produzidas, seguindo a estratégia de ataque do empreendimento, ficariam um longo período concluídas antes da entrega dos imóveis ao clientes (estoque de produtos acabados). Desta forma, a etapa de acabamento foi protelada para evitar a necessidade de realização de manutenção nas unidades concluídas primeiramente (retrabalho), uma vez que as mesmas ficariam em estoque durante um grande período de tempo à mercê das intempéries. A figura 62 apresenta um detalhe do diagrama de seqüência de execução padronizada da unidade-base do empreendimento que foi elaborada para registrar a decisões tomadas e ser utilizada como apoio ao planejamento da produção.

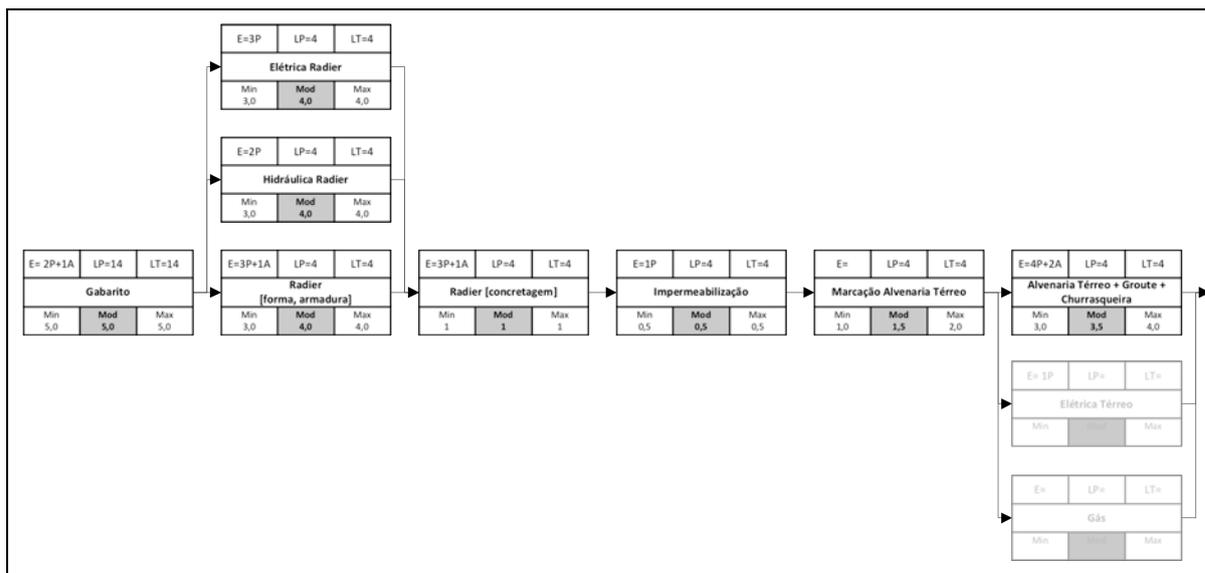


Figura 62: detalhe do diagrama de sequência de execução padronizada para a unidade-base do empreendimento Y1

No início do estudo já se dispunha de um plano de longo prazo para o empreendimento (executado no MS-Project®), que havia sido elaborado pelo engenheiro de planejamento da empresa. Com base na comparação entre a seqüência de execução da unidade-base originalmente prevista neste plano e aquela resultado das discussões, percebeu-se que algumas atividades não haviam sido consideradas no primeiro, bem como o seqüenciamento de algumas atividades acabou sendo alterado, em função das discussões entre os subempreiteiros durante as reuniões. Um exemplo disto foi a atividade de execução de cobertura. A mesma havia sido prevista originalmente em uma fase única a ser executada imediatamente a conclusão da alvenaria de sótão. Entretanto, após as discussões, percebeu-se a necessidade de dividi-la em três etapas em função do seu inter-relacionamento com a execução da alvenaria (chumbamento de beirais).

Na etapa seguinte foi definida a estratégia de ataque do empreendimento. Com base no plano de vendas, que estabelecia que o empreendimento era dividido em três fases, foram estabelecidos os como se dariam os fluxos de trabalho das equipes em cada uma das fases. A figura 63 apresenta um esquema da estratégia de ataque definida para o empreendimento.



Figura 63: estratégia de ataque do empreendimento Y1

Os estudos dos fluxos de trabalho na unidade-base e no empreendimento foram desenvolvidos concomitantemente ao invés de separadamente, como estabelecido no modelo de elaboração do PSP. Tal decisão se deu por que, em função da unidade-base ser representada por um conjunto de quatro casas, era mais relevante avaliar os impactos dos tempos de ciclo estabelecidos na definição da seqüência de execução da unidade-base no todo e não isoladamente. Para tanto, utilizou-se a técnica da linha de balanço. Foram elaboradas três linhas de balanço, uma para cada fase do empreendimento.

Durante esta etapa, o processo de elaboração da linha de balanço serviu como avaliar alternativas propostas pelos participantes. Desta forma, as definições com relação aos ritmos dos processos, tamanhos dos lotes de produção e transferência, bem como do pré-dimensionamento das equipes de produção eram avaliadas pelos participantes. Ao final das discussões, foi estabelecida a versão final da linha de balanço que representava o estudo dos fluxos de trabalho no empreendimento. A figura 64 apresenta a linha de balanço elaborada para a primeira fase do empreendimento Y1.

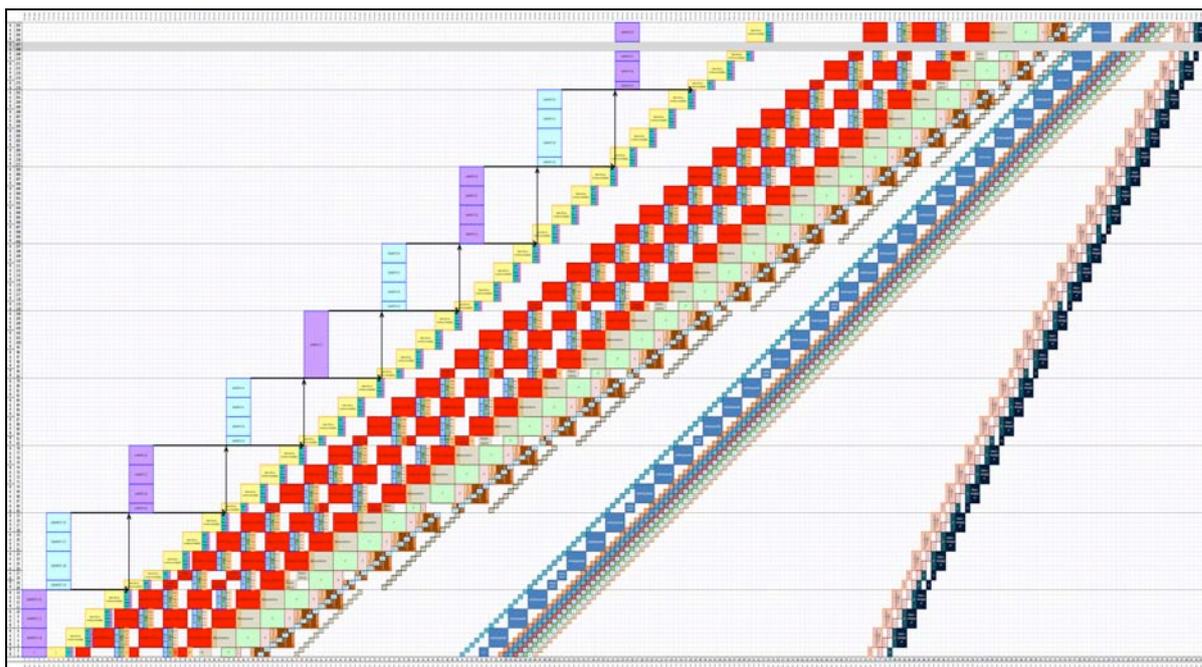


Figura 64: estudo dos fluxos de trabalho na fase 01 do empreendimento Y1

Durante o desenvolvimento do estudo dos fluxos de trabalho do empreendimento, alguns conceitos foram discutidos. Um deles foi o conceito de balanceamento do ritmo dos processos produtivos. Por exemplo, para o processo de elevação de alvenaria, composto pela execução de alvenaria de pavimento térreo, segundo pavimento e sótão, optou-se pela manutenção de um tempo de ciclo igual a cinco dias para todos os pavimentos, embora as áreas de alvenaria fossem diferentes (térreo possuía 45,40 m², superior possuía 35,22 m² e sótão possuía 14,77 m²). Para tanto, as equipes de produção foram dimensionadas com números diferentes de componentes, de forma a compensar essas diferenças e balancear os três processos, reduzindo a formação de estoques em processo, que se originaria no caso de um desbalanceamento. Este tempo de ciclo de 05 dias foi utilizado para balancear os principais processos produtivos da primeira etapa de execução (rebocos interno e externo, cobertura, revestimento de gesso em teto, entre outros).

Durante a elaboração da linha de balanço, as decisões quanto ao momento de início de alguns processos buscaram criar condições para que as equipes envolvidas pudessem manter seu fluxo de trabalho sem interrupções. Desta forma, fluxos de trabalho ininterruptos foram priorizados em detrimento ao fluxo contínuo do produto (unidades-base), aumentando, assim, o volume de trabalho em progresso no empreendimento. Em vários processos (assentamento cerâmico, gesso corrido de teto, esquadrias, entre outros), optou-se por atrasar seu início como

forma de garantir que as equipes pudessem executar suas atividades sem interrupções. Esta opção deu-se, principalmente, pela necessidade de manutenção dessas equipes mobilizadas na obra, evitando o risco de que elas fossem desmobilizadas e estivessem indisponíveis quando da necessidade de retorno às suas atividades no canteiro.

Com base nas demandas geradas pela estratégia de ataque e pelos ritmos estabelecidos, foi necessário avaliar se o fornecedor de lajes pré-fabricadas tinha capacidade de atender à obra. Segundo o fornecedor, sua capacidade de produção era o equivalente a, no máximo, lajes para 16 casas ao mês, que era superior à demanda da obra. Contudo, era necessário negociar com esse fornecedor frente à necessidade de redução do tamanho do lote de entrega de lajes que era de 08 pavimentos iguais por vez (térreos, superiores ou sótãos). De acordo com a estratégia de ataque proposta, eram necessárias entregas de lajes em lotes de 04 unidades, oscilando entre um e outro tipo. Tendo como base a linha de balanço, procedeu-se uma reunião com o referido fornecedor na qual foi estabelecida a forma de entrega das lajes em obra, de acordo com a necessidade.

Ainda com base no estudo dos fluxos de trabalho da fase 01, foram estabelecidas também as datas de execução das atividades de urbanização (pavimentações, redes água, paisagismo, entre outros), bem como de construção dos prédios de uso comum (clube, piscina, salão de festas, acessos, guaritas, entre outros). Alguns desses prazos foram estabelecidos com base em restrições (interdependências) advindas do estudo dos fluxos de trabalho das unidades habitacionais.

O estudo dos fluxos de trabalho foi estendido às demais fases do empreendimento. Para tanto, foram analisados os impactos de 03 opções, que diferiam quanto ao momento de início das duas fases seguintes em relação à conclusão da fase 01, que, por sua vez, impactava na maior ou menor necessidade de recursos (equipes especializadas) e no prazo final de cada etapa frente aos prazos de entrega ao cliente. A partir destas discussões, foi selecionada a opção que previa o início da fase 02 aproximadamente 60 dias antes da conclusão da alvenaria na fase 01 (Figura 65). Esta opção foi selecionada pois havia uma expectativa no aumento do ritmo na execução do processo de elevação de alvenaria, em função do efeito aprendizagem, o que tornaria possível a alocação de uma única equipe para as três fases. Nota-se que a opção não garante o fluxo ininterrupto dos recursos de produção entre fases, embora houvesse uma expectativa de que, na prática, isto fosse possível.

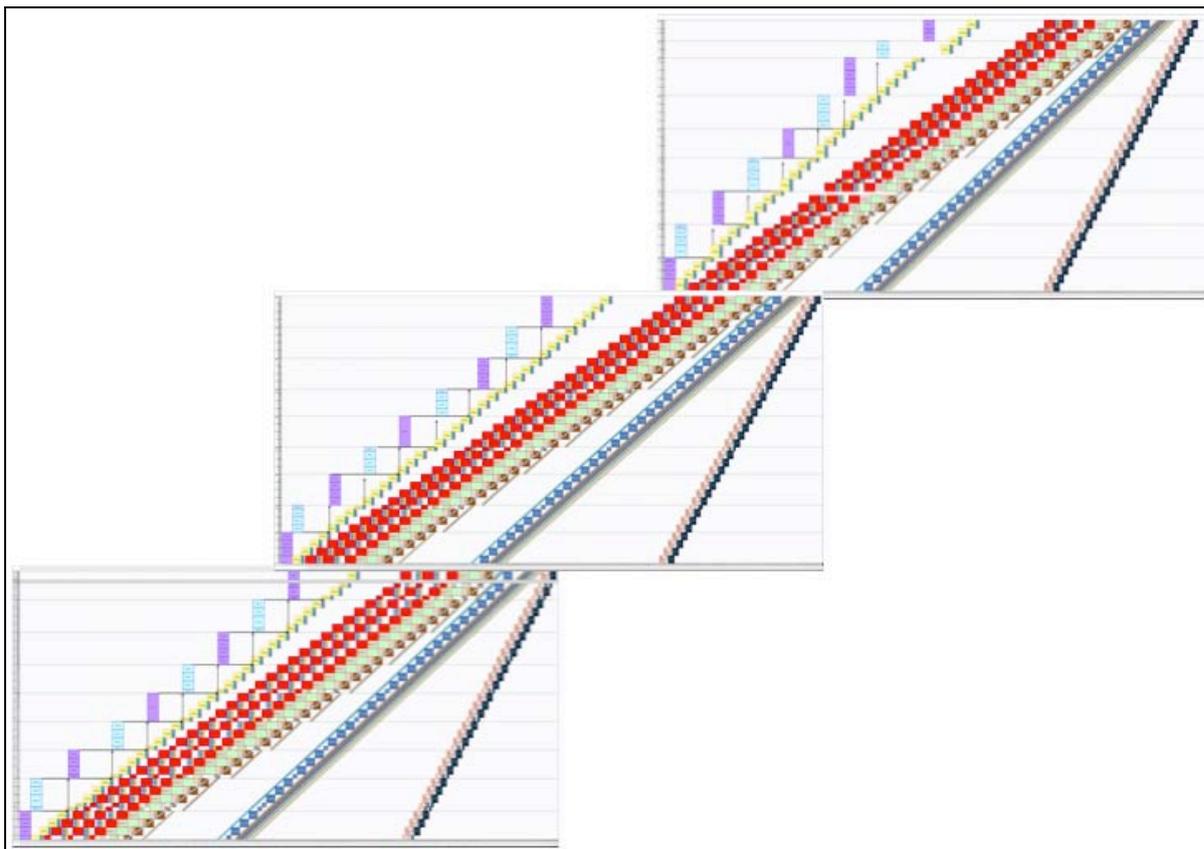


Figura 65: linha de balanço da execução das três fases do empreendimento Y1

Tendo como base o estudo dos fluxos de trabalho do empreendimento, procedeu-se a formalização do estudo do leiaute do canteiro, adequado ao plano de ataque do empreendimento. Foram estabelecidas as localizações dos estoques de blocos, argamassa de assentamento, silos e bombas de argamassa de revestimento, escritório, central de aço e preparação de kits hidráulicos, bem como a localização de tapumes. Assim, de acordo com a evolução do empreendimento, a localização das instalações tinha também um caráter evolutivo. Foi proposto e implementado um painel magnético, no qual os elementos do layout foram confeccionados com papel magnetizado e fixados sobre a planta de implantação disposta em uma chapa metálica, permitindo a atualização da localização das instalações conforme a fase da execução. A figura 66 mostra uma foto do referido painel, localizado no escritório do empreendimento Y1.

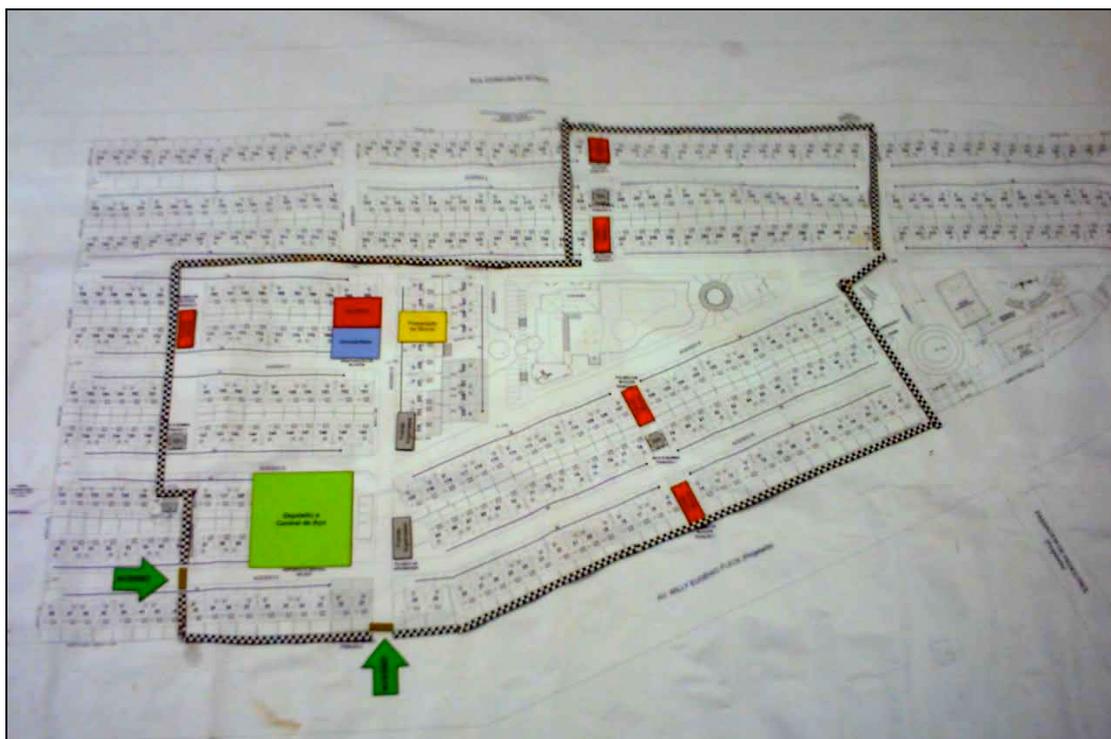


Figura 66: estudo de leiaute do canteiro do empreendimento Y1

A identificação e projeto de processos críticos foi parcialmente realizada. O processo de elevação de alvenaria foi identificado como crítico na execução do empreendimento. O fornecedor de blocos de concreto foi convidado a participar da reunião. As discussões realizadas focaram basicamente no estabelecimento de condições operacionais para a execução do processo e não na execução do processo em si: dimensionamento do número de caminhões para a descarga e movimentação dos paletes de blocos no canteiro, dimensionamento de um estoque de segurança de blocos; frequência de entrega, criação de uma central para colocação de caixas elétricas nos blocos antes da execução da alvenaria e a especificação dos tipos de blocos por carregamento, com base na seqüência de execução das casas.

Como apresentado anteriormente, a empresa empregava um sistema de ERP para a gestão integrada de seus empreendimentos. Algumas informações inseridas nesse sistema tiveram origem no PSP do empreendimento. Por exemplo, as datas de início e conclusão dos principais processos foram utilizadas para definir as programações de contratação de fornecedores e compra de materiais.

Outra característica do sistema de ERP era que o controle do avanço físico da obra se dava com base em percentuais executados. Esta forma de controle, entretanto, não garantia a

aderência às principais decisões do PSP. Desta forma, discutiu-se a necessidade de criar formas para que as decisões tomadas durante o processo pudessem ser efetivamente operacionalizadas e controladas. Buscou-se ressaltar a importância de controlar a aderência ao plano de ataque, aos lotes de produção, aos ritmos e à seqüência de execução da unidade-base que haviam sido definidas, e que o controle de avanço físico deveria ser feito com base unidades-base concluídas.

Ressaltou-se ainda a importância do planejamento e controle da produção, especialmente os horizontes de médio e curto prazos. Durante o planejamento de médio prazo era necessário remover as restrições de forma a viabilizar a consecução da seqüência de execução padronizada das unidades-base, o seguimento do plano de ataque do empreendimento (recursos, espaço, projetos, entre outros), fornecendo as capacidades necessárias para o alcance dos ritmos de produção planejados, além de controlar o avanço físico e avaliar ações corretivas de recuperação de atrasos. Já o planejamento de curto prazo tinha como função principal a programação das atividades de acordo com a seqüência de execução e tempos de ciclo, controlando os ritmos de produção planejados.

Para auxiliar o processo de controle, foi elaborada uma ferramenta de monitoramento de avanço físico e da aderência ao plano de ataque do empreendimento. Para tanto, foram selecionados processos considerados críticos para a manutenção do prazo previsto para o empreendimento. Esses processos eram: concretagem de *radier*; elevação de alvenaria térreo; montagem de lajes; reboco externo; reboco interno; cobertura; aplicação de textura; pintura interna; colocação de esquadrias e colocação de metais e interligações. Nesta ferramenta deveriam ser preenchidos o número de casas concluídas a cada dia, dados (conforme a seqüência prevista no plano de ataque).

6.5.1.2 Desenvolvimento da Fase Dinâmica do PSP

Após a conclusão do PSP do empreendimento, foi desenvolvido um modelo de simulação com a finalidade de explorar diferentes cenários de execução, entre eles as opções relativas ao início da fase seguinte. Este modelo foi desenvolvido utilizando o módulo genérico de simulação proposto durante o estudo de caso 01. O modelo foi construído tendo como base a seqüência de execução da unidade-base do empreendimento. O tempo de desenvolvimento do modelo original foi de aproximadamente 30 horas, incluindo a configuração das planilhas de

entrada e saída de dados e sua conclusão ocorreu no final de novembro de 2009. A figura 67 apresenta parte do modelo construído para o empreendimento Y1.

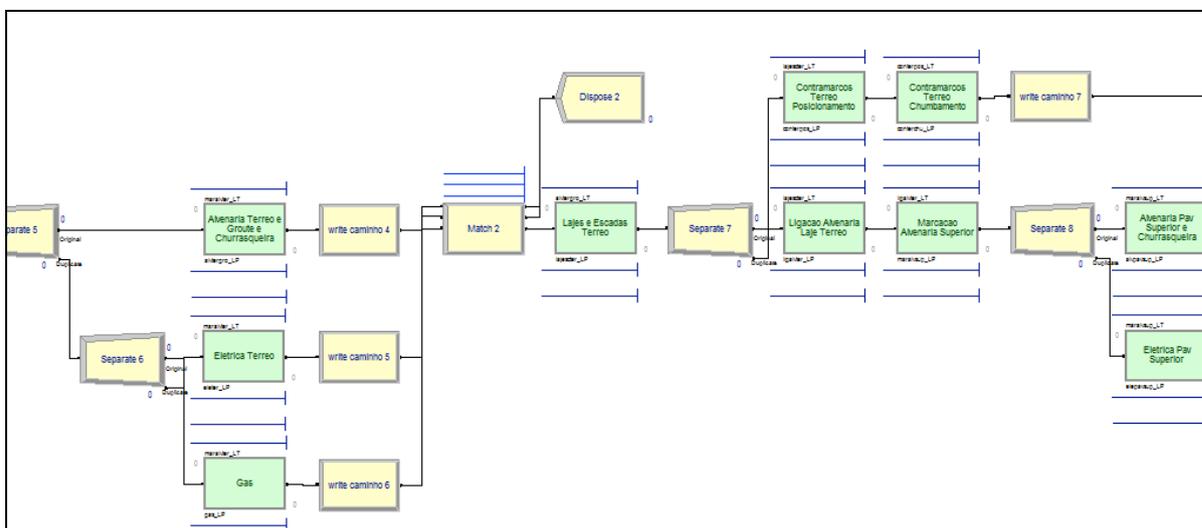


Figura 67: parte do modelo de simulação do empreendimento Y1

A primeira versão do modelo foi construída de forma a possibilitar a simulação da execução das 400 unidades do empreendimento de forma seqüencial. Entretanto, o elevado número de entidades simultaneamente presentes no modelo durante a simulação ultrapassou o número máximo de entidades permitido pelo *software* de simulação, impossibilitando o uso do modelo. Desta forma, uma vez que a estratégia de ataque do empreendimento previa a possibilidade de execução das 03 fases, optou-se por construir-se modelos independentes de cada uma das 03 fases no mesmo modelo.

O principal problema desta abordagem é que ao simular de cada fase do empreendimento de forma independente não era possível avaliar impactos do compartilhamento de recursos (equipes e equipamentos) entre as três fases.

Embora esta fosse uma restrição importante, uma mudança na estratégia de ataque do empreendimento promovida pela empresa minimizou este impacto. Com o passar dos primeiros meses de execução, uma série de dificuldades foram enfrentadas pela empresa no sentido de efetivamente operacionalizar a estratégia de execução prevista. Problemas relacionados à capacidade produtiva do subempreiteiro geral do empreendimento, no que dizia respeito à disponibilização do número mínimo de pedreiros para execução do processo de elevação de alvenaria, combinado com problemas relativos ao projeto das lajes pré-

fabricadas, fizeram com que o plano de ataque do empreendimento fosse alterado. Ao invés da execução das alvenarias de térreo, segundo pavimento e sótão de forma sucessiva – intercalados pela colocação de lajes pré-fabricadas e outros processos necessários – houve um avanço na execução de alvenarias de térreo, o que gerou um aumento da quantidade de trabalho em progresso, sem a necessária liberação para execução das demais atividades necessárias à conclusão das unidades.

Embora houvesse sido proposta a planilha de controle de avanço físico para o empreendimento, a empresa não a havia empregado efetivamente. O controle de avanço físico era realizado através do sistema de ERP que fazia o controle por percentual executado. A partir da observação direta do canteiro, foi realizada uma avaliação do avanço físico dos processos de elevação de alvenaria e montagem de lajes com base nas decisões do PSP. Para tanto utilizou-se como base os ritmos de produção estabelecidos no PSP. Com base nos dados coletados em obra, havia, até aquele momento (início de janeiro de 2009), 32 pavimentos térreos com alvenarias concluídas, 30 lajes de pavimento térreo, 2 alvenarias e 2 lajes de pavimentos superiores concluídos. De acordo com a planilha de controle, deviam ter sido concluídas até aquela data 64 alvenarias de térreo, 58 lajes de térreo, 54 alvenarias superiores, 50 lajes superiores, entre outros processos.

Frente a estas dificuldades e à perspectiva de incapacidade do subempreiteiro geral em apresentar uma alternativa de recuperação dos atrasos, a empresa Y solicitou estudos com relação à possibilidade subdivisão da fase 01 do empreendimento em três zonas e a sua execução por três diferentes subempreiteiros. Desta forma, procedeu-se a adaptação do modelo existente para a situação pretendida. Uma vez que as três zonas eram executadas de forma totalmente independente, ou seja, a cada uma foram alocados recursos produtivos exclusivos, o modelo foi utilizado individualmente por zona de trabalho e os dados de saída reunidos em uma linha de balanço única.

Uma reunião com um especialista em alvenaria estrutural foi realizada, na qual foram coletados valores de referência quanto à produtividade das equipes de produção ao longo do tempo. Estes dados foram utilizados para atualizar os valores dos tempos de ciclo até então considerados. Algumas pequenas modificações nas precedências das atividades foram realizadas, adequando o modelo às condições encontradas na obra.

Em cada modelo foram considerados os processos que já haviam sido concluídos até aquele momento (execução de *radiers*, alvenarias de térreo e colocação de algumas lajes), bem como as datas previstas para a contratação dos novos empreiteiros. A figura 68 apresenta a linha de balanço gerada a partir dos dados de saída do modelo de simulação (para sua construção foram utilizadas as médias obtidas).

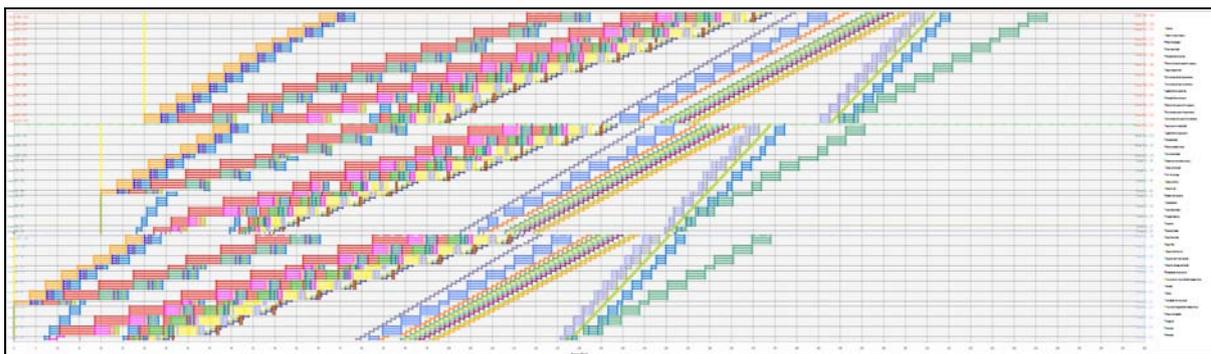


Figura 68: linha de balanço gerada para a fase 01 do empreendimento Y1

As únicas informações requeridas pela empresa a partir dos resultados da simulação foram as datas de término da execução de cada uma das zonas da fase 01. Outras avaliações, como possibilidades de redução de prazos a partir da redução da parcela de atividades que não agregavam valor através da redução dos tamanhos dos lotes ou focar na implementação do conceito de fluxo contínuo em detrimento ao fluxo ininterrupto dos recursos, por exemplo, não foram cogitadas. As informações da simulação foram reunidas em um gráfico de Gantt (figura 69) dos principais processos produtivos que acompanhou a linha de balanço gerada.

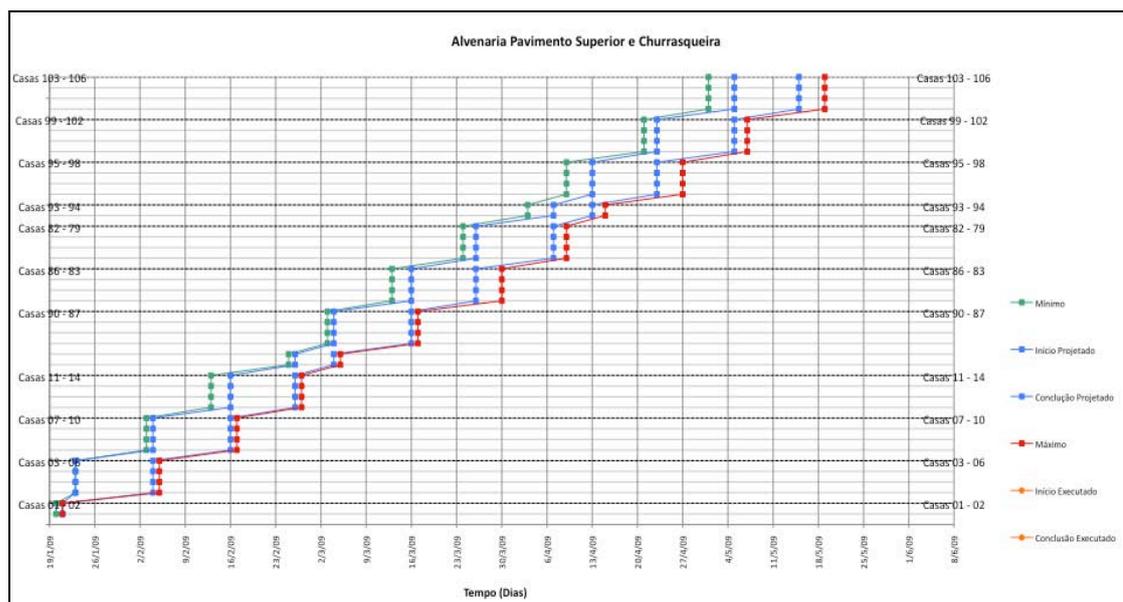


Figura 70: exemplo de gráfico de controle de avanço físico do empreendimento Y1

Posteriormente, foi solicitada uma extensão do estudo para a fase 02 do empreendimento. O procedimento executado foi o mesmo, considerando que seriam utilizados os mesmos subempreiteiros contratados para a execução da fase 01. A figura 71 apresenta a linha de balanço da fase 02 do empreendimento. É importante salientar que embora tenham sido apresentadas separadamente, as linhas de balanço das fases 01 e 02 consideravam a manutenção de um fluxo de trabalho ininterrupto das equipes de cada subempreiteiro.

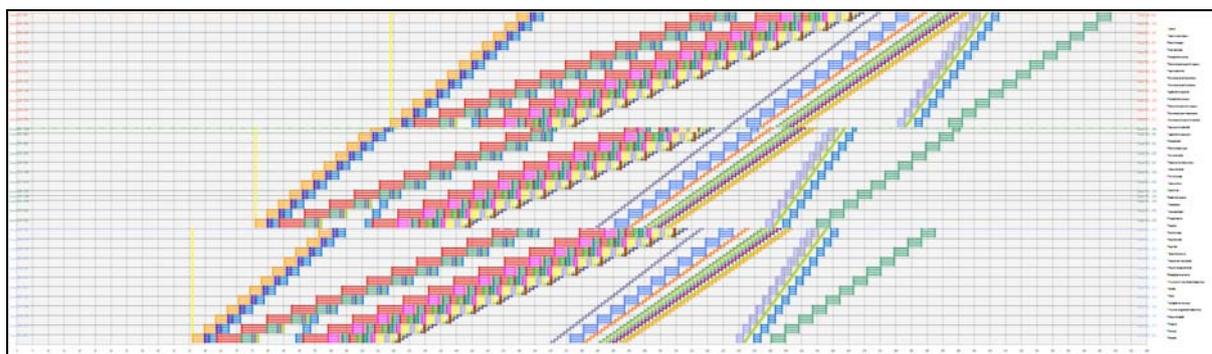


Figura 71: linha de balanço gerada para a fase 02 do empreendimento Y1

6.5.2 Avaliação do Estudo de Caso 3

6.5.2.1 Utilidade

Com relação à **contribuição do PSP para a percepção da necessidade de tomada de decisão de forma conectada**, o PSP contribuiu para que algumas decisões fosse tomadas ou revistas com base na participação de diversos participantes, como os metros-de-obras da empresa e do subempreiteiro geral e os principais subempreiteiros. Esses foram chamados à avaliar e sugerir modificações, por exemplo, na seqüência de execução da unidade-base do empreendimento. Durante estas reuniões os subempreiteiros interagiam entre si e com a equipe da empresa buscando solucionar interferências entre seus processos, bem como com relação aos tempos de ciclo e dimensionamento das equipes de produção que seriam disponibilizadas.

Ainda durante as discussões, foram identificados aspectos nos quais os projetos disponíveis não estavam claros ou nos quais havia falta de definições a respeito. Nesse sentido, alguns projetistas, como o de alvenaria estrutural e estrutura de concreto armado, também tomaram parte das reuniões. Nessas reuniões foram solicitados detalhamentos de alguns elementos ou sugeridas opções construtivas que pudessem facilitar sua execução para consideração.

Ainda com relação à necessidade de avaliar os impactos de decisões isolada de forma conectada, isto pôde ser verificado, especialmente, em dois momentos. Primeiro, na necessidade de rediscutir o contrato de fornecimento de lajes pré-moldadas com o respectivo fornecedor uma vez que a composição dos lotes e a frequência de entrega de lajes no canteiro não viabilizou a consecução da estratégia de ataque definida para o empreendimento no PSP. Segundo, o aumento número de subempreiteiros durante a primeira fase do empreendimento só foi decidido após a avaliação do impacto que esta decisão poderia trazer na redução do prazo do empreendimento.

Outro aspecto pertinente foi a demanda por parte da equipe da empresa por incluir e relacionar ao estudo dos fluxos de trabalho do empreendimento (que considerava basicamente os processos repetitivos de execução das unidades-base) os processos de urbanização (pavimentação de ruas e execução de praças, por exemplo) e construção das edificações de uso comum (clubes, portarias, playground, entre outros).

No que diz respeito à **utilização do PSP como referência na tomada de decisão na gestão do empreendimento**, durante o estudo algumas ocorrências evidenciaram a utilização do PSP no apoio à tomada de decisão. As informações de início e conclusão dos principais processos produtivos, definidas a partir do estudo dos fluxos de trabalho do empreendimento, foram utilizadas para alimentar o sistema de ERP da empresa, balizando as datas de contratação de fornecedores e compra de materiais evidenciou a utilização do PSP como referência na gestão do empreendimento. Ainda, as negociações com fornecedores (blocos de concreto e lajes pré-moldadas, por exemplo) foram balizadas pelas necessidades geradas no estudo.

Antes da elaboração do estudo, a equipe da empresa empregava um gráfico de Gantt como ferramenta para representar o plano de longo prazo do empreendimento. A partir da elaboração da linha de balanço, esta passou a ser utilizado como referência. Segundo a opinião dos envolvidos, questionados durante as reuniões, a linha de balanço conferia maior transparência aos fluxos de trabalho do empreendimento, permitindo um melhor entendimento dos impactos das decisões tomadas.

Já no planejamento de médio prazo, por exemplo, cujo horizonte de planejamento era de três meses, sendo que o primeiro mês detalhado por dia e os dois meses seguintes agregados por semana, tanto a seqüência de execução da unidade-base como a linha de balanço eram utilizadas pela equipe da empresa para apoiar a sua elaboração.

Também, como já relatado, várias negociações com fornecedores e subempreiteiros foram procedidas com base no PSP. Estas negociações disseram respeito, entre outros: ao número e composição das equipes disponibilizadas no canteiro; ao tamanho, freqüência e composição dos lotes de materiais entregues no canteiro; ritmos de produção necessários.

Ainda durante o estudo de caso, o engenheiro de planejamento da empresa demonstrou interesse em realizar o PSP em um terceiro empreendimento, que não fazia parte do projeto no qual o presente estudo estava inserido. Este empreendimento, foi alvo do estudo de caso 4 desta tese.

Ainda, as dificuldades com relação à operacionalização do PSP também evidenciaram a utilização das informações do PSP na tomada de decisão. Com base na avaliação das informações da linha de balanço, verificou-se a falta de aderência ao plano de ataque do empreendimento e aos ritmos definidos para o processo de elevação de alvenaria, levando à

dispensa do subempreiteiro e a contratação de outras três empresas, que dividiram a execução da fase 01.

Quanto à **contribuição para a sistematização do processo de tomada de decisão**, a seqüência de decisões aderiu àquela prevista no modelo de elaboração. A partir da definição da seqüência de execução da unidade-base, entretanto, definiu-se a estratégia de ataque do empreendimento para então desenvolver os estudos de fluxos de trabalho na unidade-base e no empreendimento e o dimensionamento da capacidade dos recursos e produção de forma conjunta. No caso do empreendimento Y1, conforme já apresentado, os estudos do fluxo de trabalho na unidade-base aconteceu paralelamente ao do empreendimento, uma vez que sua definição dependia da avaliação do impacto no todo. Esta necessidade também relacionava-se à tipologia das unidades-base, casas assobradadas, uma vez que em empreendimento cuja tipologia das unidades-bases são edifícios, torna-se importante o estudo dos fluxos de trabalho primeiro nesta unidade para então expandi-lo ao empreendimento.

Com relação ao envolvimento dos participantes na consecução das demandas surgidas durante o processo, com base na observação participante, pode-se dizer que o processo foi conduzido em grande parte pela equipe de pesquisa. Ao longo do estudo, percebeu-se que a equipe da empresa estava envolvida em outras atividades atinentes ao empreendimento estudado, uma vez que o estudo transcorreu concomitantemente com o início da fase de execução das casas, ou a outros empreendimentos da empresa. Este envolvimento limitado, algumas vezes, ocasionou a não realização de reuniões agendadas ou a não consecução de tarefas (obtenção de informações, por exemplo) a cargo da equipe da empresa e acabou gerando um aumento no tempo necessário para a conclusão do estudo.

Assim como nos estudos anteriores, durante o estudo, alguns conceitos de gestão da produção foram introduzidos, principalmente durante a elaboração do estudo dos fluxos de trabalho. Além dos conceitos de lotes de produção e transferência, bem como os benefícios da redução do tamanho dos lotes para redução da parcela de atividades que não agregam valor ao produto, discutidos e demonstrados a partir da utilização da linha de balanço, esta ferramenta permitiu também a discussão do conceito de balanceamento entre processos. Por exemplo, em alguns pontos da seqüência de execução da unidade-base optou-se por estabelecer um balanceamento entre processos através da adoção de um tempo de ciclo comum a eles. Neste caso, optou-se pelo redimensionamento da equipe responsável por um dado processo, de forma a permitir a adequação do seu tempo de ciclo ao dos demais processos. Desta forma,

buscou-se uma solução conciliadora entre a manutenção de um fluxo de trabalho ininterrupto das equipes de produção (aumentando a taxa de utilização das mesmas) e o fluxo contínuo das unidades habitacionais.

A forma de entrega do empreendimento, em três fases com aproximadamente 130 unidades por fase, também suscitou uma discussão acerca dos impactos desta decisão no aumento nos estoques de casas em processo e concluídas.

Por fim, quanto à **contribuição do emprego da simulação para o processo de tomada de decisão**, esperava-se que, a partir da conclusão da fase determinística do estudo, estivessem disponíveis os dados necessários para a construção do modelo de simulação e que seu emprego permitisse avaliar diferentes cenários para as fases 02 e 03 do empreendimento, uma vez que a fase 01 já havia sido iniciada.

Entretanto, o emprego efetivo do modelo de simulação ocorreu em função dos problemas enfrentados pela empresa na execução da primeira fase da obra e não como parte da elaboração do PSP do empreendimento. Ao contrário dos estudos de caso 1 e 2, nos quais os participantes envolveram-se no processo de desenvolvimento do modelo e na proposição de diferentes cenários a serem simulados, a equipe da empresa não participou do processo de desenvolvimento do modelo. Apenas o engenheiro de planejamento contribuiu na validação do modelo e na definição de cenários a serem simulados.

Como descrito anteriormente apenas um cenário foi simulado e os únicos dados do modelo de simulação requeridos pelo engenheiro de planejamento diziam respeito às datas de conclusão das fases do empreendimento frente à substituição do subempreiteiro geral por outros três. Não houve interesse em utilizar a ferramenta para testar e analisar estratégias alternativas, que não envolvessem simplesmente o aumento de recursos produtivos.

Contudo, embora bastante restrito, o estudo indicou que a simulação pode ter um importante papel no teste de estratégias de recuperação de atrasos na execução. Nesse caso, o modelo de simulação permitiu com relativa agilidade avaliar os resultados que uma determinada estratégia proposta pela empresa teria na consecução dos prazos definidos originalmente e sua respectiva implementação.

É importante ressaltar que não havia perspectiva de curto prazo para a avaliação da reutilização do modelo de simulação desenvolvido para o empreendimento. Desta forma, não

foi possível avaliar os benefícios desta estratégia neste estudo de caso. Entretanto, o módulo genérico proposto no estudo de caso 1 foi utilizado com sucesso no desenvolvimento do modelo deste estudo.

6.5.2.2 Facilidade de Uso

No que diz respeito à **iniciativa dos participantes no processo de modelagem**, grande parte das iniciativas no processo de modelagem do sistema de produção do empreendimento partiram da equipe de pesquisa. Durante o estudo, a equipe da empresa limitou-se à participar das reuniões e da consecução das etapas previstas para a elaboração do PSP. Este papel passivo no processo, como já comentado, deveu-se, principalmente, ao envolvimento da referida equipe com outras demandas da gestão do próprio empreendimento Y1, bem como de outros empreendimento da empresa. Poucas propostas, como a ampliação do escopo do estudo dos fluxos de trabalho do empreendimento com a inclusão das áreas de uso comum e urbanização e do teste dos resultados da divisão do empreendimento entre diferentes subempreiteiros, partiram da equipe de produção.

Quanto à **extensão do processo de elaboração**, foram despendidas trinta horas para a elaboração do PSP na fase determinística, mais trinta horas de preparação das reuniões. Este esforço é maior do que o despendido nos estudos que originaram o modelo de elaboração, mesmo que o tempo de desenvolvimento do modelo de simulação não tenha sido de incluído neste. Embora maior, considerou-se que o esforço despendido é compatível com o tamanho do empreendimento (400 unidades habitacionais contra aproximadamente 100 nos estudos que originaram o modelo), bem como quanto ao número de intervenientes (equipe de gestão da empresa mais representantes dos subempreiteiros e fornecedores). Ainda contribuiu para este tempo de desenvolvimento o fato de que todas as ferramentas foram elaboradas pela equipe de pesquisa enquanto esta realizava outro estudo de caso em paralelo.

Percebe-se que a maior parte das horas na fase determinística do estudo (18 horas de reuniões e 20 horas de preparação) foram despendidas nos estudos dos fluxos de trabalho da unidade-base e do empreendimento e no dimensionamento da capacidade dos recursos de produção. Esta ênfase evidenciou uma tendência da equipe da empresa em valorizar estas decisões em detrimento das demais. Com base na observação das reuniões do PSP, a linha de balanço era a ferramenta mais utilizada e mencionada ao longo do processo. Quando questionados sobre os

benefícios do PSP, a equipe da empresa referia-se, em primeiro lugar, aos benefícios do emprego da linha de balanço como ferramenta de planejamento.

Já o desenvolvimento do modelo de simulação despendeu aproximadamente quarenta horas para a sua consecução e discussão dos resultados. Este tempo é bem menor que o tempo necessário para o desenvolvimento do modelo elaborado no estudo de caso 1 (no caso 80 horas). Neste caso, esta redução se deveu ao fato de que a equipe de pesquisa já tinha maior domínio do processo de modelagem e que todos os dados necessários para a elaboração do modelo já haviam sido definidos na fase determinística do estudo, não havendo necessidade das inúmeras revisões no modelo como aconteceu no primeiro estudo de caso.

Assim, se por um lado a estratégia de segmentar o estudo em duas fases contribuiu para tornar o processo de modelagem mais objetivo, uma vez que as informações necessárias já haviam sido definidas, por outro lado, acabou por concentrar as atenções e esforços nas discussões na primeira fase, relegando a simulação a um papel coadjuvante ou secundário no estudo.

Já quanto à **contribuição para a comunicação e entendimento das decisões entre os participantes**, como anteriormente discutido, a linha de balanço foi a ferramenta mais empregada durante as discussões entre os participantes. Esta ferramenta apoiou as discussões entre o membros da equipe da empresa, bem como com subempreiteiros. Esta ferramenta também foi utilizada no planejamento de médio prazo do empreendimento, assim como o diagrama de seqüência de execução da unidade-base.

Entretanto, tanto o engenheiro-coordenador quanto o gerente regional da empresa fizeram críticas com relação ao detalhamento da linha de balanço e a dificuldade de leitura frente ao número de processos que a compunham. Este fato levou à solicitação da elaboração de um cronograma do empreendimento utilizando um gráfico de Gantt contendo as datas de início e conclusão dos processos, com base na linha de balanço, como forma de fornecer mais rapidamente as datas-marco do planejamento.

A ferramenta de monitoramento do avanço físico do empreendimento, elaborada ao final do estudo, não foi efetivamente utilizada para auxiliar o planejamento e controle da produção. Embora a ferramenta houvesse sido disponibilizada para cada um dos membros da equipe de produção da empresa imediatamente após a conclusão da fase determinística, sua utilidade só foi percebida durante uma visita da equipe de pesquisa ao empreendimento, dois meses após a conclusão da primeira etapa do estudo. Naquela oportunidade, quando a ferramenta foi

utilizada pelos pesquisadores para avaliar a aderência entre as atividades planejadas e executadas, a equipe da empresa solicitou que a mesma fosse disponibilizada, uma vez que os mesmos não tinham conhecimento da sua existência.

Entretanto, a partir da substituição do engenheiro de obra que originalmente participou da elaboração do estudo, o papel do PSP de formalização de decisões sobre o sistema de produção do empreendimento ficou evidenciado. O novo engenheiro solicitou o envio das ferramentas elaboradas como forma de apoiá-lo na compreensão das decisões que haviam sido tomadas anteriormente, bem como no processo de planejamento e controle da produção.

Por fim, quanto à **possibilidade de continuação do processo após o estudo**, durante a realização do estudo, a empresa demandou a elaboração do PSP de um terceiro empreendimento (além do segundo empreendimento que fazia parte do projeto de treinamento e capacitação). Entretanto, embora a equipe da empresa tenha exaltado em entrevista os benefícios da elaboração do PSP para a gestão do empreendimento, não se pode afirmar que o processo poderia ser conduzido em empreendimentos futuros sem a participação da equipe de pesquisadores.

Este entendimento baseia-se na postura da equipe da empresa durante o estudo. Como anteriormente afirmado, havia certa passividade da mesma durante a condução do processo, cabendo à equipe de pesquisadores a boa parte das ações necessárias para sua consecução.

6.6 ESTUDO DE CASO 4

6.6.1 Elaboração do PSP do empreendimento

O estudo foi realizado entre novembro de 2008 e junho de 2009. Neste estudo, buscou-se introduzir avanços no processo de elaboração do PSP, a partir da experiência no desenvolvimento do estudo anterior. Duas pessoas que haviam tomado parte no estudo 3, o engenheiro de planejamento e o engenheiro-coordenador, também participaram deste estudo. De fato, a iniciativa para a elaboração do PSP e a inclusão da simulação no escopo do partiu desses profissionais. Ao todo, foram realizadas 18 reuniões com aproximadamente duas horas de duração, num total de 36 horas. A figura 72, a seguir, apresenta um resumo do esforço despendido em horas em cada uma das etapas do processo de elaboração do PSP, assim como seus participantes. Participaram das reuniões, além da equipe de pesquisadores, o engenheiro

de planejamento (eventualmente), o engenheiro-coordenador do empreendimento e o engenheiro de obra, que fora contratado durante o desenvolvimento do estudo e posteriormente substituído próximo à conclusão deste. Também participaram eventualmente das reuniões os fornecedores de blocos de concreto e lajes pré-fabricadas e de argamassa industrializada, além do gerente nacional da empresa, responsável pelos empreendimento no segmento de mercado no qual o empreendimento inseria-se.

Etapa do PSP	Participantes	Número de Reuniões/ Carga horária	Preparação e Apoio ao Processo	Período de Execução
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Definição da Seqüência de Execução da Unidade-base 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Engenheiro de Planejamento ▪ Engenheiro-coordenador ▪ Principais Fornecedores 	03 reuniões (06 horas)	04 horas	novembro/08 a dezembro/08
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pré-dimensionamento da Capacidade dos Recursos de Produção 				
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estudo dos Fluxos de Trabalho na Unidade-base 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Engenheiro de Planejamento ▪ Engenheiro-coordenador 	03 reuniões (06 horas)	02 horas	dezembro/08
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Definição da Estratégia de Ataque do Empreendimento 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Engenheiro-coordenador 	02 reuniões (04 horas)	02 horas	janeiro/09
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estudo dos Fluxos de Trabalho no Empreendimento 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Engenheiro de Planejamento ▪ Engenheiro-coordenador ▪ Engenheiro de Obra 	08 reuniões (16 horas)	12 horas	janeiro/09 a março/09
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dimensionamento da Capacidade dos Recursos de Produção 				
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Identificação e Projeto de Processos Críticos 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Engenheiro-coordenador 	02 reunião (04 horas)	02 horas	março/09
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Desenvolvimento e Emprego do Modelo de Simulação 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Engenheiro-coordenador ▪ Engenheiro de Obra 	126 horas		janeiro/09 a junho/09

Figura 72: esforço despendido na elaboração do PSP no empreendimento Y1

A primeira reunião realizada teve o intuito de conhecer o empreendimento e suas características. A partir da análise dos dados e projetos do empreendimento, foi escolhida uma unidade-base de produção que era um bloco de edifício, no qual os pavimentos representavam subunidades desta. A partir desta definição, passou-se ao estabelecimento de uma seqüência de execução da unidade-base, através da discussão dos processos que deveriam ser executados, bem como das relações de precedência entres eles. Utilizou-se uma planilha para coleta de dados, na qual foram registrados além do nome dos processos, uma estimativa de tempos de ciclo (representados por três valores: duração mínima, duração mais provável e duração máxima) e o pré-dimensionamento das equipes de produção. Para o processo de elevação de alvenaria, considerado crítico, o tempo de ciclo foi obtido a partir de um índice de produtividade esperado por profissional, adotado pela empresa, considerando ainda o efeito aprendizagem ao longo da sua execução (figura 73).

Período	mês 1	mês 2	mês 3
Produtividade	10 m ² /dia	12 m ² /dia	15 m ² /dia

Figura 73: índices de produtividade considerados para o processo alvenaria nos três primeiros meses de execução

A figura 74, abaixo, apresenta parte do diagrama de seqüência de execução elaborado para o empreendimento. A partir da seqüência de execução e ritmos preestabelecidos, foi elaborada uma Linha de Balanço, na qual foram definidas as trajetórias de deslocamento das equipes de produção, se do térreo em direção ao quinto pavimento, ou vice-versa. Ainda, durante as discussões desta etapa, foram realizados alguns ajustes nos tempos de ciclo dos processos, como forma de obter uma sincronização entre alguns processos, tais como elevação de alvenaria e montagem de lajes.

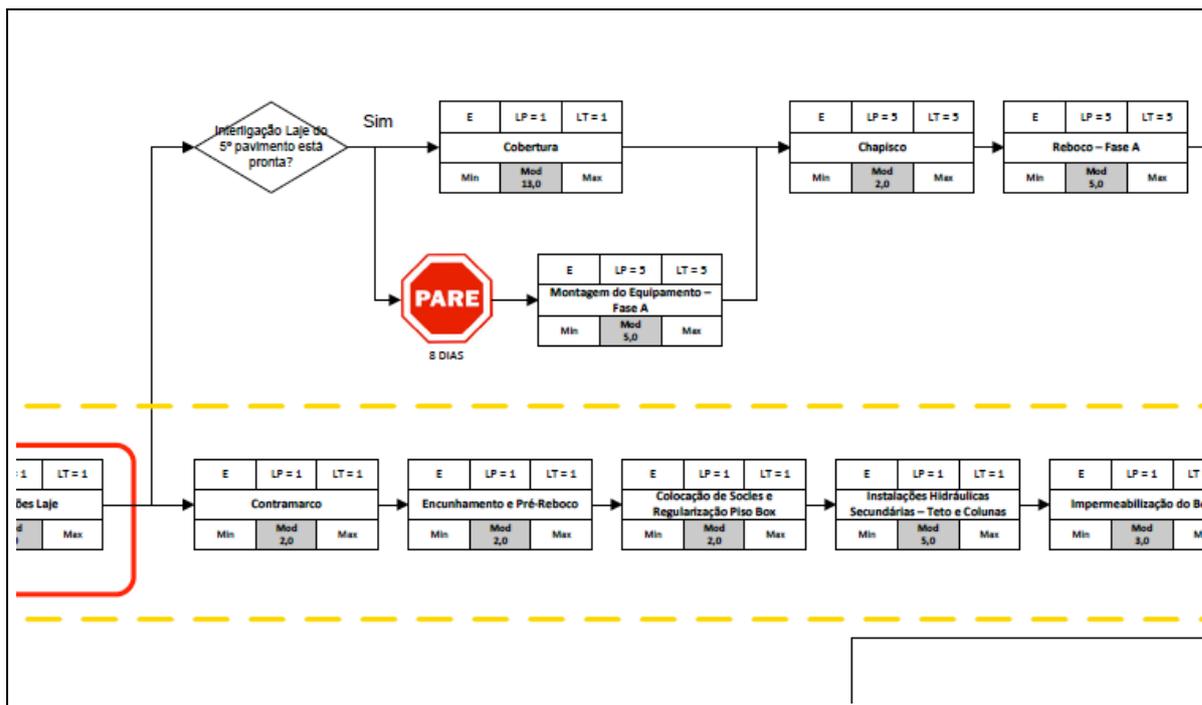


Figura 74: parte do diagrama de sequência de execução elaborado para o empreendimento Y2

Procedeu-se, então, as discussões acerca da definição da estratégia de execução do empreendimento. Foram discutidas algumas estratégias possíveis de execução. Pelo fato do empreendimento ser construído sobre uma área anteriormente destinada a deposição de resíduos oriundos do serviço de coleta pública, havia a necessidade de compactação do terreno, antes da execução do empreendimento. Esta procedimento foi executado por meio do aterramento do terreno e da colocação de uma camada extra de terra (sobreaterro) a fim de proporcionar um carregamento uniformemente distribuído com a finalidade de auxiliar na compactação do aterro. Esta camada de sobreaterro, por sua vez, deveria permanecer sobre o terreno por um período não inferior à nove meses, sendo então retirada. Este aterramento, entretanto, não ocorreu de forma simultânea em toda a extensão do terreno, mas foi executada em três etapas sequenciais. Desta forma, os prazos para início da execução dos blocos estavam condicionados à observância do prazo mínimo de manutenção da camada de sobreaterro.

Desta forma, a seqüência de ataque estabelecida para o empreendimento foi definida com base em três aspectos: (a) nas informações do estudo dos fluxos de trabalho no bloco; (b) nas restrições de início dos blocos em função do prazo de retirada da camada de sobreaterro do terreno; e (c) os impactos da conclusão da execução dos blocos na liberação de áreas para execução da infraestrutura urbana, como também a necessidade de observância dos prazos

mínimos de manutenção da camada de pré-adensamento do terreno. Com base nessas discussões foi definida a seqüência de ataque dos blocos, apresentada na figura 75, a seguir.

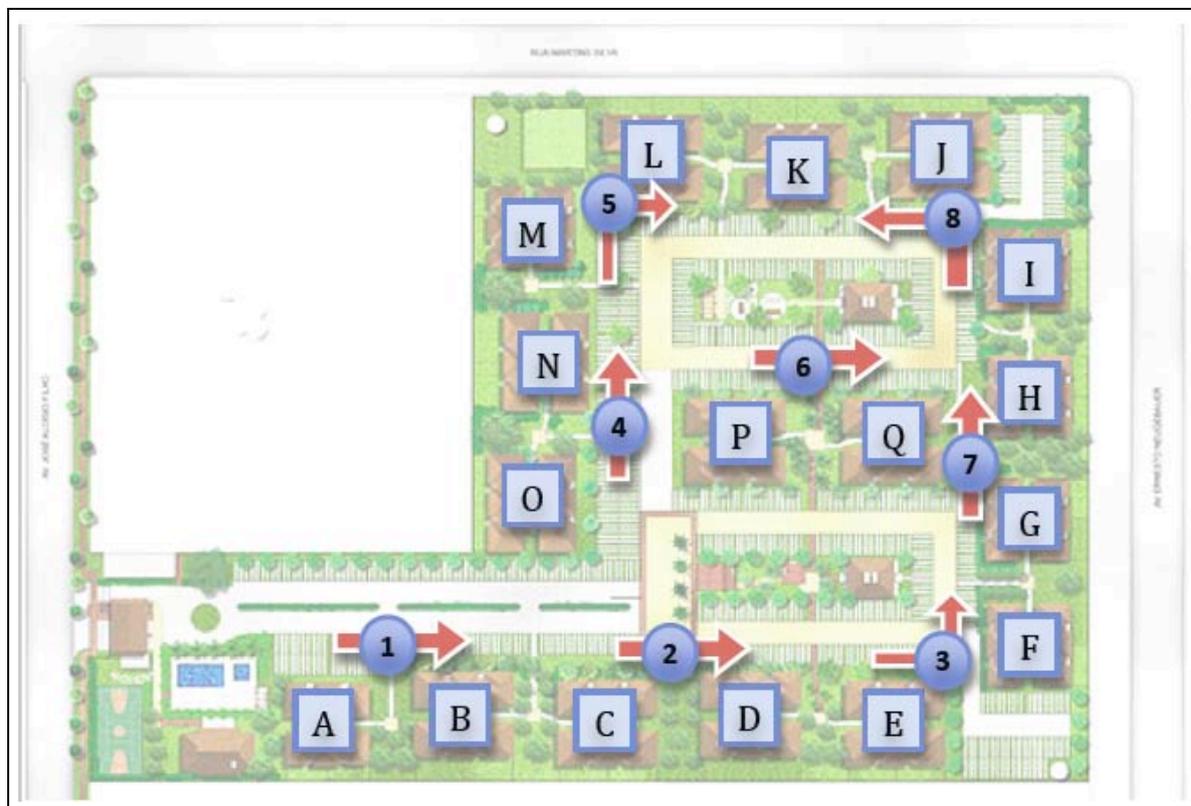


Figura 75: estratégia de execução do empreendimento Y2

Com base no plano de ataque foi também definido o plano de ataque da infraestrutura urbana e áreas de uso comum. O empreendimento foi dividido em três zonas (figura 76) cujas execuções se sucederiam de acordo com o avanço da execução dos blocos.

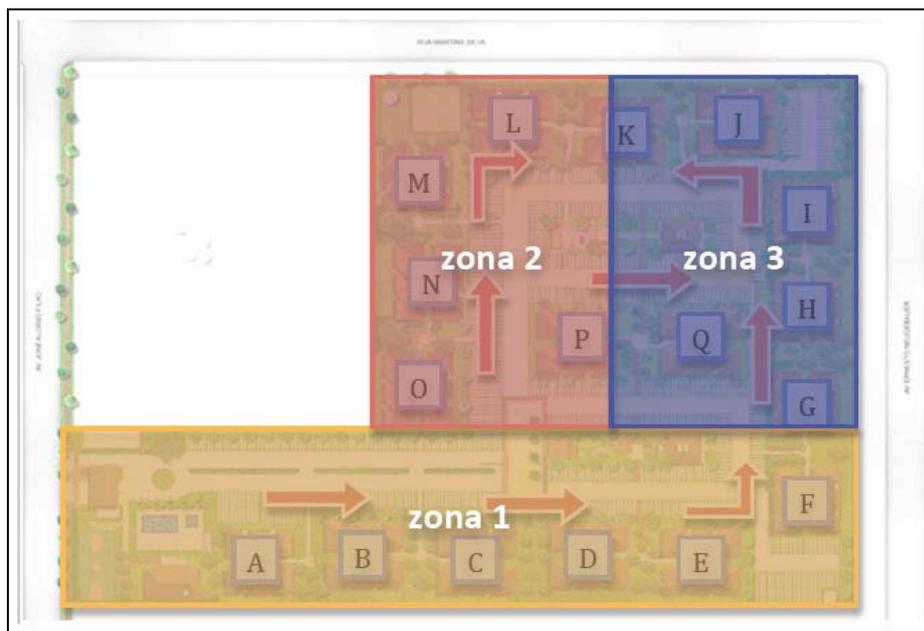


Figura 76: estratégia de execução da infraestrutura do empreendimento Y2

O estudo dos fluxos de trabalho no empreendimento foi realizado com base nas decisões anteriores, em especial a seqüência de execução da unidade-base e a estratégia de ataque do empreendimento. Este estudo foi realizado utilizando a linha de balanço. Foram definidos alguns cenários alternativos, basicamente com relação ao número de frentes de trabalho abertas simultaneamente, sendo avaliado o número de equipes necessárias e impacto no prazo final do empreendimento.

O primeiro cenário estudado consistia na abertura de 05 frentes de trabalho que executariam os 17 blocos de edifícios aos pares. Esta estratégia de pares de blocos possibilitaria a manutenção de um fluxo ininterrupto de trabalho para as equipes de alvenaria, uma vez que cada equipe executaria dois blocos de forma intercalada, com um tempo de ciclo igual a 1 semana (5 dias). No intervalo entre a execução de dois pavimentos, eram executados os processos de montagem de lajes pré-fabricadas, bem como outros processos como, por exemplo, interligação de instalações elétricas, chumbamento de contramarcos, criando uma sincronia entre a execução de dois blocos.

Desta forma, o primeiro cenário estudado previa um tempo de ciclo para o processo de execução de alvenaria de 5 dias por pavimento (determinístico), enquanto as demais atividades deveriam ser executadas na janela de tempo criada pelo deslocamento da equipe para a execução daquele processo no bloco vizinho. Este cenário gerava a necessidade de 05

equipes de alvenaria, que haviam sido dimensionadas inicialmente com 08 pedreiros, 04 serventes e 01 operador de argamassadeira, perfazendo um total de 40 pedreiros, 20 serventes e 05 operadores de argamassadeira para o empreendimento. A figura 77, a seguir, apresenta a sincronia proposta entre os processos de elevação de alvenaria e montagem de lajes, bem como os blocos atribuídos a cada uma das cinco equipes de alvenaria.

LOCAL	Bloco A	Bloco B	Bloco C	Bloco D	Bloco E	Bloco F	Bloco O	Bloco N	Bloco M	Bloco L	
pav. 5	laje	semana 10	semana 11	semana 12	semana 13	semana 14	semana 15	semana 16	semana 17	semana 18	semana 19
	alvenaria	semana 09	semana 10	semana 11	semana 12	semana 13	semana 14	semana 15	semana 16	semana 17	semana 18
pav. 4	laje	semana 08	semana 09	semana 10	semana 11	semana 12	semana 13	semana 14	semana 15	semana 16	semana 17
	alvenaria	semana 07	semana 08	semana 09	semana 10	semana 11	semana 12	semana 13	semana 14	semana 15	semana 16
pav. 3	laje	semana 06	semana 07	semana 08	semana 09	semana 10	semana 11	semana 12	semana 13	semana 14	semana 15
	alvenaria	semana 05	semana 06	semana 07	semana 08	semana 09	semana 10	semana 11	semana 12	semana 13	semana 14
pav. 2	laje	semana 04	semana 05	semana 06	semana 07	semana 08	semana 09	semana 10	semana 11	semana 12	semana 13
	alvenaria	semana 03	semana 04	semana 05	semana 06	semana 07	semana 08	semana 09	semana 10	semana 11	semana 12
térreo	laje	semana 02	semana 03	semana 04	semana 05	semana 06	semana 07	semana 08	semana 09	semana 10	semana 11
	alvenaria	semana 01	semana 02	semana 03	semana 04	semana 05	semana 06	semana 07	semana 08	semana 09	semana 10
PROCESSO	EQUIPE 01		EQUIPE 02		EQUIPE 03		EQUIPE 04		EQUIPE 05		
LOCAL	Bloco P	Bloco Q	Bloco G	Bloco H	Bloco I	Bloco J	Bloco K				
pav. 5	laje	semana 20	semana 21	semana 22	semana 23	semana 24	semana 25	semana 26			
	alvenaria	semana 19	semana 20	semana 21	semana 22	semana 23	semana 24	semana 25			
pav. 4	laje	semana 18	semana 19	semana 20	semana 21	semana 22	semana 23	semana 24			
	alvenaria	semana 17	semana 18	semana 19	semana 20	semana 21	semana 22	semana 23			
pav. 3	laje	semana 16	semana 17	semana 18	semana 19	semana 20	semana 21	semana 22			
	alvenaria	semana 15	semana 16	semana 17	semana 18	semana 19	semana 20	semana 21			
pav. 2	laje	semana 14	semana 15	semana 16	semana 17	semana 18	semana 19	semana 20			
	alvenaria	semana 13	semana 14	semana 15	semana 16	semana 17	semana 18	semana 19			
térreo	laje	semana 12	semana 13	semana 14	semana 15	semana 16	semana 17	semana 18			
	alvenaria	semana 11	semana 12	semana 13	semana 14	semana 15	semana 16	semana 17			
PROCESSO	EQUIPE 01		EQUIPE 02		EQUIPE 03		EQUIPE 04				

Figura 77: detalhamento da sincronização proposta entre os processos de elevação de alvenaria e montagem de lajes

Assim, o empreendimento seria dividido em 09 frentes de trabalho, sendo oito delas compostas de dois blocos e uma de apenas um bloco (A/B, C/D, E/F, O/N; M/L, P/Q, G/H, I/J e K). Para a execução destas frentes, 05 equipes seriam necessárias para a execução de cada processo produtivo, sendo alocadas da seguinte forma (figura 78). Já a figura 79 apresenta a linha de balanço gerada a partir das discussões do estudo dos fluxos de trabalho deste empreendimento.

Equipes	Blocos			
1	A	B	P	Q
2	C	D	G	H
3	E	F	I	J
4	O	N	K	--
5	M	L	--	--

Figura 78: alocação dos blocos às equipes de produção

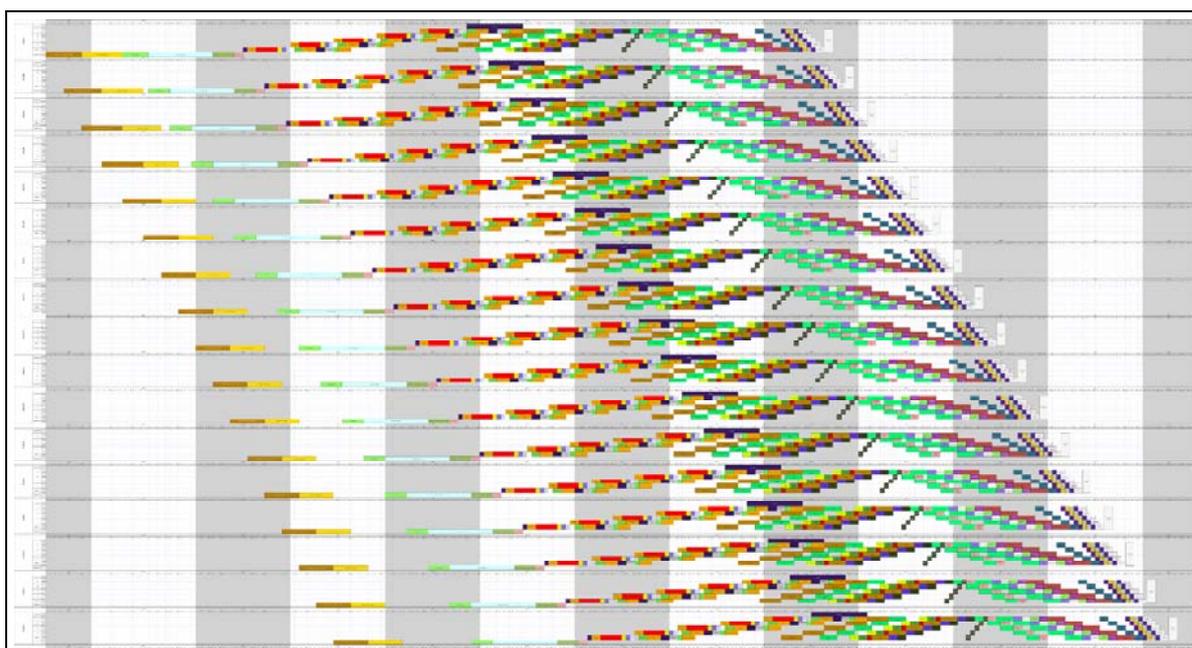


Figura 79: linha de balanço do empreendimento Y2

Com base nas informações da linha de balanço, foram calculadas as necessidades de equipes e materiais de alguns dos principais processos produtivos. Para o dimensionamento da capacidade em termos de equipes, foram utilizados dados do pré-dimensionamento da capacidade dos recursos. Já as necessidades de materiais foram obtidas com base em dados da empresa. Assim, foram estabelecidas as necessidades de equipes de alvenaria, além do número de lajes e blocos de alvenaria, e do volume de argamassa de reboco interno. Estas informações foram representadas através de gráficos, como na figura 80, a seguir, que apresenta o número de equipes de alvenaria e o volume de blocos estruturais necessários ao longo da execução do empreendimento, respectivamente.

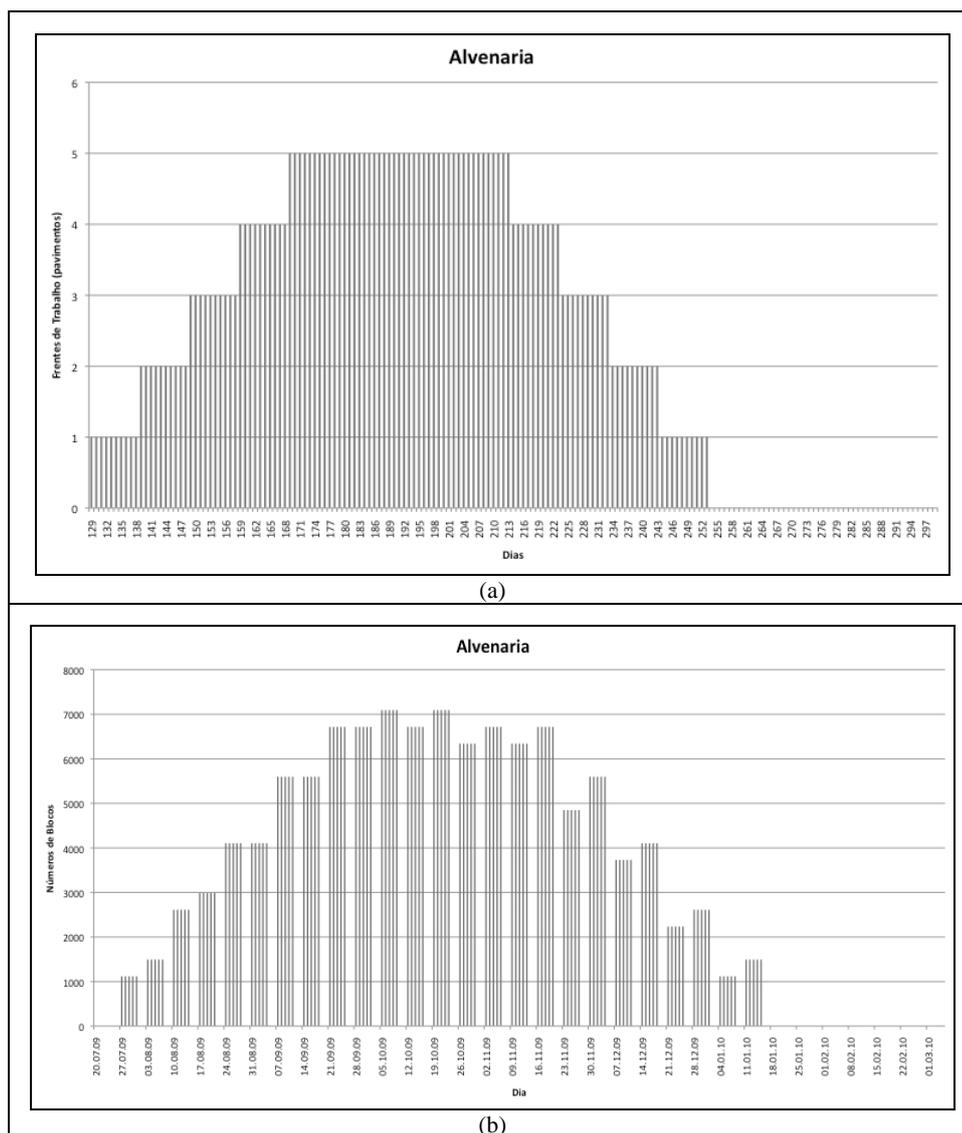


Figura 80: gráfico da necessidade de equipes de alvenaria (a) e blocos estruturais (b)

Foram realizadas reuniões com os fornecedores de blocos estruturais e lajes pré-fabricadas e argamassa industrializada, no sentido de verificar se os mesmos tinham capacidade para fornecer à taxa de demanda necessária a consecução dos ritmos previstos. Estas reuniões serviram também para coletar informações sobre a frequência de entregas, necessidades de espaços para carga e descarga de blocos e lajes pré-fabricadas, capacidade dos silos e bombas de argamassa, entre outras.

Com relação ao sistema de abastecimento de argamassa industrializada, foi definida a utilização de 03 conjuntos de silos e bombas, a serem instaladas no canteiro de obras. A figura 81 apresenta planta de localização dos conjuntos de silos e bombas de argamassa industrializada, bem como os blocos abastecidos para cada uma das bombas.



Figura 81: localização das bombas de argamassa industrializada

6.5.2.2 Desenvolvimento e Emprego do Modelo de Simulação do Empreendimento Y2

Durante a discussão acerca da estratégia de execução do empreendimento, foi construído um modelo de simulação para apoio da tomada de decisão. O escopo deste modelo, entretanto, não envolvia todo o empreendimento, mas apenas os processos de elevação de alvenaria, montagem de lajes pré-fabricadas, grouteamento, interligação laje/alvenaria, marcação de alvenaria e borda de laje, uma vez que o objetivo era estudar os impactos da variabilidade dos processos na sincronia destes e de diferentes alternativas no que dizia respeito ao número de equipes que executariam as 09 frentes de trabalho do empreendimento e seu impacto em termos de prazo final.

No modelo elaborado, cada bloco foi modelado individualmente, a fim de possibilitar a execução paralela dos mesmos, bem como o compartilhamento das equipes. Ainda foram modelados os processos de fornecimento de blocos estruturais e lajes pré-fabricadas, o que possibilitaria avaliar os impactos da variabilidade também nesses processos. O tempo de elaboração deste modelo foi de pouco mais de 06 horas de trabalho, incluindo as planilhas de entrada e saída de dados. Também foi utilizado neste modelo o módulo genérico proposto no estudo de caso 1, não requerendo qualquer adaptação para tal.

Inicialmente, comparou-se um cenário determinístico (utilizado para construir a linha de balanço do empreendimento) com um cenário estocástico, utilizando os tempos de ciclo explicitados pelos engenheiros de planejamento e coordenador durante a etapa de definição da seqüência de execução da unidade base. A figura 82, a seguir, apresenta um comparativo entre os tempos utilizados nos dois cenários (em dias).

Processo	Cenário 01 (determinístico)	Cenário 02 (estocástico)
Alvenaria	5,0	TRIA (4,0; 5,0; 6,0)
Groutamento	1,0	TRIA (1,0; 1,0; 1,5)
Laje	1,0	TRIA (0,5; 1,0; 1,0)
Interligação	1,0	TRIA (0,5; 1,0; 1,5)
Borda de laje	1,0	TRIA (0,5; 1,0; 1,5)
Marcação de alvenaria	1,0	TRIA (1,0; 1,0; 1,5)

Figura 82: comparativo dos tempos utilizados nos cenários 01 e 02

Com base nos modelos, foram geradas linhas de balanço para cada um dos cenários simulados. A figura 83 apresenta a linha de balanço do cenário 01 (determinístico), enquanto a figura 84 apresenta a linha de balanço do cenário 02 (estocástico), para 60 replicações. Já a tabela 07 apresenta um comparativo das datas de conclusão da etapa de alvenaria/lajes de cada bloco no cenário determinístico com as datas médias de conclusão do cenário estocástico.

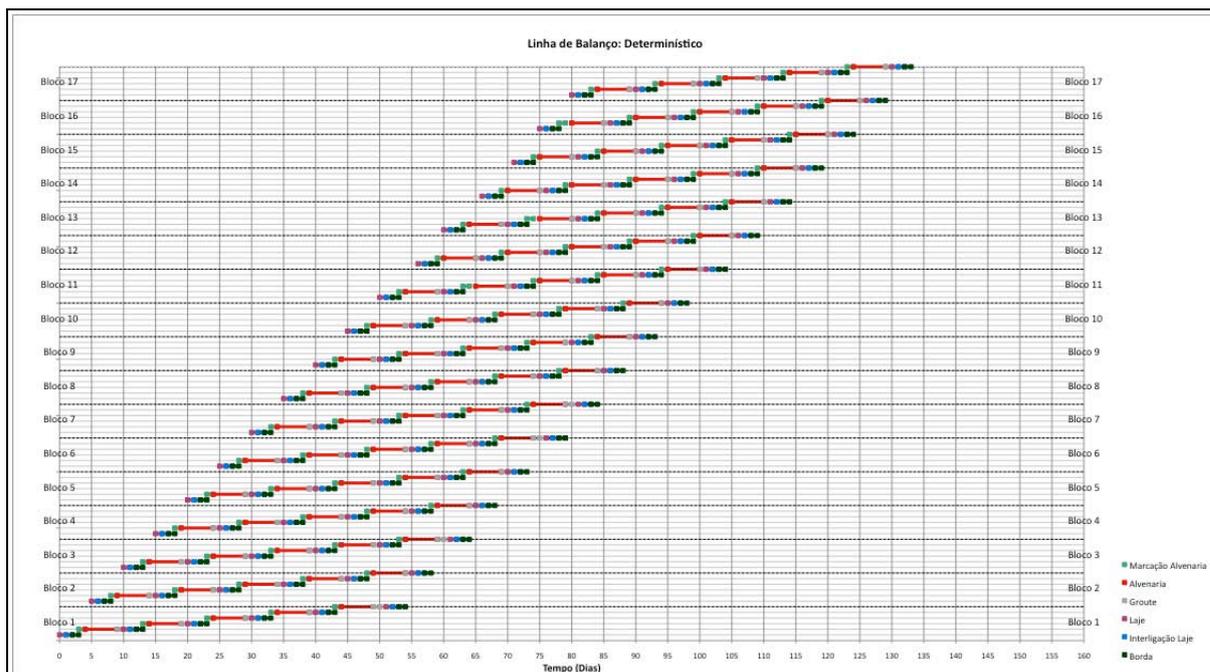


Figura 83: linha de balanço do cenário 01 (determinístico)

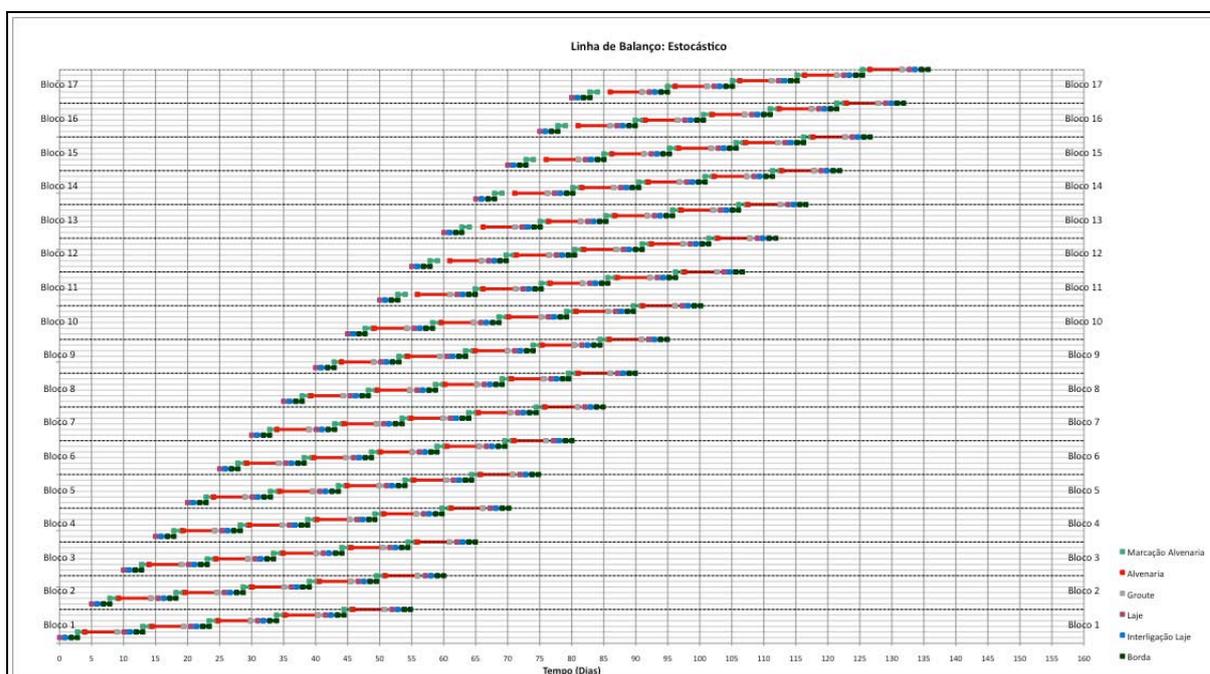


Figura 84: linha de balanço do cenário 02 (estocástico)

Tabela 07: comparativo das datas de conclusão nos cenários 01 e 02

Bloco	Data de Conclusão (dias úteis)		
	Cenário 01 (determinístico)	Cenário 02 (estocástico)	
		Média	Desvio-padrão
A	92,0	92,8	0,90
B	96,0	98,0	0,99
C	102,0	102,9	1,19
D	106,0	108,2	1,11
E	111,0	112,8	0,99
F	117,0	118,0	1,13
O	122,0	122,9	0,83
N	126,0	127,9	1,03
M	131,0	132,9	0,96
L	136,0	138,1	0,95
P	142,0	144,6	1,62
Q	147,0	149,9	1,56
G	152,0	154,6	1,25
H	157,0	159,8	1,18
I	162,0	164,6	1,33
J	167,0	169,8	1,30
K	171,0	173,7	1,54

Fonte: modelo de simulação

A comparação dos dois cenários indica que é pequeno o impacto da variabilidade dos processos no prazo de conclusão dos blocos, dada a pequena variabilidade considerada pelos engenheiros da empresa para os processos analisados, uma vez que não se dispunha de dados históricos relativos aos processos analisados. Analisando-se a linha de balanço do cenário 02, percebe-se que o fluxo das equipes de alvenaria mantiveram-se ininterruptos como no cenário 01. Um terceiro cenário foi simulado, utilizando-se as mesmas configurações do cenário 02, com exceção da abertura de uma sexta frente de trabalho e, conseqüentemente, a utilização de uma sexta equipe de cada processo. A figura 85 apresenta a estratégia de ataque proposta no cenário 03.

Equipes	Blocos			
1	A	B	G	H
2	C	D	I	J
3	E	F	K	--
4	O	N	--	--
5	M	L	--	--
6	P	Q	--	--

Figura 85: alocação dos blocos às equipes de produção no cenário 03

Esta frente de trabalho iniciaria suas atividades pelo bloco P uma semana após o início da alvenaria do bloco L. Já os blocos G e H passariam a ser executados pela equipe 1, enquanto os blocos I e J pela equipe 2 e o bloco K pela equipe 3. A figura 86 apresenta a linha de balanço deste cenário.

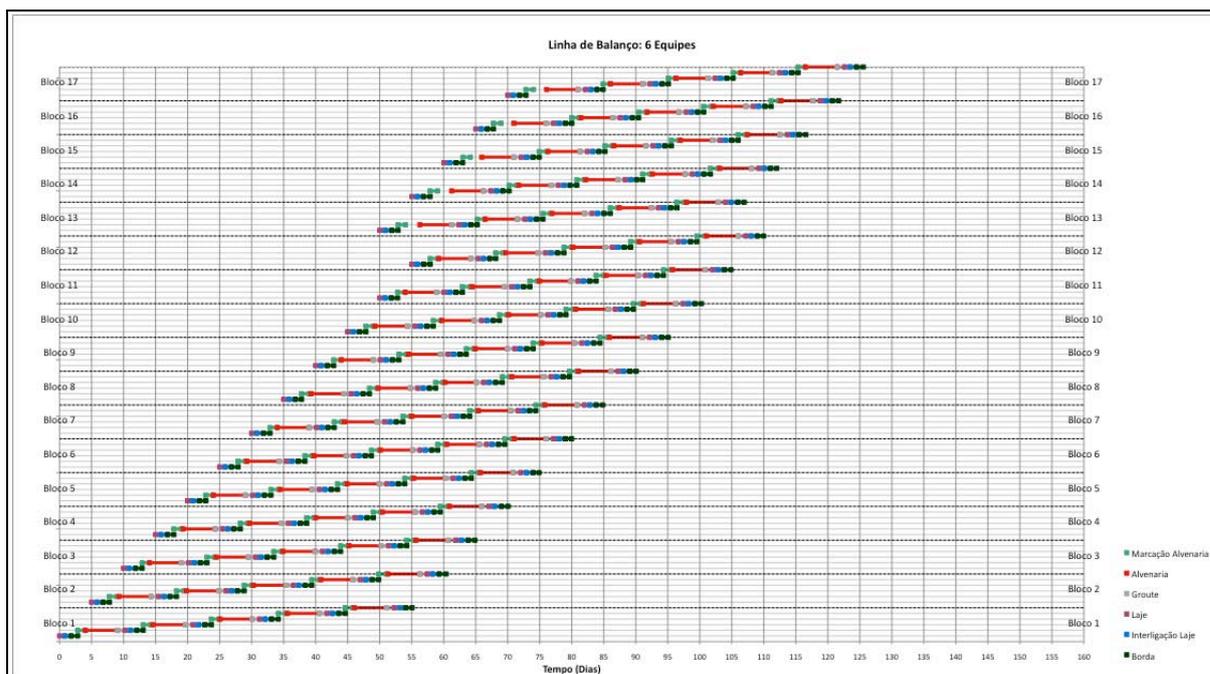


Figura 86: linha de balanço do cenário 03

Na tabela 08, são apresentados dos dados de duração dos blocos neste cenário, comparando-os com as datas do cenário 02. Neste cenário o aumento do número de frentes simultaneamente abertas, que passavam a ser 6, refletia uma redução de aproximadamente 10 dias úteis no prazo final médio previsto.

Tabela 08: comparativo das datas de conclusão nos cenários 02 e 03

Bloco	Data de Conclusão (dias úteis)			
	Cenário 02 (05 equipes)		Cenário 03 (06 equipes)	
	Média	Desvio-padrão	Média	Desvio-padrão
A	92,8	0,90	93,1	0,95
B	98,0	0,99	98,4	1,00
C	102,9	1,19	102,9	1,20
D	108,2	1,11	108,0	1,07
E	112,8	0,99	112,9	0,93
F	118,0	1,13	118,0	1,16
O	122,9	0,83	122,8	1,10
N	127,9	1,03	128,1	1,31
M	132,9	0,96	133,1	1,09
L	138,1	0,95	138,2	1,20
P	144,6	1,62	142,9	1,11
Q	149,9	1,56	148,0	1,07
G	154,6	1,25	144,9	1,44
H	159,8	1,18	150,0	1,55
I	164,6	1,33	154,6	1,69
J	169,8	1,30	159,7	1,74
K	173,7	1,54	163,5	1,34

Fonte: modelo de simulação

O último cenário simulado nesta etapa considerava a abertura de 08 frentes de trabalho, isto é, utilizando 08 equipes de cada processo. Cada equipe seria responsável pela execução de dois blocos, com exceção da equipe 01, que seria responsável pela execução de três blocos (A, B e K). A figura 87 apresenta a linha de balanço resultante do cenário 04.

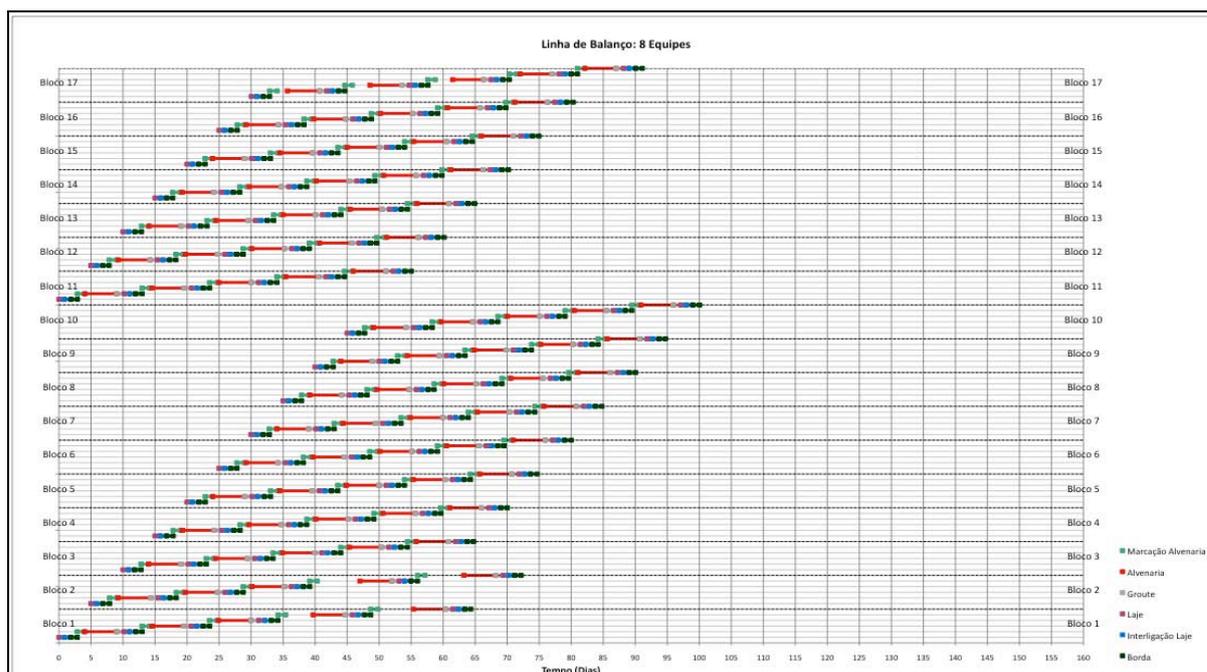


Figura 87: linha de balanço do cenário 04

Esta condição reduziria, obviamente, o prazo do empreendimento (em 44,6 dias úteis), ao passo que demandaria até 60% mais recursos (em termos de mão-de-obra e materiais). Por exemplo, haveria a necessidade até 64 pedreiros, 32 serventes e 8 operadores de argamassadeira, apenas para o processo de elevação de alvenaria.

A tabela 09 apresenta um comparativo entre as datas de conclusão médias dos blocos no cenário 02 e no cenário 04.

Tabela 09: comparativo das datas de conclusão nos cenários 02 e 04

Bloco	Data de Conclusão (dias úteis)			
	Cenário 02 (05 equipes)		Cenário 04 (08 equipes)	
	Média	Desvio-padrão	Média	Desvio-padrão
A	92,8	0,90	102,3	2,48
B	98,0	0,99	110,2	3,06
C	102,9	1,19	102,7	0,97
D	108,2	1,11	108,0	1,05
E	112,8	0,99	112,7	1,02
F	118,0	1,13	118,0	1,18
O	122,9	0,83	122,8	1,09
N	127,9	1,03	128,0	1,09
M	132,9	0,96	132,7	1,20
L	138,1	0,95	138,0	1,19
P	144,6	1,62	93,0	1,24
Q	149,9	1,56	98,1	1,15
G	154,6	1,25	102,9	1,06
H	159,8	1,18	108,2	1,20
I	164,6	1,33	113,0	1,00
J	169,8	1,30	118,3	1,21
K	173,7	1,54	129,1	2,73

Fonte: modelo de simulação

Os dados obtidos foram apresentados e discutidos em duas reuniões. A primeira envolveu, além da equipe local da empresa Y, o gerente responsável pelo setor de empreendimentos daquele nicho de mercado. A segunda reunião envolveu o gerente regional da empresa Y, além de funcionários responsáveis pelo setor de suprimentos. Após as discussões, optou-se pela continuidade do estudo utilizando o cenário inicialmente proposto, com a abertura de 05 frentes de trabalho, principalmente em função do menor volume de mão-de-obra que esta opção requeria.

Desta feita, passou-se à elaboração de um modelo e simulação compreendendo não mais apenas os processos de elevação de alvenaria e montagem de lajes pré-fabricadas, mas todos os processos necessários para a consecução dos blocos. Uma vez que todas as atividades para execução de cada bloco deveriam ser modeladas e todos os dezessete blocos modelados individualmente, o desenvolvimento do modelo de simulação do empreendimento Y2 consumiu aproximadamente 120 horas, em função da sua complexidade.

Um outro componente genérico de simulação foi construído para este estudo. Este componente simulava a tanto inserção de *buffers* de tempo ou unidades-repetitivas entre processos produtivos, como uma inversão no fluxo de trabalho das equipes. Isto acontecia quando um processo que viesse sendo executado do pavimento térreo em direção ao último

pavimento e o processo subsequente fosse executado no sentido inverso, ou seja, do último em direção ao pavimento térreo. Além da inversão no fluxo, a inserção de buffers tinha como função principal a manutenção do fluxo de trabalho das equipes ininterrupto. A figura 88 apresenta o componente e a interface de ingresso de dados desenvolvido durante o estudo.

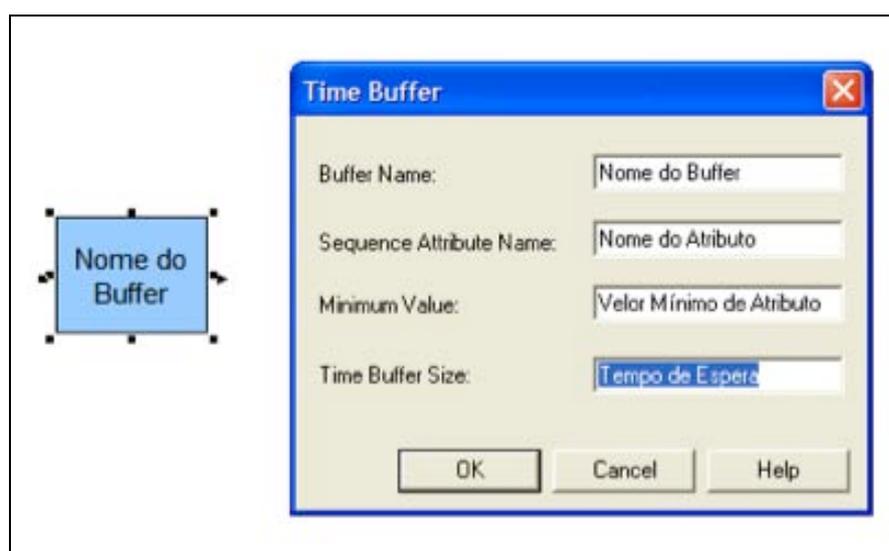


Figura 88: componente genérico de simulação proposto para a inserção de *buffers*

A principal preocupação da equipe da empresa era quanto à conclusão do empreendimento dentro do prazo previsto (junho de 2010), uma vez que este já era o prazo máximo dado ao clientes antes que a empresa fosse obrigada a arcar com multas contratuais. A partir desta etapa, um novo engenheiro de obra passou a formar a equipe da empresa. Este profissional tinha larga experiência na execução de empreendimentos daquele tipo. Desta forma, foi realizada uma apresentação e discussão das principais decisões do PSP até então tomadas.

Com relação ao modelo de simulação, esse engenheiro solicitou a revisão no tempo de ciclo do processo de elevação de alvenaria, como forma de refletir não só índices de produtividade mais próximos da realizada da obra, como também modelar o efeito aprendizagem das equipes ao longo do tempo (três primeiros meses). Também foram consideradas as diferenças entre as áreas de alvenaria nos blocos de apartamentos de dois e três dormitórios, na determinação dos tempos de ciclo. Baseado nos índices de produtividade estimados e nas áreas de alvenaria em blocos de dois e três dormitórios, foram estabelecidos novos tempos de ciclo, em dias, da atividade de alvenaria ao longo do período de execução (figura 89).

Blocos de 03 dormitórios			
Mês	Mínimo	Moda	Máximo
01	6,75	7,25	8,00
02	5,50	6,15	6,75
03	4,00	5,00	5,50
Blocos de 02 dormitórios			
Mês	Mínimo	Moda	Máximo
01	5,25	5,75	6,25
02	4,25	4,75	5,25
03	3,50	4,00	4,25

Figura 89: novos tempos de ciclo do processo de alvenaria (em dias)

Os demais processos modelados mantiveram as durações probabilísticas definidas durante a primeira etapa do estudo. Com base nesses valores foi feita a simulação de um cenário estocástico, considerando 05 frentes de trabalho no empreendimento. A figura 90 apresenta a linha de balanço gerada com base neste cenários (após 30 replicações).

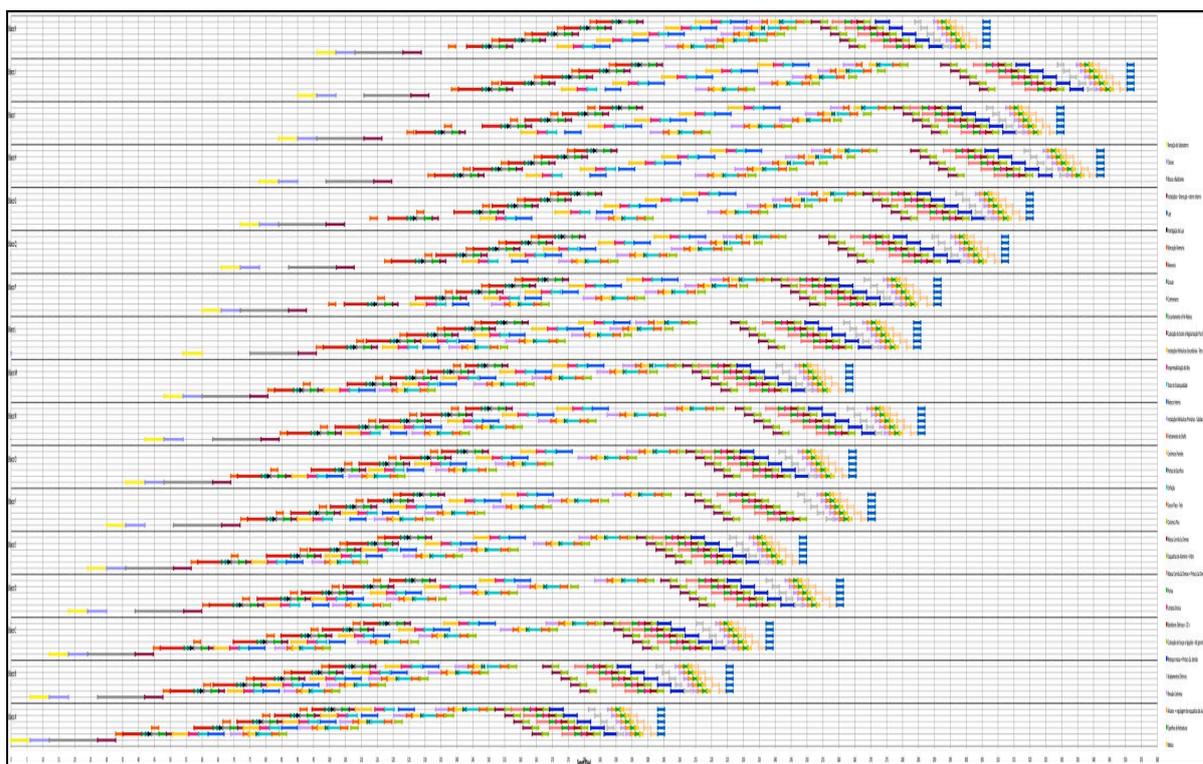


Figura 90: linha de balanço estocástica gerada para todos os processos do empreendimento Y2

Esta linha de balanço foi apresentada à equipe da empresa. Com base nesta ferramenta procedeu-se uma análise dos fluxos de trabalho, principalmente das equipes de alvenaria e uma discussão acerca dos prazos médios de conclusão dos blocos e do empreendimento.

Com relação ao fluxo de trabalho das equipes de alvenaria, percebeu-se que, em função da variabilidade considerada, bem como do efeito aprendizagem das equipes, a sincronização entre os processos de execução de alvenaria e montagem de lajes não havia sido mantida neste cenário. Este comportamento ocorria em função da disponibilidade de frentes de trabalho em blocos não prioritários (em termos de seqüência de ataque do empreendimento) antes daquelas prioritárias e a consecutiva alocação dos recursos produtivos naquelas frentes. Esta situação, de certa forma representava algo normal na construção civil – na ausência de uma frente de trabalho na seqüência de ataque do empreendimento, as equipes de produção são alocadas na frente de trabalho que oferece condições para a manutenção de um fluxo de trabalho ininterrupto desta equipe.

O efeito colateral desta prática pode ser visualizado claramente na linha de balanço do empreendimento (figura 91), bem como nos prazos finais de conclusão dos blocos e do empreendimento (este último aproximadamente cinco meses após a data-limite de entrega). Ainda como forma de demonstrar este efeito de forma mais clara, os processos de elevação de alvenaria e montagem de lajes foram filtrados e os impactos avaliados com base em outra linha de balanço (figura 91).

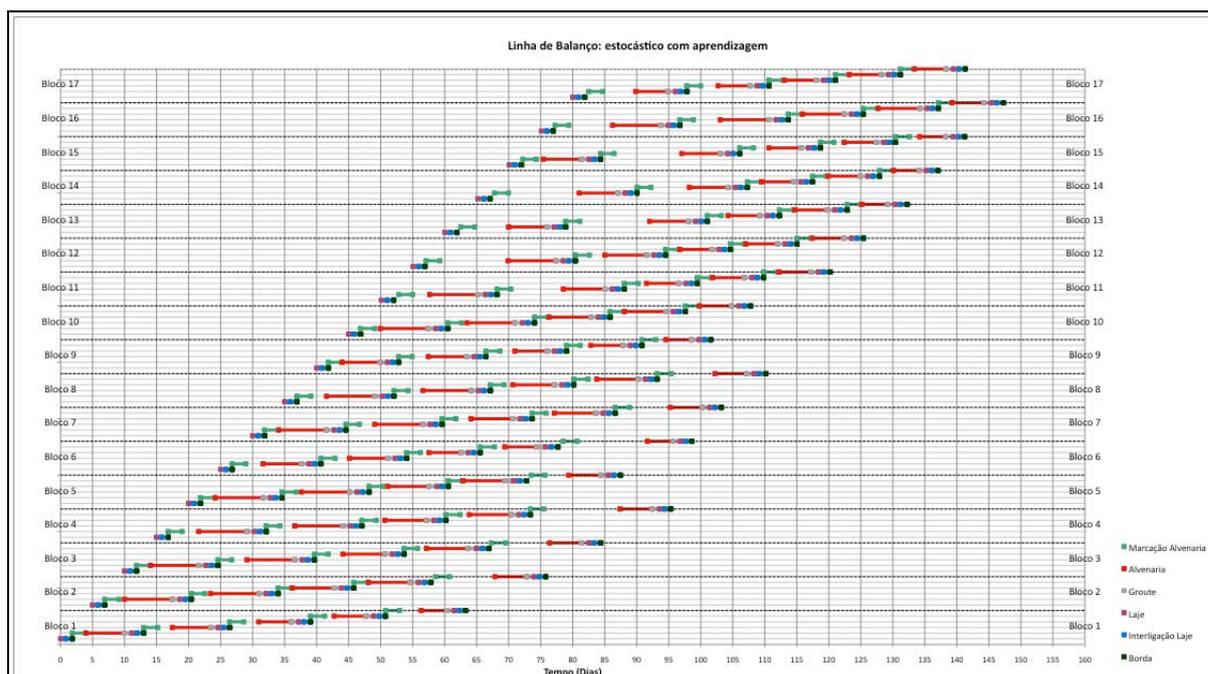


Figura 91: linha de balanço estocástica para os processos de elevação de alvenaria e montagem de lajes

Embora esperava-se que esta primeira simulação fosse um ponto de partida para novas discussões acerca dos impactos da variabilidade nos processos produtivos e de novos cenários buscando melhorar os fluxos de trabalho e reduzir o prazo de execução do empreendimento, a equipe de engenheiros da empresa solicitou que os estudos futuros fossem baseados em dados determinísticos, uma vez que “não poderiam assumir um planejamento cuja data de conclusão do empreendimento ficasse além das datas negociadas com o cliente”. Embora a importância da consideração da variabilidade e da necessidade de proteger a produção contra sua influência, a equipe da empresa foi enfática na continuidade do estudo utilizando apenas dados determinísticos.

Em face desta dificuldade, o modelo reduzido foi utilizado para embasar as discussões sobre os conceitos de nivelamento da produção e *tempo takt*. Procurou-se demonstrar (mesmo que deterministicamente) que se houvesse a subordinação dos tempos de ciclo tanto do processo de elevação de alvenaria como resultante do somatório dos tempos de ciclo dos processos envolvidos na montagem de lajes pré-fabricadas a um dado *tempo takt*, obter-se-ia uma previsibilidade no fluxo de trabalho das equipes de produção e a possibilidade de sincronização destes processos. Este *tempo takt*, entretanto, não seria resultado de uma demanda externa, mas sim estabelecido pela equipe de produção com base na possibilidade de

alcance e tempo disponível para conclusão da etapa de execução de alvenarias no empreendimento.

Qualquer que fosse o *tempo takt* estabelecido, todos os recursos produtivos envolvidos deveriam ser dimensionados para que os tempos de ciclos dos respectivos processos não ultrapassassem tal valor. Um cenário com *tempo takt* de 7 dias para a execução dos dez primeiros blocos e de 6 dias para a execução dos sete últimos foi simulado e uma análise dos fluxos de trabalho foi realizada. Com base na linha de balanço gerada (figura 92) foram reforçados os conceitos de nivelamento e *tempo takt*, bem como os potenciais benefícios da sua adoção.

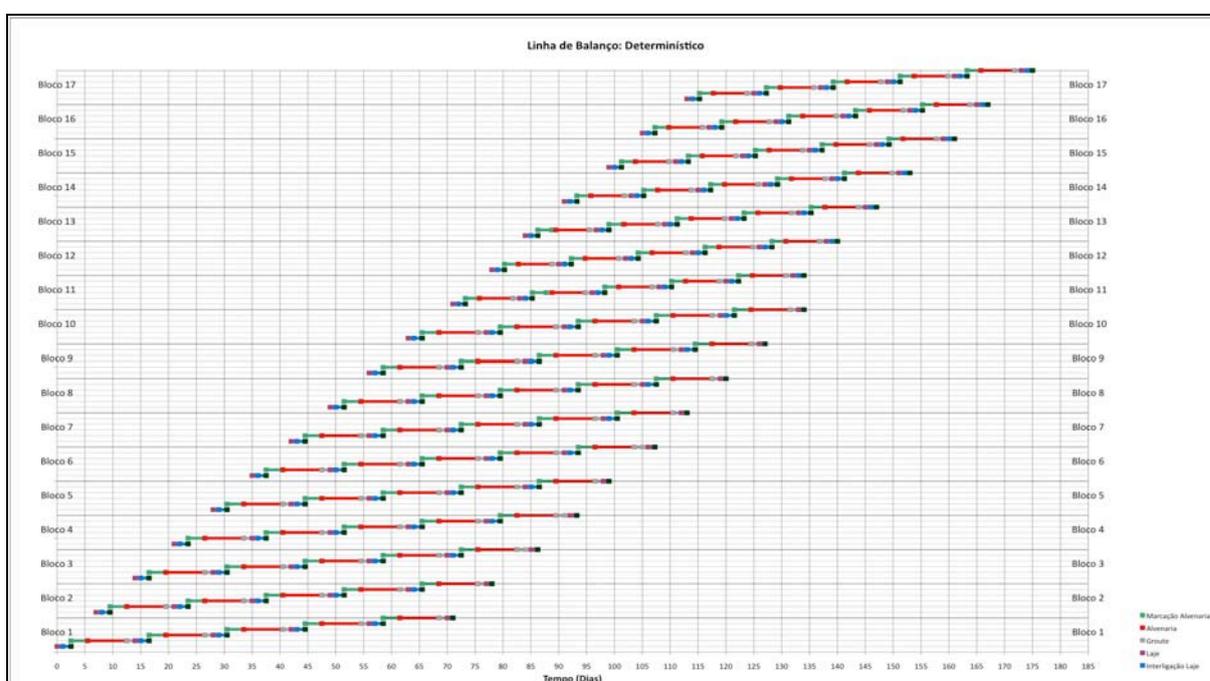


Figura 92: linha de balanço com a introdução do conceito de nivelamento

Após estas discussões, a equipe da empresa optou pela manutenção dos tempos de ciclo utilizados inicialmente no estudo de caso. No caso da alvenaria, a equipe optou pela manutenção de um tempo de ciclo de 05 dias, trabalhando de segunda à sexta-feira, e utilizando o sábado como um *buffer* para recuperação de eventuais atrasos.

6.5.2.3 Elaboração de Ferramentas de Monitoramento

Com a conclusão do estudo, um relatório foi elaborado contendo todas as decisões tomadas durante o processo de elaboração. Este relatório continha uma descrição do processo, cenários simulados e avaliações realizadas até a conclusão por uma das alternativas. Faziam parte ainda deste relatório, ferramentas de monitoramento, especificamente uma planilha para controle do ritmo de produção dos processos considerados críticos pela equipe de engenharia, além de um gráfico com as datas de início do processo de elevação de alvenaria e montagem de lajes por bloco e por pavimento. Esta última ferramenta tinha como objetivo informar a equipe de obra quanto a necessidade de programação da entrega de blocos estruturais e lajes pré-fabricadas no canteiro. A figura 93, a seguir, apresenta um detalhe da referida planilha na qual estão assinaladas as previsões de montagem de lajes por pavimento e bloco do empreendimento.

Bloco	14.9.09	15.9.09	16.9.09	17.9.09	18.9.09	21.9.09	22.9.09	23.9.09	24.9.09	25.9.09	28.9.09	29.9.09	30.9.09	1.10.09	2.10.09	5.10.09	6.10.09	7.10.09	8.10.09	6.10.09	12.10.09	13.10.09	14.10.09	15.10.09	16.10.09	19.10.09	20.10.09	21.10.09	22.10.09	23.10.09	26.10.09	27.10.09	28.10.09	29.10.09	30.10.09				
A						Térreo										2º pav																							
B											Térreo											2º pav																	
C																																							
D																																							
E																																							
F																																							
O																																							
N																																							
M																																							
L																																							
P																																							
Q																																							
G																																							
H																																							
I																																							
J																																							
K																																							
Dias	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35				
Total	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	

Figura 93: gráfico de Gantt com programação da montagem de lajes

Com base na linha de balanço, foi elaborada uma visualização 4D da evolução do empreendimento semanalmente, a partir da execução de vigas baldrame até a etapa de pintura externa. Esta atividade consumiu aproximadamente 40 horas de trabalho e foi desenvolvida a partir de um modelo 3D. Com base na evolução semanal do empreendimento na linha de balanço, procedeu-se a produção de imagens que representassem esta evolução. Estas imagens foram então reunidas e uma animação produzida. Esta visualização tinha como objetivo servir como uma ferramenta de comunicação rápida da estratégia de ataque

pretendida com outras pessoas interessadas que não tivessem participado do processo de elaboração do PSP. Ela foi primeiramente utilizada em uma reunião da equipe da empresa com outros envolvidos na gestão do empreendimento (engenheiro de planejamento, encarregado de suprimentos e outros engenheiros da empresa Y). A figura 94 apresenta uma parte desta visualização.

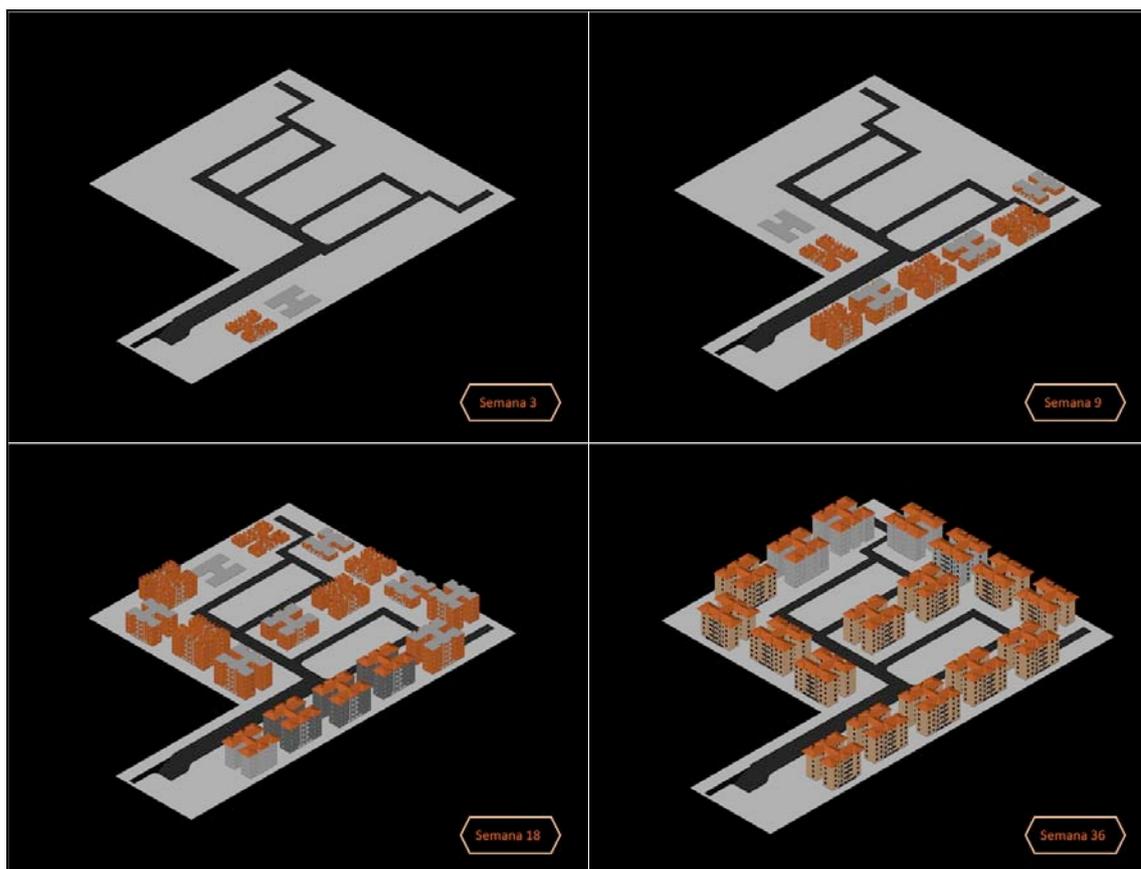


Figura 94: visualização 3D da estratégia de ataque do empreendimento Y2

6.5.3 Avaliação do Estudo de Caso 4

6.5.3.1 Utilidade

Com relação à **contribuição do PSP para a percepção da necessidade de tomada de decisão de forma conectada**, como nos demais estudos desta tese, a elaboração do PSP proporcionou uma oportunidade para o envolvimento de fornecedores no processo de discussão. No caso específico deste estudo, dois fornecedores foram chamados a contribuir: o fornecedor de lajes pré-moldadas e blocos de concreto e o fornecedor de argamassa

industrializada. Neste caso, ao contrário de todos os demais estudos, as discussões do PSP serviram para subsidiar as condições de contratação desses fornecedores, uma vez naquele momento não haviam contratos de fornecimento firmados. Desta forma, mais do que contribuir para a elaboração do PSP, estes fornecedores avaliaram as demandas do empreendimento frente a suas capacidades de fabricação e fornecimento. No caso específico do fornecedor de lajes pré-moldadas, este previa a necessidade de ampliar sua capacidade de produção como forma de responder à demanda do empreendimento e continuar atendendo demandas do mercado.

Neste estudo, havia um número bastante elevado de decisões cujo impacto refletia-se no sistema de produção como um todo. Por exemplo, a decisão quanto ao número de equipes execução de alvenaria impactava diretamente na demanda de fornecimento de lajes e blocos de concreto, cujo fornecedor preferencial não possuía capacidade de fornecimento suficiente para absorvê-la. Ainda, a definição da estratégia de ataque do empreendimento dependia da forma como o terreno havia sido aterrado, em função da necessidade de se observar um prazo mínimo para sua remoção.

Com relação à **utilização do PSP como referência na tomada de decisão na Gestão do empreendimento**, as decisões do PSP foram utilizadas como base para o planejamento do empreendimento. A partir da linha de balanço que foi elaborada para o estudo dos fluxos de trabalho do empreendimento, foi elaborado um gráfico de Gantt que balizou a contratação de fornecedores e as necessidades de provisionamento de recursos.

Como já discutido, as demandas pelos principais materiais balizaram as discussões com fornecedores, bem como os contatos com subempreiteiros, embora ao final do estudo estes ainda não haviam sido contratados.

O prazo de início do empreendimento foi protelado diversas vezes. Após a conclusão do estudo houve a definição da data de início, havendo a necessidade de atualização destas datas nas ferramentas elaboradas a pedido da equipe da empresa.

Havia uma previsão de execução de um empreendimento com características similares ao do empreendimento Y2, a ser iniciado, aproximadamente, seis meses após a data de início de execução do primeiro. Na percepção do engenheiro de planejamento, o PSP realizado serviria como base para a tomada de decisão do empreendimento futuro, demonstrando o interesse em estender o PSP a outros empreendimentos da empresa. Ainda neste estudo, todo o processo de

elaboração do PSP – as decisões tomadas e seus motivos e as ferramentas elaboradas – fizeram parte de um relatório. Este documento, além de servir de referência durante a fase de execução do empreendimento, serviria de base para futuros empreendimentos.

Já no que diz respeito à **contribuição para a sistematização do processo de tomada de decisão**, a seqüência de decisões prevista no modelo de elaboração mostrou-se adequada ao desenvolvimento do PSP do empreendimento. Todas as etapas previstas foram realizadas e a interdependência entre as decisões mostrou-se bastante evidente ao longo do processo. Por exemplo, ao contrário dos demais estudos, nos quais os estudos dos fluxos de trabalho na unidade-base e no empreendimento acabaram por ser condensados, neste estudo, em função da tipologia da unidade-base selecionada (edifício), o desenvolvimento do estudo dos fluxos de trabalho na unidade-base representou etapa fundamental precedendo ao estudo dos fluxos de trabalho no empreendimento, uma vez que estratégia de ataque do empreendimento previa a sincronização entre a execução de alvenaria e montagem de lajes em dois blocos simultaneamente.

Neste estudo, o processo de montagem de alvenaria foi identificado como um processo crítico. A necessidade de sincronismo entre a execução de alvenaria e montagem de lajes dirigiu o foco desta etapa para definir as condições operacionais para sua obtenção. A partir da definição dos ritmos e do plano de ataque do empreendimento, procedeu-se o dimensionamento dos lotes e a freqüência de entrega de blocos no canteiro além do número de equipamentos necessários para sua movimentação no canteiro. Além disso, a partir das demandas do processo, optou-se por produzir argamassa de assentamento diretamente nos pavimentos, ao invés de utilizar centrais de distribuição. Outro processo que mereceu atenção foi o de fabricação de argamassa de assentamento. A utilização de centrais de processamento e bombeamento de argamassa para reboco foi avaliada e decidida. Dessa forma, procedeu-se o dimensionamento do número de centrais necessárias, bem como sua localização no canteiro, de acordo com a evolução empreendimento.

Assim como no estudo de caso 3, percebeu-se que houve relativamente pouco engajamento da equipe da empresa na consecução de demandas do processo. Coube à equipe de pesquisadores a condução das discussões e a preparação de todas as ferramentas utilizadas no estudo. Logo no início do processo o engenheiro de planejamento deixou de participar das discussões, cabendo ao engenheiro-coordenador a elaboração do PSP junto com a equipe de pesquisa (mais tarde tomou parte o engenheiro de obra).

O emprego do primeiro modelo de simulação desenvolvido possibilitou a introdução e discussão de dois conceitos de gestão da produção: nivelamento da produção e tempo *takt*. Neste caso, em função da necessidade de sincronização entre os processos de elevação de alvenaria e montagem de lajes, propôs-se o balanceamento desses processos, subordinando seus tempos de ciclo a um tempo *takt* de 5 dias (este valor foi utilizado também para alguns outros processos subsequentes), o que facilitava seu controle, inserindo uma rotina no processo. Com base neste balanceamento, a alvenaria e lajes de cada pavimento seriam concluídas a cada 10 dias.

Por fim, com relação à **contribuição do emprego da simulação para o processo de tomada de decisão**, ao contrário do estudo de caso 3, optou-se por inserir a simulação ao longo do processo de elaboração do PSP, em vez de dividir o estudo em duas fases (determinística e estocástica). Dois modelos foram elaborados. O primeiro foi um modelo que dizia respeito apenas aos processos de elevação de alvenaria e montagem de lajes (processos críticos). Este modelo (cujo tempo de desenvolvimento foi de apenas seis horas) foi introduzido durante o estudo dos fluxos de trabalho do empreendimento para avaliar os efeitos de cenários alternativos quanto ao número de frentes de trabalho a serem consideradas e seus impactos na redução de prazos.

Pelo pequeno número de processos modelados e pela facilidade de entendimento dos resultados deste modelo (uma linha de balanço resumia os resultados), suas informações foram utilizadas em discussões com o engenheiro-coordenador e em uma reunião envolvendo o responsável nacional pelos empreendimentos daquele nicho de mercado. Este modelo também contribuiu para apoiar a tomada de decisão da equipe da empresa pela necessidade de balanceamento entre os processos de elevação de alvenaria e os processos necessários para montagem de lajes pré-moldadas.

Outro modelo foi desenvolvido na parte final do estudo. Este modelo, por sua vez, representava todos os cinquenta e dois processos produtivos previstos na seqüência de execução da unidade-base do empreendimento. Além disso, em função da estratégia de ataque do empreendimento, foi necessária a modelagem de cada um dos dezessete blocos do empreendimento de forma individual elevando em muito a complexidade do modelo, o seu tempo de desenvolvimento (aproximadamente 120 horas) além do tempo de simulação (seis horas para que cada cenário fosse simulado). Este detalhamento excessivo também se refletiu na utilidade da linha de balanço que resumia os resultados da simulação, uma vez que

dificultava a avaliação por parte da equipe da empresa dado o número de atividades representadas nesta linha.

O elevado tempo de simulação impedia, ao contrário do que aconteceu nos estudos de caso 1 e 2, que o modelo pudesse ser utilizado durante as reuniões do PSP para explorar e testar cenários alternativos a partir de demandas da equipe da empresa. Desta forma, houve um distanciamento dessa equipe do uso da simulação, uma vez que os cenários eram simulados e seus resultados (linha de balanço) levados para as reuniões para discussão pela equipe de pesquisadores.

Ao contrário do primeiro modelo, o esforço despendido para a elaboração deste modelo não foi proporcional aos benefícios percebidos a partir da sua utilização. Seu uso restringiu-se a avaliar os impactos da variabilidade e de algumas estratégias de execução nos *lead times* dos blocos e final do empreendimento. Corrobora esta constatação, o número de cenários simulados com o primeiro modelo (cinco) contra apenas um cenário simulado utilizando o segundo modelo.

Estas circunstâncias, bem como informações a partir do questionamento dos participantes, corroboraram a percepção de que o emprego das ferramentas tradicionalmente utilizadas na elaboração do PSP (diagrama de seqüência de execução da unidade-base, linha de balanço, entre outras) agregaram maior valor ao processo de elaboração do PSP do empreendimento do que o emprego da simulação.

6.5.3.2 Facilidade de Uso

No que se refere à **iniciativa dos participantes no processo de modelagem**, em função das dificuldades para a utilização da simulação neste estudo, os cenários testados, especialmente utilizando o modelo inicialmente elaborado, foram iniciativas da equipe de pesquisa como forma de apoiar às discussões. Não houve, como nos estudos de caso anteriores demandas diretas por parte da equipe da empresa quanto ao testes de outros cenários.

Já com relação à **extensão do processo de elaboração**, o número de horas despendidas para a elaboração do PSP do empreendimento (36 horas em reuniões mais 22 horas de preparação) , como nos demais estudos, superou o tempo de desenvolvimento médio dos estudos que originaram o modelo de elaboração. Aproximadamente metade das horas despendidas concentraram-se nas etapas de estudo dos fluxos de trabalho do empreendimento e do

dimensionamento da capacidade dos recursos de produção, como ocorreu nos estudos de caso 2 e 3.

A ênfase maior dada a esta etapa ocorreu em função das restrições de prazo existentes e a necessidade da discussão e avaliação de alternativas para lidar com este problema. Além disto, a tipologia do empreendimento, blocos de edifícios, exigia uma atenção muito maior aos fluxos de trabalho das equipes de produção, visto que há maior interdependência entre processos, uma vez que as frentes de trabalho só passam a existir na medida em que os pavimentos vão sendo executados.

Já o tempo despendido para o desenvolvimento e emprego dos dois modelos de simulação (126 horas) foi o mais elevado de todos os estudos realizados. Enquanto o primeiro modelo elaborado requereu apenas 6 horas para o seu desenvolvimento, o segundo modelo construído consumiu 120 horas de trabalho. Paradoxalmente, o tempo de desenvolvimento do modelo não relacionou-se diretamente à sua utilidade para a tomada de decisão. Como já discutido o primeiro modelo, mais simples, acabou sendo mais utilizado para o teste de cenários.

Quanto à **contribuição para a comunicação e entendimento das decisões entre os participantes**, além de serem utilizadas nas discussões com fornecedores, as ferramentas adotadas serviram de base para discutir e avaliar os impactos das decisões com outros intervenientes. Duas reuniões foram realizadas para avaliação da evolução do PSP. A primeira teve a participação do engenheiro responsável nacionalmente pelos empreendimentos do nicho de mercado no qual o empreendimento Y2 se inseria. Nesta reunião, foram avaliados a estratégia de ataque propostas para o empreendimento, os fluxos de trabalho no empreendimento e os impactos dessas decisões em termos de necessidade de recursos de produção, bem como no atendimento ao prazo previsto para conclusão do empreendimento. Outra reunião semelhante foi mantida entre as equipes de pesquisa e da empresa e o gerente regional da empresa Y e representantes dos setores de suprimentos e engenharia da empresa.

Ainda durante o desenvolvimento do estudo, dois engenheiros foram contratados para a gestão do empreendimento. Nas duas oportunidades, procedeu-se uma apresentação das decisões tomadas de forma a familiarizá-los com o processo. Também nestas ocasiões, as ferramentas do PSP foram utilizadas para apoiar as discussões.

Este estudo encerrou-se antes que a fase de execução houvesse iniciado. Entretanto, no final do estudo o engenheiro de obra solicitou que todas as ferramentas geradas, diagrama de

seqüência da unidade-base, estudos dos fluxos de trabalho da unidade-base e do empreendimento, além do plano de ataque do empreendimento, fossem impressas e fixadas no escritório de obra, como forma de apoiar as discussões no canteiro de obras.

Com relação ao modelo tridimensional elaborado a partir do estudo, esta ferramenta também apoiou as discussões entre os envolvidos no processo, particularmente com funcionários da empresa que se integraram ao empreendimento.

Por fim, quanto à **possibilidade de continuação do processo após o estudo**, no início do estudo, o engenheiro de planejamento da empresa afirmou que o intuito da elaboração do PSP do empreendimento Y2 era a formalização de um processo que serviria de referência para empreendimento similares futuros. No estudo, a evolução das decisões tomadas foram registradas, bem como quais alternativas foram consideradas e por que haviam sido escolhidas ou descartadas. Uma descrição da seqüência de etapas seguidas e as ferramentas utilizadas também foram registradas com o objetivo de produzir um documento que pudesse auxiliar a empresa na elaboração do PSP de futuros empreendimentos.

Segundo o engenheiro-coordenador, havia interesse por parte empresa em continuar a implementação do PSP, entretanto com a presença de pesquisadores e não de forma autônoma. Esta consideração vinha ao encontro da postura dos membros da empresa ao longo dos dois estudos de caso realizados, nos quais o processo foi conduzido pela equipe de pesquisa.

7 O PSP E O EMPREGO DA SIMULAÇÃO COMO FERRAMENTA DE APOIO À TOMADA DE DECISÃO

7.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta uma discussão acerca dos resultados obtidos ao longo deste trabalho à luz de seus objetivos. Primeiramente, faz-se uma avaliação crítica do processo de elaboração do PSP de acordo com a seqüência de decisões previstas no modelo de elaboração proposto por Schramm (2004). Discute-se, ainda, as funções do PSP na gestão de empreendimentos na construção civil. Após, faz-se uma análise do emprego da simulação, bem como os impactos do uso de modelos reutilizáveis na elaboração do PSP. A partir dessas discussões, propõe-se um modelo para a elaboração do PSP a partir da utilização da simulação como ferramenta de apoio à tomada de decisão no PSP, bem como estágios para a implementação da simulação no PSP.

7.2 AVALIAÇÃO DO MODELO DE ELABORAÇÃO DO PROJETO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

7.2.1 Aderência ao Escopo de Decisões Previstas no Modelo de Elaboração

O modelo de elaboração do PSP (SCHRAMM, 2004) avaliado neste trabalho propõe duas unidades de análise: a unidade-base e o empreendimento. De acordo com o modelo, duas decisões dizem respeito à unidade-base: (a) a definição da seqüência de execução e o pré-dimensionamento da capacidade dos recursos de produção; e (b) o estudo dos fluxos de trabalho na unidade-base. Já com relação ao empreendimento, as decisões prescritas pelo modelo são: (c) definição da estratégia de ataque do empreendimento; (d) estudo dos fluxos de trabalho; (e) dimensionamento da capacidade dos recursos de produção; e (f) identificação e projeto de processos críticos. Ainda de acordo com o referido modelo, as decisões são

interconectadas e o processo de tomada de decisão é iterativo, ou seja decisões à jusante podem alterar decisões tomadas à montante.

Em todos os estudos realizados, a seqüência de decisões prescritas no referido modelo foram seguidas, mostrando-se adequada à consecução do estudo. Entretanto, percebeu-se nos estudos de caso que algumas decisões recebem maior ênfase no processo de elaboração do PSP. Com base evidências dos quatro estudos, notadamente o número de reuniões realizadas e o número de horas despendidas em cada etapa do processo (apresentados na figura 95, a seguir), pôde-se avaliar a maior ou menor dedicação das equipes dos empreendimentos a alguma ou algumas decisões em particular.

Unidade de análise	Etapas do PSP	Número de Reuniões Realizadas			
		EC1	EC2	EC3	EC4
Unidade-base	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Definição da Seqüência de Execução da Unidade-base ▪ Pré-dimensionamento da Capacidade dos Recursos de Produção 	14	02	04	03
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estudo dos fluxos de Trabalho na Unidade-base 		--	*	03
Empreendimento	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Definição da Estratégia de Ataque do Empreendimento 	02	01	01	02
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estudo dos Fluxos de Trabalho no Empreendimento 	10	08	09	08
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dimensionamento da Capacidade dos Recursos de Produção 				
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Identificação e Projeto de Processos Críticos 	--	--	01	02
Simulação	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reuniões de Discussão dos Resultados 	❖	❖	04	❖
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Desenvolvimento do Modelo (horas) 	80	06	40	126
Esforço total despendido	Número total de reuniões	26	11	19	18
	Total de horas despendidas em reuniões	52	22	38	36
	Duração do estudo (em meses)	14	06	08	08
-- Etapa não realizada (mesma unidade-base do estudo anterior) * Etapa realizada em conjunto com o estudo dos fluxos de trabalho no empreendimento ❖ Reuniões de discussão dos resultados da simulação inseridas no processo de elaboração do PSP					

Figura 95: quadro-resumo do esforço despendido para a realização das etapas do PSP nos estudos de caso (EC) desta pesquisa

No estudo de caso 1, por exemplo, houve um maior esforço nas decisões relativas à unidade-base do empreendimento, em função da implementação da estratégia de customização, enquanto que no estudo de caso 2, realizado na seqüência e com a participação da mesma equipe da empresa X, a ênfase recaiu sobre a etapa de estudo dos fluxos de trabalho no empreendimento. Neste caso, percebeu-se que o foco passou a ser um aprofundamento no entendimento dos impactos que decisões relacionadas ao dimensionamento dos recursos de produção (número de equipes) sobre os fluxos de trabalho e o *lead time* do empreendimento.

Com relação à definição da estratégia de execução do empreendimento, percebeu-se que sua consecução pode estar condicionada às decisões anteriores ao PSP, ficando relegada apenas a uma formalização do mesmo. Nos casos dos estudos de caso 1 e 2, a seqüência na qual os conjuntos de casas seriam executadas, bem como os conjuntos que fariam parte de cada frente de trabalho, já haviam sido decididos pela direção da empresa em função do plano de vendas. No estudo 3, enquanto o zoneamento do empreendimento já havia sido estabelecido com base na estratégia de vendas, a seqüência na qual as unidades habitacionais seriam atacadas internamente a essas zonas foi definida no estudo. Já no estudo de caso 4, todas as decisões relativas à definição do plano de ataque do empreendimento (zoneamento e seqüência de ataque dos edifícios) foram discutidas e avaliadas com base na evolução das decisões do PSP.

Já com relação aos estudos de caso 3 e 4, ambos realizados na empresa Y, a maior ênfase também foi dada à etapa de estudo dos fluxos de trabalho do empreendimento. Observou-se, ao longo dos estudos, uma supervalorização da linha de balanço (ferramenta utilizada nesta etapa) por parte da equipe da empresa.

Outras decisões, como o estudo dos fluxos de trabalho na unidade-base passam a ter maior importância em função da tipologia de empreendimento estudado. Nos estudos de caso 1, 2 e 3, nos quais a tipologia era a de casas assobradadas, esta etapa foi elaborada concomitantemente à definição da seqüência de execução da unidade-base ou ao estudo dos fluxos de trabalho do empreendimento. No caso do estudo de caso 4, no qual a tipologia era de blocos de edifícios, o estudo dos fluxos de trabalho nestas unidades-base torna-se muito relevante, uma vez que a abertura de frentes de trabalho está condicionada à execução dos diversos pavimentos que formam cada bloco.

Já com relação à identificação e projeto de processos críticos, essa etapa só foi desenvolvida nos estudos 3 e 4. No caso dos estudos 1 e 2, o fato de que a equipe da empresa já vinha

executando empreendimentos similares àqueles, fez com que tal etapa não fosse executada. No caso dos empreendimentos Y1 e Y2, por sua vez, foram discutidas algumas decisões necessárias à operacionalização daqueles processos considerados críticos, em ambos os casos elevação de alvenaria e montagem de lajes pré-fabricadas. É interessante notar que esses processos foram os mesmos considerados críticos nos estudos que originaram o modelo de elaboração, em empreendimentos habitacionais de interesse social. As decisões que fizeram parte desta etapa do PSP disseram respeito à adequação entre as demandas do empreendimento e as capacidades de fornecedores, ao dimensionamento de equipes e equipamentos necessários para sua consecução. Ao contrário dos estudos que originaram o modelo de PSP, nos quatro estudos de caso as empresas não possuíam mão-de-obra própria, nem produziam no canteiro elementos pré-fabricados. No caso da mão-de-obra, cabia aos subempreiteiros a responsabilidade pela execução dos processos construtivos. Assim, decisões de caráter operacional eram deixadas a cargo destes subempreiteiros com base em diretrizes da empresa construtora (basicamente as demandas originadas no PSP).

7.2.2 Extensão do Processo e Esforço para a Elaboração do PSP

De acordo com Schramm, Costa e Formoso (2006) o esforço necessário para a elaboração do PSP é pequeno, em torno de 12 a 16 horas para sua consecução (considerando tanto reuniões como a elaboração de preparação de ferramentas). Contudo, nos estudos realizados a carga horária despendida foi bastante superior a este número (de 11 a 26 reuniões que demandaram de 22 a 52 horas exclusivamente nessa atividade). Além disto, todos os estudos estenderam-se por um prazo bastante elevado (de 6 a 14 meses) e nos estudos 1 e 3 parte do processo de elaboração do PSP foi realizado concomitantemente à fase de execução dos empreendimentos.

Com relação ao tempo despendido em reuniões, cada estudo teve algumas peculiaridades. No estudo de caso 1, no qual foram necessárias 26 reuniões para sua consecução, durante o PSP foram realizadas discussões para implementação de uma abordagem de customização das unidades habitacionais. Estas discussões, bem como a elaboração de algumas ferramentas fizeram parte das reuniões do estudo. A inserção da simulação ao longo do estudo também contribuiu para que o número de reuniões necessárias fosse maior. Nesse caso, após o desenvolvimento do modelo de simulação foram realizadas reuniões para sua validação e para a discussão dos cenários simulados. Mesmo sendo iniciado cerca de 45 dias antes do início da

fase de execução, em função da extensão do processo de elaboração do PSP, só foi possível empregar algumas decisões do PSP na segunda fase do empreendimento.

O estudo 2 foi o estudo com o menor número de reuniões (11), mas não o estudo com a menor extensão (6 meses) entre os realizados. Este estudo caracterizou-se pela reutilização do modelo de simulação desenvolvido no primeiro estudo. Além disso, boa parte das características do empreendimento eram as mesmas do empreendimento anterior. Desta forma, o estudo concentrou-se na discussão de inúmeros cenários, na sua maioria relacionados a diferentes alternativas relacionada ao número de equipes de produção disponíveis no canteiro. A conclusão do estudo aconteceu antes da data de início da etapa de execução das unidades habitacionais. Contudo, isto só aconteceu uma vez que esta data foi protelada em aproximadamente quatro meses.

No estudo de caso 3, por sua vez, a utilização da simulação ocorreu após a conclusão da fase determinística do estudo. Ao todo foram necessárias 19 reuniões para o desenvolvimento do estudo que se estendeu por 8 meses. Entretanto, se considerada apenas a fase determinística do estudo, esta foi desenvolvida em 15 reuniões, num período de 04 meses.

Já o estudo 4, por sua vez foi desenvolvido através de 18 reuniões que se estenderam por 8 meses. Nesse estudo o emprego do primeiro modelo de simulação ocorreu integrou-se ao processo de elaboração do PSP no seu início. Entretanto, o segundo modelo foi desenvolvido próximo ao final do estudo, o que aumentou sua extensão em cerca de 1 mês.

Com base nestas evidências, percebe-se que nos três estudos nos quais foram desenvolvidos modelos de simulação (estudos 1, 3 e 4), houve um aumento na extensão do processo. O estudo 2, no qual houve a reutilização do modelo de simulação, foi o estudo com a menor extensão (6 meses) e foi concluído com o menor número de reuniões (11).

É importante ressaltar que dois fatores também concorreram para o aumento na extensão dos estudos de caso. Primeiro, as reuniões não mantiveram uma periodicidade constante. Muitas reuniões foram desmarcadas em função do envolvimento dos participantes em outras atividades nas respectivas empresas. Segundo, o fato de que em alguns períodos os estudos de caso aconteceram simultaneamente (houve sobreposição temporal entre os estudos 2, 3 e 4) acarretou sobrecarga de trabalho da equipe de pesquisa, forçando o cancelamento de algumas reuniões.

7.2.3 Informações Geradas Durante a Elaboração do PSP

A figura 96, a seguir, apresenta um resumo das principais informações geradas durante o PSP para apoio à gestão dos empreendimentos que fizeram parte desta pesquisa (EC1 - EC4) e comparando-as àquelas geradas nos estudos de caso desenvolvidos em 2004 e que deram origem ao modelo de elaboração do PSP.

Informações geradas no PSP	Estudos de Caso				
	2004	EC1	EC2	EC3	EC4
▪ Definição da seqüência de execução da unidade-base	X	X	X	X	X
▪ Dimensionamento dos recursos de produção	X	X	X	X	X
▪ Estudo dos fluxos de trabalho (unidade-base e/ou empreendimento)	X	X	X	X	X
▪ Definição do plano de ataque do empreendimento	X	X	X	X	X
▪ Elaboração do plano de longo prazo do empreendimento	X	X	X	X	X
▪ Projeto de processos críticos	X			X	X
▪ Apoio à discussão e implementação da abordagem de customização		X			
▪ Elaboração de ferramentas de apoio ao processo de customização		X			
▪ Discussão e avaliação do PSP com fornecedores e subempreiteiros		X	X	X	X
▪ Elaboração e emprego de modelo de simulação		X	X	X	X
▪ Elaboração e emprego de curvas de agregação de recursos		X			
▪ Planejamento integrado da execução de urbanização e áreas de uso comum				X	X
▪ Elaboração de documento resumo do PSP					X
▪ Estudo de leiaute do canteiro				X	X
▪ Análise de curvas de gasto para avaliação de estratégias de ataque alternativas		X			
▪ Elaboração de ferramentas de apoio ao PCP			X	X	X

Figura 96: principais informações geradas no PSP nos estudos de caso (EC) desta pesquisa

De acordo com a figura 96, cinco informações geradas foram comuns a todos os estudos de caso: (a) a seqüência de execução da unidade-base do empreendimento; (b) o dimensionamento dos recursos de produção; (c) o estudo dos fluxos de trabalho da unidade base e do empreendimento; (d) o plano de ataque do empreendimento; e (e) o plano de longo prazo do empreendimento. Entretanto, nos quatro estudos realizados nesta pesquisa percebe-se que houve um aumento no escopo das informações geradas, o que contribuiu para o aumento na extensão do PSP quando comparada aos estudos desenvolvidos em 2004.

Por exemplo, no caso do estudo de caso 1, que teve a maior extensão, bem como requereu o maior número de reuniões, uma demanda importante surgida ao longo do estudo foi a implantação da estratégia de customização das unidades-habitacionais. Durante a elaboração do PSP, tanto as opções de customização, bem como sua operacionalização, envolveram a promoção de reuniões envolvendo os responsáveis pela sua viabilização.

As quatro primeiras informações apresentadas na figura 96 estão diretamente relacionadas à operacionalização da seqüência proposta no modelo de elaboração, sendo base para a consecução do PSP. Já o plano de longo prazo do empreendimento (representado pela linha de balanço ou pelo gráfico de Gantt) representa um dos produtos finais do PSP, resumindo boa parte das discussões ao longo do PSP.

Já as demais informações geradas são, de alguma forma, baseadas nestas informações básicas. Algumas delas são específicas às características dos empreendimento, como a definição de opções de customização, no caso do estudo de caso 1, por exemplo. Outras, como o estudo do leiaute do canteiro, são imprescindíveis e, embora não tenham feito parte do escopo do PSP nos estudos de caso 1 e 2, foram discutidas e formalizadas pelas respectivas equipes fora das reuniões realizadas.

A análise dos tipos e dos objetivos das informações geradas durante os estudos de caso, permite observar que o escopo de decisões proposto pelo modelo de elaboração do PSP induz a uma forte ênfase na tomada de decisões de caráter operacional. Em todos os estudos, o PSP teve como produto principal o desenvolvimento de um plano de longo prazo do empreendimento, representado por uma linha de balanço ou por um gráfico de Gantt. Esta ênfase, por sua vez, também se evidenciou na valorização dada pelos participantes a algumas ferramentas utilizadas nos estudos. Este foi o caso nos estudos 1 e 2, nos quais houve maior ênfase à definição do diagrama de seqüência de execução da unidade-base e nos estudos 3 e 4, nos quais a ênfase recaiu sobre o estudo dos fluxos de trabalho do empreendimento (linha de balanço). Desta forma, o modelo de elaboração desempenha o papel principal de formalizar e desdobrar as decisões do PSP em um nível operacional, deixando de fora questões relacionadas à concepção estratégica.

7.2.4 Introdução e Discussão de Conceitos de Gestão da Produção na Elaboração do PSP

O processo de elaboração do PSP suscitou a introdução e discussão de alguns conceitos relacionados à gestão da produção. Alguns conceitos foram comuns a todos os estudos, enquanto outros não. Ainda durante a etapa de definição da seqüência de execução da unidade-base, foram introduzidos os conceitos de lote de produção e lote de transferência, fundamentais para a elaboração do estudo dos fluxos de trabalho e posteriormente na construção do modelo de simulação do empreendimento. Além disso, estes conceitos também foram importantes nas discussões sobre a necessidade de terminação dos processos e de controle da aderência aos lote na fase de execução da obra.

O fluxo de trabalho foi outro conceito comum a todos os estudos e sua introdução foi facilitada pela utilização da linha de balanço na etapa de estudo dos fluxos de trabalho da unidade-base e do empreendimento. Associado ao conceito de fluxo de trabalho, buscou-se discutir as diferenças entre os fluxos de trabalho e o fluxo do produto, particularmente em função da priorização dos fluxos de trabalhos ininterruptos em detrimento do fluxo contínuo (do produto) e seus efeitos no aumento da parcela de atividades sem agregação de valor (estoque de trabalho em progresso) e o respectivo aumento do *lead time* do empreendimento.

Neste ponto, percebeu-se certa dificuldade na introdução do conceito de fluxo contínuo nos estudos realizados. Por um lado, havia uma pressão dos subempreiteiros para que as equipes de produção especializadas, a partir da sua entrada no canteiro, tivessem à sua disposição frentes de trabalho suficientemente grandes (representada por estoque de casas previamente concluídas pela equipe precedente) para que o fluxos de trabalho dessas equipes não fossem obstruídos até a conclusão de todas as suas atividade no canteiro. Essa pressão era geralmente reforçada pelos arranjos contratuais notoriamente empregados por estas empresas, que se baseiam na remuneração dos operários pelo volume de produção por período trabalhado.

Um outro efeito da manutenção do fluxo de trabalho das equipes ininterruptos pôde ser sentido na falta de aderência da execução do empreendimento ao plano de ataque e à seqüência de execução propostos no PSP. Como aconteceu no estudo de caso 3, quando não houve liberação de frentes de trabalho para que as equipes de alvenaria mantivessem o fluxo de trabalho previsto, houve uma tendência natural de que esta equipe, no intuito de evitar sua

ociosidade e por conseqüência redução nos seus ganhos, buscasse outras frentes de trabalho para atuar, em detrimento do plano de ataque previamente definido para o empreendimento.

A utilização da simulação permitiu que os efeitos desse comportamento fossem avaliados nos estudos de caso X1 e X2. Naqueles estudos, de acordo com os resultados do modelo, embora houvesse o aumento do número de algumas equipes (como do processo de elevação de alvenaria), não havia a esperada redução no *lead time* do empreendimento, mas, ao contrário, seu aumento. Isto acontecia em função da disponibilidade de um maior número de frentes de trabalho alternativas para equipes que por ventura não tivessem condições de acessar às unidades habitacionais preferenciais no plano de ataque do empreendimento.

Contribuiu também para a dificuldade de implementação do conceito de fluxo contínuo a forma como as empresas construtoras tradicionalmente mensuram o avanço físico em seus empreendimentos. Em ambas as empresas estudadas, os sistemas de medição baseavam-se no percentual executado de um determinado processo comparado ao que fora planejado. Este sistema tende a incentivar a necessidade de manter os fluxos de trabalho ininterruptos, como forma de aumentar a taxa de utilização dos recursos produtivos, como discutido por Kim e Ballard (2000).

Assim, tanto no empreendimento X2 como Y1, a ocorrência de problemas na execução de lajes pré-fabricadas impediram que fossem executados os pavimentos superiores das unidades habitacionais. Em ambos os casos, a solução encontrada foi a mesma: a execução antecipada de pavimentos térreos em outras unidades diferentes daquelas previstas na estratégia de ataque do empreendimento, como forma a impedir a ociosidade das equipes, bem como do distanciamento do percentual de execução previsto pelo planejamento.

Por outro lado, nos estudos Y1 e Y2 buscou-se priorizar a criação de condições para o fluxo contínuo do produto, através da sincronização entre processos, subordinando a execução de alvenaria e montagem de lajes ao tempo *takt*, da mesma forma que proposto por Bulhões (2009)). Nesse caso, as equipes de produção foram dimensionadas em função do conteúdo de trabalho dos processos, de forma a reduzir a ociosidade de seus membros.

Particularmente no estudo de caso 1, a partir da introdução da abordagem de customização, os conceitos relativos à flexibilidade de produto e à customização tardia demandaram a busca por fornecedores mais flexíveis em termos de tamanhos de lotes de fornecimento e de redução dos *lead times* de entrega.

O conceito de variabilidade foi introduzido através do uso da simulação, sendo ressaltada a necessidade de sua consideração durante as reuniões e, no caso específico da empresa Y, nos treinamentos realizados. Durante as reuniões de elaboração do PSP os participantes eram solicitados a dimensionar os tempos de ciclo dos processos em termos de uma distribuição triangular (valores otimista, mais provável e pessimista). Entretanto, nos estudos de caso 3 e 4, percebeu-se que havia uma tendência dos engenheiros em subestimar a variabilidade de algumas atividades. Os engenheiros estimavam um valor mais provável e, após, simplesmente subtraíam ou somavam um dia para determinar os tempos otimista e pessimista. Em outras situações, entretanto, os engenheiros baseavam-se em dados históricos de produtividades, habitualmente utilizados nas atividades de planejamento da produção.

7.2.5 Funções e Produtos do PSP

Considera-se pertinente discutir as funções que o PSP pode exercer na gestão de empreendimento, uma vez que isto não foi explorado no trabalho que originou o modelo de elaboração do PSP (SCHRAMM, 2004).

Desta forma, com base nos estudos de caso realizados neste trabalho pode-se elencar quatro papéis básicos: (a) promover discussões e questionamentos; (b) incentivar a adoção de uma visão sistêmica; (c) sistematizar, formalizar e registrar decisões; e (d) estabelecer um estado futuro a ser alcançado.

O processo de elaboração do PSP, como proposto neste trabalho, no seu papel mais básico, **promove discussões e questionamentos** acerca das características do sistema de produção do empreendimento. Nos estudos 1, 3 e 4, especialmente, as reuniões de elaboração representaram um momento de focalização, discussão e experimentação para os envolvidos, tanto da empresa como de fornecedores e subempreiteiros. Além disto, a adoção do modelo de elaboração estabelece um roteiro sistemático para as discussões, determinando objetivos a serem perseguidos, em termos de decisões e subprodutos, ao longo do processo, ordenando-o. De fato, houve uma grande aderência, em todos os estudos, à seqüência de decisões propostas.

Durante as reuniões de elaboração, os envolvidos manuseiam os projetos do empreendimento, analisando-os criticamente e estabelecendo necessidades de detalhamento de certos elementos construtivos, a medida em que avançam as discussões para a definição da seqüência construtiva a ser utilizada, como aconteceu nos estudos 2 e 3. O mesmo pode ocorrer com relação às tecnologias construtivas a serem empregadas, caso não haja algum tipo de

impedimento quanto ao emprego de alternativas. Ainda, práticas correntes podem ser questionadas e algumas vezes novas podem ser propostas, como no estudo de caso 1, no qual processos decorrentes da customização das unidades habitacionais foram analisados e reestruturados, ou no estudo de caso 2, no qual a forma de ataque do processo de alvenaria até então utilizada pela empresa foi modificada com base nas discussões do PSP.

O PSP também **incentiva a adoção de uma visão sistêmica**, uma vez que as decisões tomadas tem seus impactos avaliados considerando o sistema de produção como um todo. Isto foi possível através das ferramentas adotadas – linha de balanço, modelos de simulação –, bem como pela participação de vários atores do sistema de produção – engenheiro de planejamento, fornecedores de materiais e sistemas construtivos e subempreiteiros.

Houve a necessidade de negociações com fornecedores de materiais buscando o estabelecimento de acordos quanto a prazos de fornecimento, tamanhos de lote, composição e frequência de entrega dos lotes, a fim de viabilizar decisões do PSP. Em alguns casos, houve pressões por parte de fornecedores para entregas em lotes maiores, buscando a redução de custos, ou em composições que podem ir de encontro às necessidades do empreendimento. No caso do estudo de caso 1, o insucesso em negociar entregas mais frequentes e em lotes menores com fornecedores de longa data levou à sua substituição por fornecedores mais flexíveis. Já nos estudos 3 e 4, buscou-se negociar com os fornecedores de pré-fabricados, blocos estruturais, entre outros, a fim de viabilizar a estratégia de execução pretendida pela empresa Y.

Da mesma forma, no estudo de caso 1, houve necessidade de discussões integradas entre os responsáveis pelos projeto, pela execução e pelos suprimentos a fim de viabilizar a abordagem de customização pretendida. Estas discussões permitiram uma visão mais ampla do sistema de produção, dos impactos de decisões e da necessidade de sua consideração de uma forma integrada e não isolada, buscando equalizar interesses desses atores em busca de uma solução de consenso.

O PSP **formaliza e registra decisões**. Embora muitas das decisões tomadas ao longo da elaboração do PSP não sejam novidade para os envolvidos, muitas vezes essas decisões não são adequadamente formalizadas. No estudo de caso 1, ficou evidente que não havia um consenso sobre a seqüência de execução da unidades habitacionais na empresa envolvida,

mesmo que sua tipologia já tivesse sido utilizada anteriormente em vários empreendimentos anteriores.

Desta forma, o processo de elaboração do PSP prevê que todas as decisões tomadas sejam formalmente registradas e, ao final do processo, um relatório seja elaborado e utilizado para embasar tanto as decisões ao longo da fase de execução, como a elaboração do PSP de futuros empreendimentos. Isto efetivamente ocorreu nos estudos de caso 3 e 4 nos quais houve a substituição do engenheiro de produção durante os primeiros meses de execução (estudo de caso 3) e a contratação de um novo engenheiro de produção na fase final da elaboração do PSP (estudo de caso 4). Em ambos os casos, os relatórios e ferramentas elaborados durante o processo foram utilizados como referência por estes profissionais a fim de integrá-los aos processos em execução.

Após concluído, o PSP **estabelece um estado futuro a ser alcançado**. Um plano de longo prazo pode ser considerado como o produto final do PSP. Entretanto, além de um conjunto de datas-marco a serem atingidas, este plano condensa uma série de diretrizes acerca de como o sistema de produção deve ser organizado para consecução destas datas-marco, ou, conforme Askin e Goldberg (2002), como os recursos devem ser gerenciados para produzir o produto final.

Estas diretrizes, que, segundo Slack *et al.* (1997), relacionam-se a decisões de nível operacional do PSP, estão representadas pelas informações contidas no plano de ataque do empreendimento, na seqüência de execução das unidades-base, nos estudos dos fluxos de trabalho da unidade-base e do empreendimento, e nas necessidades de capacidade dos recursos de produção necessários, demandas quanto ao fornecimento de materiais, entre outras.

Assim, em todos estudos de caso realizados, após a conclusão do PSP, essas ferramentas foram utilizadas no apoio à tomada de decisão na fase de execução, algumas vezes, como no estudo de caso 3, substituindo planos de longo prazo anteriormente elaborados. Desta forma, passaram a ser tomadas decisões buscando à aderência a estas diretrizes ou, mesmo quando não é possível tal aderência, as informações do PSP podem ser utilizadas na avaliação de alternativas de recuperação ao longo da fase de execução, como aconteceu no estudo de caso 3.

Entretanto, com base nas informações coletadas na etapa de execução nos estudos de caso 2 e 3, percebeu-se que houve nos dois casos dificuldades em implementar as diretrizes do PSP. No estudo 3, houve a necessidade de triplicar o número de frentes de trabalho simultâneas para a recuperação de atrasos, enquanto no estudo 2 a empresa optou por rescindir o contrato o subempreiteiro principal. Isto mostrou que apenas projetar o sistema de produção não é suficiente, se as ações necessárias para sua operacionalização não forem realizadas.

Um dos problemas mais recorrentes para a não operacionalização das diretrizes do PSP refere-se à deficiências no cumprimento do papel do planejamento de médio prazo, na medida em que a não remoção das restrições à execução dos pacotes de trabalho, como a falta de projetos (estudo 2), liberação de áreas do terreno para execução (estudo 2), a não disponibilização do número mínimo de equipes no canteiro (estudos 2 e 3), refletiram diretamente na alteração nos ritmos de produção e nos fluxos de trabalho das equipes, como também no cumprimento do plano de ataque do empreendimento.

7.3 AVALIAÇÃO DO EMPREGO DA SIMULAÇÃO NA ELABORAÇÃO DO PSP

7.3.1 Modelagem e Simulação na Elaboração do PSP

A elaboração do PSP envolveu a construção de diferentes tipos de modelos (tanto as ferramentas elaboradas, como os modelos de simulação), com diferentes funções, no decorrer do processo, cujas informações se inter-relacionam em um processo evolutivo, de acordo com a seqüência de elaboração.

Na fase determinística, o diagrama de precedência elaborado durante a definição da seqüência de execução da unidade-base corresponde a um modelo descritivo (PRICE; JOHN, 2004), utilizado primeiramente para uma proposta de seqüência elaborada pelo engenheiro e discutida e refinada com a participação dos demais envolvidos, como mestre-de-obras, subempreiteiros, fornecedores, entre outros. Após obter-se um consenso, o diagrama de precedência passa a representar um modelo prescritivo (PRICE; JOHN, 2004), utilizado para guiar o processo de planejamento e controle da produção quanto à seqüência na qual os processos devem suceder-se na execução de cada unidade-base do empreendimento. Nos estudos de caso 1 e 2 este modelo foi bastante importante na viabilização da estratégia de

customização empregada pela empresa X, que requereu a padronização da seqüência de execução dos seus empreendimentos.

A linha de balanço, por sua vez, representa um modelo preditivo (PRICE; JOHN, 2004), no qual podem ser verificados de forma determinística e estática o impacto de algumas decisões nos fluxos de trabalho e no prazo final do empreendimento. Este modelo também assume um papel descritivo durante a sua elaboração, uma vez que serviu em todos os estudos como base para as discussões, não apenas entre integrantes da equipe da empresa, como entre fornecedores e subempreiteiros.

Já o modelo utilizado para representar a estratégia de ataque do empreendimento tem um caráter prescritivo, buscando guiar a trajetória das diferentes equipes de produção através das unidades-base ao longo da execução do empreendimento.

Por fim, o modelo de simulação, ao contrário dos demais, viabiliza duas considerações relevantes: a compreensão das interações dinâmicas entre os diferentes processos que compõem o sistema de produção do empreendimento e a consideração da variabilidade inerente aos processo produtivos. De acordo com a classificação de Pidd (2004), acerca dos diferentes enfoques das modelagem de sistemas, pode-se afirmar que os modelos desenvolvidos ao longo da elaboração do PSP foram utilizados como “ferramentas para pensar”. Nesse sentido, cenários foram estabelecidos e utilizados tanto como representação de possíveis projetos e mudanças dos sistema de produção sob estudo, como para a representação de *insights* para o debate (PIDD, 2004). Esta aplicação ocorreu principalmente nos estudos 1 e 2, durante os quais os modelos desenvolvidos serviram de base para discussões entre as pessoas envolvidas na definição do PSP.

Além disto, alguns modelos também desempenham uma função de “ferramenta para a tomada de decisões de rotina” (PIDD, 2004), suportando decisões de planejamento e controle da produção no dia-a-dia da execução do empreendimento. A utilização das ferramentas de monitoramento propostas ao longo do PSP no planejamento de médio e curto prazo ilustram esta função. Entretanto, os modelos elaborados no PSP podem também ser utilizados ao longo da execução do empreendimento, servindo como ferramentas de referência ao processo de planejamento e controle da produção. No estudo de caso 3, por exemplo, o modelo de simulação foi utilizado na avaliação de uma estratégia de recuperação de atrasos no empreendimento.

Durante a fase dinâmica procede-se as primeiras discussões acerca da estrutura do sistema de produção do empreendimento. As principais decisões podem ser rapidamente modeladas e avaliadas através das ferramentas utilizadas nesta etapa, em especial a linha de balanço. Deterministicamente, pode-se explorar alguns cenários durante as reuniões, interagindo com os participantes. Neste sentido, o emprego de ferramentas visuais facilita o processo de modelagem.

Conforme já discutido, a partir das informações provenientes das primeiras quatro etapas do PSP são utilizadas para a construção dos modelos de simulação. A simulação pode desempenhar papéis diferentes em função do momento que é introduzida, em relação à fase determinística da elaboração do PSP. Quanto mais cedo é introduzida, mais simples devem ser os modelos, como é o caso do modelo utilizado inicialmente no estudo de caso 4, focado nos processos considerados críticos. A reutilização de modelos também facilita a introdução da simulação nas etapas iniciais do PSP – isto foi observado no estudo de caso 2. Nesse estudo, um dos principais papéis da fase determinística foi identificar as principais diferenças entre os empreendimentos X1 e X2, como forma de se obter as informações necessárias para a adequação do modelo anteriormente construído. Grande parte do esforço, antes alocado ao desenvolvimento do modelo, passou a ser empregado na utilização do modelo para o teste de cenários. Situação contrária pôde ser observada no estudo 3, no qual houve uma tendência de não valorização da etapa estocástica, em função da concentração de esforços na etapa determinística. Assim, quanto mais cedo o modelo de simulação estiver disponível, maiores as oportunidades para seu potencial emprego.

7.3.2 Nível de Detalhamento dos Modelos

Neste trabalho, os modelos construídos procuraram representar os sistemas de produção dos empreendimentos considerando suas particularidades, e focando nas inter-relações dos processos produtivos. Não se buscou, desta forma, detalhar processos isolados no nível de suas operações constituintes.

Os sistemas de produção foram modelados em um maior nível de detalhamento e buscando aproximar os modelos das características reais ou pretendidas para os sistemas de produção sob estudo, não lançando mão de modelos teóricos ou idealizados para demonstrar os efeitos da adoção de diferentes conceitos de gestão da produção, como aqueles empregados em outros trabalhos que utilizaram simulação na construção civil - vide o trabalho de Draper e

Martinez (2002), por exemplo. Modelos mais simples permitem demonstrar os efeitos da aplicação de conceitos de gestão da produção mais diretamente. Isto pôde ser percebido no estudo de caso 4, no qual o modelo construído para os processos de elevação de alvenaria e montagem de lajes permitiu que fossem mostrados os efeitos da variabilidade e da sincronização dos processos nos fluxos de trabalho e do aumento do número de frentes de trabalho nos *lead times* desses processos.

Já os modelos mais detalhados, como os desenvolvidos nos estudos de caso 1 e 2, foram empregados para analisar mais detalhadamente os efeitos de decisões em um nível operacional, como a relação entre capacidade e programação⁵⁴, como forma de dimensionar a capacidade dos recursos de produção (número de equipes e alocação de atividades a essas equipes). Nestes dois estudos, percebeu-se que a equipe da empresa já possuía certo conhecimento sobre o sistema de produção sendo projetado, em função da experiência em empreendimentos similares. Neste caso, utilizou-se a simulação como forma de conhecer mais profundamente os efeitos que algumas decisões poderiam ter sobre o comportamento do sistema de produção. Nesse sentido, no estudo 2 representou o processo de elaboração do PSP em que mais cenários foram testados, muitos deles ao longo das reuniões.

Como os modelos representavam detalhadamente o sistema de produção sob estudo, os resultados das simulações aproximaram-se mais da percepção dos envolvidos acerca desses sistemas e evidenciaram os efeitos sistêmicos das decisões simuladas, possibilitando a avaliação e comparação dos efeitos dessas mudanças com suas experiências práticas, o que aumentou a credibilidade do modelo, reforçando também sua utilidade. Esta consideração pode ser evidenciada nas discussões ao longo das reuniões de utilização do modelo de simulação nos estudos de caso 1 e 2, através das solicitações de construção e teste de cenários alternativos pela equipe de produção da empresa X, nas quais os participantes identificaram comportamentos do modelo similares àqueles encontrados no sistema real.

Entretanto, o emprego de modelos mais detalhados apresentam algumas desvantagens. Primeiro, o maior detalhamento dos modelos afeta o esforço e o tempo requeridos para o desenvolvimento, como foi o caso nos estudos 1 e 4. Segundo, o tempo necessário para que

⁵⁴ Segundo Meredith e Shafer (2002), há uma relação íntima entre capacidade e programação, já que uma programação ruim pode resultar em um problema de capacidade, bem como a escassez de capacidade pode levar a dificuldades constantes na programação. Dessa forma o planejamento de capacidade é voltado basicamente para a aquisição de recursos produtivos, enquanto a programação preocupa-se com o momento em que esses recursos serão utilizados. Entretanto, ainda segundo os autores, é difícil separar as duas funções.

cada cenário seja simulado também aumenta, dificultando a utilização da simulação durante as reuniões do PSP. Nos estudos de caso 1 e 2, cada simulação demandava em torno de 20 minutos para sua consecução, possibilitando que muitos cenários fossem propostos e simulados ao longo das reuniões com a equipe da empresa, enquanto no estudo 4, o modelo demandava em torno de 6 horas para o teste de cada cenário. Terceiro, com um maior nível de detalhamento, qualquer pequena modificação na configuração do sistema de produção requer a respectiva atualização do modelo.

7.3.3 Apoio da Visualização no Processo de Simulação

Este trabalho propôs a integração da linha de balanço como uma ferramenta de visualização dos resultados da simulação. As principais vantagens desta integração é que a linha de balanço registrava os fluxos de trabalho e do produto ao longo do tempo, auxiliando na verificação e na validação do modelo, bem como na análise dos efeitos de mudanças propostas no sistema de produção. Desta forma, procurou-se valorizar a análise dos resultados da simulação não apenas sob o ponto de vista das atividades de transformação mas, sobretudo, das atividades de fluxo.

Entretanto, embora apresentando vantagens, o emprego da visualização nos estudos de caso foi limitada. Embora o *software* utilizado para simulação permitisse a visualização do processo em tempo real, seus recursos nesse sentido eram bastante limitados em função do nível de compreensão dos participantes e do número de entidades e processos presentes nos modelos (função do nível de detalhamento empregado). O apoio da linha de balanço, por sua vez, também foi limitado pelo número de processos representados. Para contornar este problema, algumas vezes foram geradas linhas de balanço na qual constavam apenas os processos considerados críticos, de forma a tornar a avaliação dos dados mais objetiva e simples.

Desta forma, além de uma melhor avaliação quanto ao nível de detalhamento dos modelos de simulação, considera-se que outras técnicas poderiam ser utilizadas para tentar melhorar este aspecto. Uma opção, embora não empregada neste trabalho em função dos custos para aquisição do *software* e do tempo necessário para o treinamento no seu uso, é o CAD 4D, que combina um modelo 3D com atividades do empreendimento para mostrar sua progressão ao longo do tempo (GAO; FISCHER, 2008). Nesse caso, os dados provenientes do modelo de simulação podem ser utilizados na construção de modelos 4D, permitindo a visualização

espacial da seqüência construtiva ao longo do tempo, e servindo como base para discussões. No estudo de caso 4, embora construído de forma menos sofisticada, um modelo 4D foi empregado nas discussões relativas a avaliação da estratégia de ataque do empreendimento e da seqüência de alguns processos.

Também é importante ressaltar que o emprego da simulação no PSP não buscou soluções ótimas para as questões discutidas ao longo do processo, mas sim apoiar as discussões ampliando o entendimento sobre algum aspecto do sistema de produção em estudo. Este papel é corroborado por Robinson *et al.* (2004), segundo os quais, o processo de modelagem e simulação não é desenvolvido para encontrar uma resposta ou respostas únicas ou definitivas, mas para embasar o processo decisório, ajudando os envolvidos a ampliar seu entendimento do problema em questão.

7.3.4 Reutilização de Modelos

Neste trabalho, foram empregadas duas das formas de reutilização discutidas por Pidd (2002) e Robinson *et al.* (2004). A primeira foi a de reutilização de componentes de simulação. Paul e Taylor (2002) incluem nesta categoria a reutilização de componentes básicos (processos, recursos, filas) que fazem parte dos pacotes comerciais de simulação, bem como a reutilização de componentes construídos para complementar as funções dos componentes originais. Ambos os tipos de reutilização de componentes foram empregados. Baseado na avaliação das funções dos componentes básicos disponíveis, propôs-se a construção de um componente (módulo) genérico que sumarizasse as características básicas de um processo produtivo. Este componente teve como objetivo a redução do tempo de desenvolvimento do modelo, uma vez que simplificou o processo de modelagem dos processos produtivos que compunham o sistema de produção dos empreendimentos estudados. Desta forma, o componente (ou módulo) genérico proposto neste trabalho foi utilizado na construção de todos os modelos de simulação desenvolvidos complementando as funções dos componentes originais disponíveis no *software* de simulação. Esse módulo representava um processo produtivo e condensava suas características básicas, já discutidas neste trabalho.

Um segundo componente genérico foi proposto no estudo de caso Y2. Este módulo representava a formação de um buffer de unidades repetitivas a fim de possibilitar fluxo de trabalho ininterrupto a um determinado processo produtivo. Este módulo permitia ainda representar uma decisão comum a empreendimentos compostos por edifícios: a inversão da

direção do fluxo de trabalho – se do pavimento térreo em direção aos pavimentos superiores, ou vice-versa. Da mesma forma, o objetivo da construção desse componente também foi a simplificação e a redução do tempo de modelagem.

O nível de abstração utilizado na construção do primeiro módulo proposto permite que o mesmo represente um processo produtivo não apenas no contexto da construção civil. Além disto, o uso do módulo permitiu que se construíssem outros componentes reutilizáveis com um nível maior de agregação. No estudo de caso 2, por exemplo, este expediente foi utilizado quando da construção de um submodelo que detalhava o processo de execução de *radiers*. Embora não tenha sido formalmente reutilizado, o sub-modelo construído poderia ser empregado em modelos de outros empreendimentos (desde que a seqüência de execução do processo se mantivesse a mesma). Conforme Robinson *et al.* (2004), estes módulos ou submodelos podem vir a formar uma biblioteca de componentes reutilizáveis.

A segunda forma de reutilização empregada neste trabalho foi a reutilização do próprio modelo de simulação, o que ocorreu efetivamente no estudo de caso 2. Este tipo de reutilização é, segundo Robinson *et al.* (2004) a forma de reutilização mais complexa e menos freqüente. Há, ainda segundo aqueles autores, duas formas de reutilização de modelos: em um ambiente diferente para o qual o modelo foi desenvolvido ou a reutilização repetitiva do modelo para o mesmo propósito (o que é execução relativamente fácil).

No caso do estudo de caso 2, procedeu-se a reutilização do modelo de simulação desenvolvido inicialmente para o empreendimento X1 (estudo de caso 1), o que representou uma forma intermediária de reutilização àquelas apontadas por Robinson *et al.* (2004). Embora o procedimento tenha ocorrido dentro de uma mesma organização, seu emprego se deu em empreendimentos distintos, mas que guardavam características construtivas similares. Desta forma, foram necessárias algumas pequenas adaptações no modelo originalmente proposto para o empreendimento X1 – que consumiram 6 horas para sua consecução – para que o mesmo pudesse ser reempregado no desenvolvimento do PSP do empreendimento X2. Essas adaptações, basicamente na atualização de algumas relações de precedência e inclusão de poucos processos, por sua vez, não repercutiram na necessidade de um novo processo de verificação da lógica de todo o modelo, o que possibilitou sua imediata utilização.

Desta forma, a replicação da mesma seqüência construtiva em empreendimentos de uma mesma empresa possibilitaram a reutilização do modelo, conforme apontam Mukkamala,

Smith e Valenzuela (2003). Nesse caso, o processo de modelagem caracterizou-se pela repetitividade e os modelos, similares em vários aspectos, apresentaram somente pequenas diferenças, o que reduziu o esforço de modelagem. Entretanto, é importante salientar que, enquanto a reutilização de componentes ou submodelos podem não depender do sistema de produção sendo simulado, considerando que para isto estes artefatos devem ser concebidos de forma genérica do que focada na resolução de um problema específico, a estratégia de reutilização de modelos utilizada neste trabalho foi viabilizada entre empreendimentos com características similares de uma mesma empresa (estudos de caso 1 e 2). O elemento fundamental que permitiu a utilização dessa estratégia foi a manutenção de uma seqüência de execução da unidade-base comum aos dois empreendimentos.

Embora não representasse uma estratégia inicial dos estudos, foi também empregada uma abordagem de modelagem conhecida como abordagem hierárquica. Segundo Oses, Pidd e Brooks (2004), nesta abordagem primeiramente são especificadas as partes principais da estrutura e seus relacionamentos sem importar-se com detalhes particulares. Posteriormente, cada parte pode então ser decomposta em suas partes constituintes. Assim, no estudo de caso 2 o processo de execução de *radiers*, que até então era modelado de forma agregada, foi decomposto em seus subprocessos constituintes, com o objetivo de possibilitar avaliar o uso dos recursos produtivos. Este componente, por sua vez, poderia vir a ser utilizado em outros modelos da empresa, ou de outras empresas que utilizassem a mesma seqüência construtiva para o referido processo.

7.3.5 Dificuldades de Implementação da Simulação no PSP

Neste trabalho, foram enfrentadas algumas dificuldades com relação ao uso da simulação. A primeira dificuldade enfrentada para a utilização da simulação na elaboração do PSP diz respeito à existência de duas pressões contrárias, que agem sobre a definição do momento de início do PSP. A primeira refere-se à percepção dos benefícios da antecipação do PSP em relação ao momento de início do empreendimento, como uma forma de dispor de um período de tempo maior para a sua consecução. A segunda age no sentido contrário, impulsionada pelo nível de incerteza existente, com vistas a protelar o início do processo na tentativa de reduzir o nível de incerteza com relação ao empreendimento, o que pode gerar a necessidade de um maior número de revisões das decisões tomadas ao longo do processo (representado na figura 97, a seguir).

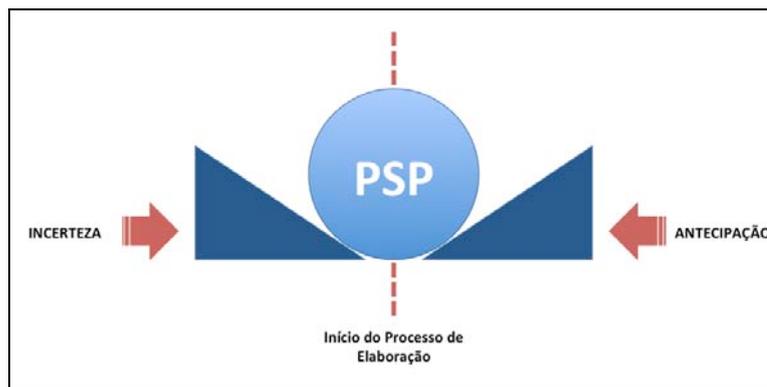


Figura 97: pressões sobre o momento de início do PSP

Sob estas pressões, o PSP pode ser utilizado para provocar as decisões relacionadas ao empreendimento. Desta forma, à medida em que se avança no processo de elaboração, há a necessidade de definir certos aspectos sob pena de paralisar o processo ou de ser forçado a revisá-los posteriormente. Entretanto, algumas destas decisões podem não estar ao alcance dos participantes do processo, como no caso de decisões estratégicas no nível da empresa, como a contratação de um certo fornecedor ou as datas de entregas das fases do empreendimento. Nos estudos 2 e 4, por exemplo, a falta de definição quanto à contratação de subempreiteiros impossibilitaram que os mesmos tivessem maior participação no processo.

O processo de modelagem e simulação, em função do esforço e tempo de desenvolvimento requeridos, carece destas definições com maior antecedência a fim de permitir seu uso durante o PSP. Isto pôde ser percebido no estudo de caso 1, no qual a antecedência do início do PSP foi a menor com relação ao início da etapa de construção das unidades-base do empreendimento, bem como houve o maior número de alterações nas decisões tomadas em função da falta de informações ou robustez das informações disponíveis. Como resultado, naquele estudo, não foi possível o emprego do modelo antes do início do empreendimento.

Coaduna-se a esta dificuldade, a complexidade de alguns modelos de simulação, já discutida anteriormente. No estudo de caso 04, o tempo de desenvolvimento do modelo foi o maior entre todos os modelos desenvolvidos (cerca de 120 horas ou um mês de trabalho). Esta complexidade deveu-se à configuração do empreendimento: número de blocos; frentes de trabalho simultâneas; e à estratégia de ataque prevista para o empreendimento. Embora no estudo de caso tenha havido tempo hábil para a construção do modelo (em função de atrasos na definição da data de início), isto não ocorreria em uma situação normal. Parte desta dificuldade também relacionou-se ao alto nível de detalhamento adotado nos modelos

construídos. Desta forma, deve-se considerar o tempo disponível para o desenvolvimento e uso do modelo de simulação, quando da definição do nível de detalhe a ser adotado. Assim, uma forma de lidar com estas pressões pode ser o emprego de uma estratégia de modelagem hierárquica (OSES; PIDD; BROOKS, 2004), no qual o nível de detalhamento do modelo aumenta gradativamente, à medida em que um maior número de informações é disponibilizada ou os envolvidos demandam tal detalhamento.

7.4 MODELO DE ELABORAÇÃO DO PSP UTILIZANDO SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COMO FERRAMENTA DE APOIO À TOMADA DE DECISÃO

Com base nas evidências dos estudos de caso realizados, propôs-se um modelo de elaboração do PSP utilizando simulação como ferramenta de apoio à tomada de decisão. Este modelo é resultado de um refinamento e expansão do modelo proposto em 2004. Cabe destacar, entretanto, que, conforme descrito anteriormente, este modelo não foi formalmente aplicado em nenhum dos estudos de caso desenvolvidos e sua elaboração baseou-se no somatório das evidências oriundas dos quatro estudos realizados. Desta forma, a figura 98, na próxima página, apresenta o referido modelo que será detalhado a seguir.

Buscou-se estabelecer uma estratégia para o emprego da simulação como uma ferramenta de apoio à tomada de decisão no PSP. Neste sentido, propõe-se dividir a elaboração do PSP em duas fases: uma fase determinística, que consiste na seqüência de decisões do modelo de PSP e uma fase dinâmica, que corresponde ao desenvolvimento e emprego do modelo de simulação. É importante ressaltar, entretanto, que embora distintas estas fases não são estanques, mas sobrepõem-se, como que se mostrou benéfico nos estudos de caso 1, 2 e 4.

O emprego do termo “dinâmico” ao invés de “estocástico” ocorre uma vez que os maiores benefícios oriundos do emprego da simulação dizem respeito ao processo de modelagem em si e à compreensão das interações dinâmicas entre processos e recursos produtivos. Ainda, uma vez que os dados utilizados para a construção dos modelos baseiam-se em probabilidades subjetivamente explicitadas pelos participantes para um sistema de produção ainda inexistente, havia maior valor na discussão dos efeitos dinâmico de possíveis decisões do que nos resultados numéricos propriamente ditos.

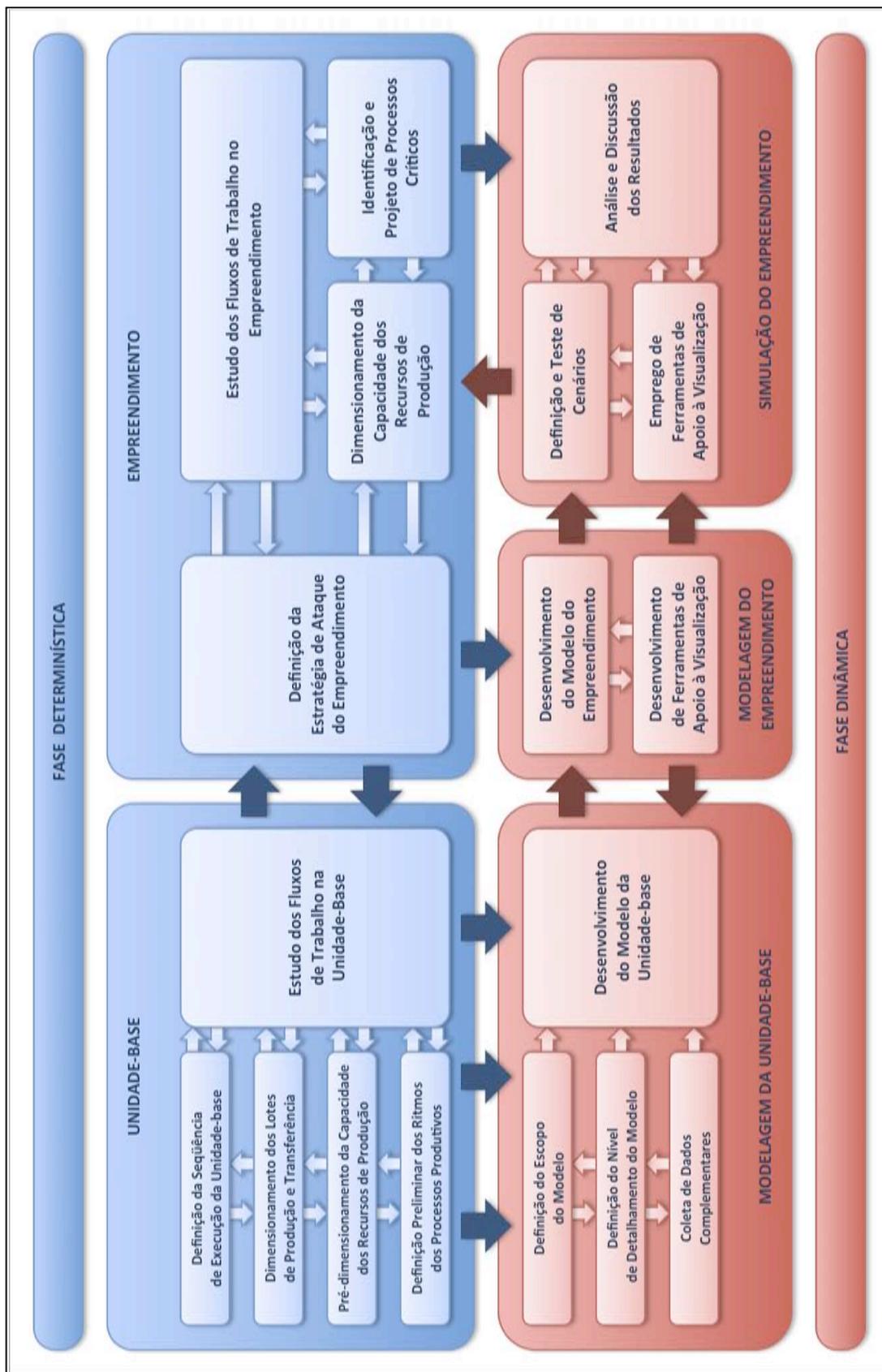


Figura 98: modelo de elaboração do PSP proposto neste trabalho

A fase determinística consiste no mesmo escopo e seqüência de decisões, agrupadas em decisões relativas à unidade-base e ao empreendimento, preconizada no modelo anterior. Desta forma, a característica operacional das decisões do modelo original continua sendo característica do presente modelo. Preferiu-se explicitar – além da definição da seqüência de execução e do pré-dimensionamento da capacidade dos recursos de produção – outras duas decisões: o dimensionamento dos lotes de produção e transferência e a definição preliminar dos ritmos dos processos produtivos, que são informações importantes para o desenvolvimento do modelo de simulação. Os fluxos de decisão e revisão, representados por setas em sentido opostos, ressaltam o papel sistêmico do processo de tomada de decisão, uma vez que existe grande interdependência entre as decisões.

Parte das informações necessárias para o desenvolvimento dos modelos originaram-se dos dados disponíveis das primeiras oito decisões da fase determinística: (a) definição da seqüência de execução; (b) dimensionamento dos lotes de produção e transferência; (c) pré-dimensionamento da capacidade dos recursos de produção; (d) definição preliminar dos ritmos dos processos produtivos; (e) estudo dos fluxos de trabalho da unidade-base; e (f) definição da estratégia de execução do empreendimento.

Na fase determinística são explicitadas e coletadas informações básicas para a construção dos modelos que são utilizados na fase dinâmica do PSP. As ferramentas utilizadas nesta fase, notadamente o diagrama de seqüência de execução da unidade-base e as linhas de balanço da unidade-base e do empreendimento auxiliaram na modelagem do sistema de produção, não apenas no que se refere às atividades de transformação, como também dos fluxos de trabalho. Deve-se ressaltar a importância do amadurecimento das definições desta etapa, uma vez que suas modificações impactam muito fortemente na estrutura dos modelos, podendo, em alguns casos extremos, gerar a necessidade de reconstrução parcial ou total deste, como no primeiro estudo de caso.

Na fase dinâmica (porção inferior da figura 98) foi dividida em três etapas básicas: (a) modelagem da unidade-base; (b) a modelagem do empreendimento; e (c) simulação do empreendimento. Na etapa de modelagem da unidade-base deve-se definir o escopo do modelo a ser desenvolvido, se abrangerá todo o empreendimento (como realizado em todos os estudos de caso) ou uma parte do sistema de produção (como realizado no estudo exploratório e no estudo de caso 4).

Após, deve-se definir o nível de detalhamento do modelo. Nos estudos realizados, o nível de detalhamento do modelo de simulação relacionou-se diretamente ao da seqüência de execução da unidade-base do empreendimento que, por sua vez, está diretamente relacionado ao esforço e ao tempo necessários para o desenvolvimento do modelo. Desta forma, deve-se analisar a necessidade de que façam parte do modelo de simulação todas os processos que compõem a seqüência de execução, ou se é possível condensá-los em etapas maiores, como, por exemplo, etapa de estrutura ou etapa de acabamentos. Outra possibilidade é o desenvolvimento de um modelo mais simples, com etapas condensadas, e detalhando-o gradativamente a medida em que um maior número de informações se torna necessário, conhecida como abordagem hierárquica (OSES; PIDD; BROOKS, 2004). Este tipo de detalhamento hierárquico foi utilizado no estudo de caso 2, no caso do processo de execução de *radiers* em seus subprocessos constituintes. Ainda nesta etapa pode ser necessária a coleta de dados complementares, taxas de produção para um determinado processo, entre outros. Com base nestes dados o modelo da unidade-base é desenvolvido e verificado.

Na etapa a modelagem do empreendimento são definidos o número de modelos ou submodelos necessários para representar o sistema de produção do empreendimento, com base na definição da estratégia de execução do empreendimento. Assim, o número de frentes de trabalho simultaneamente executadas determina o número de submodelos (quando considerados dentro de um único modelo) ou modelos (quando considerados separadamente) necessários. Além disso, uma vez que são estabelecidos os momentos de início de cada frente de trabalho, estas informações são utilizadas para definir os tempos de criação ou entrada das entidades que representam as unidades repetitivas no modelo. No estudo de caso 3, por exemplo, cada frente de trabalho foi representada por um modelo em função do limite estabelecido pelo *software* utilizado no número de entidades simultâneas. Entretanto, a melhor situação ocorre quando é possível representar cada frente de trabalho como um submodelo de um modelo único, como ocorreu no estudo de caso 4. Juntamente à modelagem do empreendimento, pode-se desenvolver ferramentas de visualização que facilitem o entendimento e a avaliação dos cenários a serem simulados. Nos estudos realizado, utilizou-se a linha de balanço com esta finalidade. Entretanto, outras técnicas podem ser empregadas. O impacto da visualização na simulação foi discutido anteriormente neste capítulo.

Já a simulação do empreendimento, terceira etapa da fase dinâmica, consiste na definição e teste dos cenários, do emprego das ferramentas de visualização para apoiar a análise e discussão dos resultados. Esses, por sua vez, são utilizados para avaliar decisões no nível do

empreendimento, como a estratégia de ataque, o estudo dos fluxos de trabalho e o dimensionamento da capacidade dos recursos de produção. Deve-se destacar também o papel de apoio à programação da produção desempenhado pelo modelo de simulação, a partir do desdobramento das decisões do PSP. Isto foi observado nos estudos de caso 1 e 2, em que foram simuladas diversas alternativas de programação e seus impactos avaliados com relação às decisões de capacidade dos recursos de produção.

Pode-se, também, simular processos críticos, como foi realizado no estudo exploratório e no estudo de caso 4. Embora seja possível realizar o estudo dos fluxos de trabalho no empreendimento a partir do uso da simulação (como realizado nos estudos 1 e 2), a elaboração de uma linha de balanço na fase determinística pode fornecer informações que permitam avaliar a localização e o pré-dimensionamento de outros *buffers* a fim de manter os fluxos de trabalho de certos processo ininterruptos ou que seja possível manter o fluxo do produto contínuo.

7.4.1 Estágios de Implementação da Simulação no PSP

Com base nas evidências coletadas ao longo dos estudos realizados, propõe-se algumas condições mínimas para o emprego da simulação como uma ferramenta do PSP. Estas condições mínimas podem ser agrupadas para três estágios de implementação do PSP pelos quais a empresa poderia passar. Estes estágios estão relacionados ao nível de maturidade da empresa com a prática da elaboração do PSP e ao domínio da tipologia do empreendimento a ser executado. Ressalta-se, entretanto, que os estágios aqui descritos têm caráter propositivo e baseiam-se nas características das empresas que fizeram parte dos estudos de caso. São necessários estudos futuros para uma avaliação da sua validade ou da necessidade de refinamento.

O estágio 1 caracteriza-se pela implementação do processo de elaboração do Projeto do Sistema de Produção em uma empresa. Ainda, o empreendimento sob estudo tem características inéditas, ou seja, a empresa não tem experiência na sua execução. Neste caso, recomenda-se a implementação da fase determinística do modelo de elaboração, como uma forma de capacitar a empresa na sua realização. Neste caso, o objetivo principal é o de demonstrar a relevância e os principais benefícios da formalização do PSP quando comparado às práticas anteriores da empresa. Em função da novidade que o PSP representa para a empresa neste estágio, não se espera que seja possível ou proveitoso avançar além da fase

determinística do processo. Entretanto, pode-se avaliar a pertinência da utilização da simulação para o estudo de processos particulares (processos críticos), dada a sua natureza pontual e curta duração.

No estágio 2 a empresa já tem o processo de elaboração do PSP implementado. A tipologia do empreendimento já é conhecida pela equipe de planejamento (embora não necessariamente possa ter sido elaborado o PSP naquela ocasião) e há perspectiva de emprego desta tipologia em empreendimentos futuros. Neste caso, além do desenvolvimento do PSP na sua fase determinística, procede-se a construção de um modelo de simulação que permita sua reutilização futura. Para tanto, deve-se enfatizar os benefícios do estabelecimento de alguns padrões (em especial na seqüência de execução das unidades-base). A fase dinâmica pode ou não ser executada, em função do tempo disponível para a construção do modelo e seu efetivo uso antes do início do empreendimento (embora o modelo possa ser utilizado durante a fase de execução).

Já o estágio 3 ocorre quando a empresa já tem o processo de elaboração do PSP consolidado, a tipologia do empreendimento sob estudo já foi anteriormente executada e um modelo de simulação reutilizável já está disponível. Neste estágio, as decisões da fase determinística do PSP são avaliadas e revisadas à luz das características do empreendimento atual. Algumas adaptações podem ser necessárias e serão também realizadas no modelo de simulação. A partir da revisão do modelo, procede-se a realização da fase dinâmica do PSP. Neste caso, procura-se explorar os efeitos de mudanças mais pontuais no sistema de produção (ou uma “regulagem fina”), principalmente baseadas na experiência adquirida na gestão de empreendimentos anteriores. A figura 99 resume as principais características e recomendações para a implementação do PSP nos três estágios.

ESTÁGIO	CARACTERÍSTICAS	RECOMENDAÇÕES
1	<ul style="list-style-type: none"> • A empresa ainda não implementou o processo de elaboração do PSP • A tipologia do empreendimento é nova para a equipe de produção, não tendo sido ainda utilizada em nenhum empreendimento da empresa 	<ul style="list-style-type: none"> • Empregar o modelo de elaboração do PSP na sua fase determinística • Se houver intenção de replicar a tipologia, avaliar a possibilidade de desenvolver um modelo de simulação • Avaliar a possibilidade de utilizar a simulação para o estudo de processos específicos
2	<ul style="list-style-type: none"> • A empresa já tem implementado o processo de elaboração do PSP • A tipologia do empreendimento já foi utilizada em outros empreendimentos da empresa mas não há um PSP elaborado previamente • Há perspectiva de continuidade no emprego da tipologia do empreendimento em estudo 	<ul style="list-style-type: none"> • Empregar o modelo de elaboração do PSP nas suas fases determinística e estocástica • Enfatizar o estabelecimento de padrões para a seqüência construtiva das unidades-base do empreendimento • Construir (e utilizar, se possível) um modelo de simulação com vistas à reutilização
3	<ul style="list-style-type: none"> • A empresa já tem consolidado o processo de elaboração do PSP • A tipologia do empreendimento já foi empregada ou tem muitas características comuns a empreendimentos anteriores para os quais o PSP foi elaborado • Um modelo de simulação reutilizável já foi construído e testado em um empreendimento anterior 	<ul style="list-style-type: none"> • Revisar e adaptar as decisões do PSP na fase determinística ao novo empreendimento • Avaliar e adaptar o modelo de simulação construído anteriormente • Empregar o modelo de elaboração do PSP na sua fase dinâmica

Figura 99: estágios para a implementação da simulação no PSP em empresas construtoras

Pode-se classificar as empresas alvo dos estudos deste trabalho nos estágios de desenvolvimento do PSP. Assim, a empresa W, estudo de caso exploratório, poderia ser classificada no estágio 2 da implementação do PSP. Embora a empresa não tivesse participado de nenhum estudo de caso de implementação do modelo de elaboração, a mesma realizava de forma estruturada boa parte das etapas do PSP. A tipologia do empreendimento já havia sido utilizada pela empresa em outros empreendimentos e o seria em empreendimentos futuros. No estudo, foi proposto um modelo de simulação dos processos envolvidos na execução de estrutura de concreto armado, alvenaria e reboco de fachada, que poderia ter sido reutilizado em outros empreendimentos no caso de interesse da empresa.

A empresa X, no estudo de caso X1, encontrava-se no estágio 2 da implementação do PSP. A empresa já conhecia o processo de elaboração e a tipologia do empreendimento já vinha sendo utilizada em empreendimentos passados e o seria em empreendimentos futuros. No

estudo, foi desenvolvida a fase determinística do PSP, além da construção de um modelo de simulação com vistas à sua reutilização. A necessidade e os benefícios da definição de uma seqüência de execução padronizada foi discutida e implementada. O modelo de simulação foi testado na segunda fase do empreendimento. No estudo de caso X2, a empresa passou ao estágio 3. Naquele estudo as decisões da fase determinística foram revisadas e adaptadas às características do empreendimento. Grande ênfase foi dada ao uso do modelo de simulação que, após adaptado, foi utilizado para avaliar diferentes cenários visando melhorias no sistema de produção da empresa.

Já a empresa Y, no estudo de caso Y1, encontrava-se no estágio 1 da implementação do PSP. Foi enfatizado a fase determinística do PSP, com o intuito de capacitar a empresa a realizá-lo. Como o empreendimento era dividido em três fases idênticas, optou-se pela construção de um modelo de simulação. Entretanto, como descrito, o uso do modelo restringiu-se à avaliação do impacto, em termos de prazo, da subdivisão das fases 1 e 2 entre três subempreiteiros. No estudo de caso Y2, embora a empresa já houvesse implementado o processo de elaboração do PSP, a tipologia do empreendimento era diferente daquelas empregadas em outros empreendimentos. Desta forma, a elaboração do PSP na sua fase determinística foi realizada. Durante o estudo, um modelo de simulação apenas para o estudo dos processos envolvidos na execução de alvenaria e montagem de lajes (processos críticos) foi elaborado e utilizado para apoiar a tomada de decisão. Posteriormente, foi elaborado um modelo de simulação completo, considerando a possibilidade de reutilização. Entretanto, como descrito, a equipe de produção não valorizou a utilização desse modelo, sendo que o modelo parcial foi novamente empregado para ilustrar conceitos como sincronização de processos e tempo *takt*.

8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões deste trabalho, bem como algumas sugestões para realização de trabalhos futuros com base nos resultados deste trabalho.

8.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo geral propor um modelo para a elaboração do Projeto do Sistema de Produção de empreendimentos da construção civil a partir da utilização da simulação computacional como ferramenta de apoio à tomada de decisão, tendo como ponto de partida um modelo anteriormente desenvolvido.

Com base em uma revisão de literatura nas áreas de projeto do sistema de produção, simulação computacional e sobre o emprego da simulação na construção, o desenvolvimento deste trabalho ocorreu em três fases: fase exploratória, fase de desenvolvimento e fase de análise e reflexão. Baseado nas questões e proposições deste trabalho, optou-se pela pesquisa construtiva como a estratégia de pesquisa deste trabalho, já que, entre outros motivos, a elaboração do PSP lida com a construção de um plano que tem como objetivo contribuir para a gestão do empreendimento estudado, ou seja, seu foco incide sobre um problema real e de relevância prática para a empresa.

Esta estratégia, não comum a pesquisas na área da gestão da construção, que tem como características básicas a proposição e implementação de construções inovadoras para buscar a solução para um problema com relevância prática, através do aprendizado baseado na experimentação e na reflexão com base na teoria, contribuiu positivamente para a consecução desta pesquisa, uma vez que incentiva a interação do pesquisador com o participantes sem, no entanto, perder de vista a base teórica necessária para a consecução dos objetivos do estudo. Outrossim, este método possibilita uma visão balanceada entre o processo de pesquisa e a relevância prática da construção inovadora. Ainda, como recomendado pela pesquisa

construtiva, o capítulo 6 deste trabalho focou em uma avaliação dos impactos da elaboração do PSP e da simulação nas empresas estudadas, enquanto que o capítulo 7 referiu-se a uma análise dos resultados em um nível teórico, mais abstrato, com vistas à proposição do modelo de PSP oriundo deste trabalho.

A fase exploratória consistiu da análise e seleção do *software* de simulação, a partir do qual foi selecionado o pacote computacional Arena®, do treinamento do pesquisador em simulação e de um estudo exploratório que foi conduzido no empreendimento W1, no qual foi desenvolvido e utilizado um modelo de simulação para um processo considerado crítico para o empreendimento.

A fase de desenvolvimento consistiu na realização de quatro estudos de caso, conduzidos com o objetivo de, durante o desenvolvimento do PSP dos empreendimentos, avaliar o emprego da simulação como ferramenta de apoio à tomada de decisão. Em comum, todos os empreendimentos tinham como característica a sua repetitividade, o que limita a aplicação das diretrizes propostas a este tipo de empreendimento.

A fim de avaliar os resultados da fase de desenvolvimento foram estabelecidos dois constructos para avaliação do processo: utilidade e facilidade de uso. Estes constructos, por sua vez, foram desdobrados em subconstructos, que foram avaliados a partir de evidências obtidas através de múltiplas fontes de evidência, ou variáveis, diretamente mensuráveis.

O estudo de caso 1 foi desenvolvido em um empreendimento habitacional da empresa X composto por casas assobradadas. A empresa já havia executado inúmeros empreendimentos com as mesmas características anteriormente, existindo um elevado nível de conhecimento das características do sistema de produção por parte da equipe de gestão da produção da empresa. Neste estudo, durante a elaboração do PSP houve uma demanda por parte da empresa para apoiar a implementação de uma estratégia de customização das unidades habitacionais. O modelo de simulação foi desenvolvido tendo em mente a possibilidade de sua reutilização em um empreendimento seguinte. O objetivo de empregar a estratégia de reutilização era o de reduzir o tempo de desenvolvimento do modelo de simulação e utilizá-lo o mais precocemente possível no PSP. A fim de reduzir o esforço e o tempo necessários para a construção do modelo, um módulo genérico de simulação foi proposto. Este módulo condensava as características básicas necessárias para modelar processos produtivos,

reduzindo sobremaneira o número de interações entre o modelador e o *software* durante o processo.

O estudo de caso 2 também foi desenvolvido em um empreendimento habitacional da empresa X com características similares ao empreendimento 1. Foram avaliados os impactos da reutilização do modelo de simulação anteriormente desenvolvido. Houve uma redução acentuada no tempo necessário para que o modelo pudesse ser utilizado no PSP, comprovando um dos principais benefícios da estratégia de reutilização. Neste estudo de caso foram simulados o maior número de cenários entre todos os estudos realizados, muitos deles ao longo das reuniões do PSP, a partir de demandas do participantes.

O estudo de caso 3 foi desenvolvido em um empreendimento habitacional de casas assobradadas da empresa Y. A equipe da empresa não dominava a execução daquela tipologia do empreendimento e aquela era a primeira implementação do PSP na empresa. Além de avaliar o processo de elaboração do PSP, também foi avaliada uma estratégia diferente do emprego da simulação. Neste caso, dividiu-se o estudo em duas fases. A primeira fase foi denominada fase determinística, na qual seguiu-se a seqüência de elaboração do modelo proposto anteriormente (SCHRAMM, 2004). Após a conclusão desta fase, ocorreu a fase dinâmica, na qual um modelo de simulação foi desenvolvido e utilizado. Entretanto, percebeu-se que esta estratégia de fases seqüenciais dificultou a utilização da simulação durante o estudo.

O estudo de caso 4 foi desenvolvido também em um empreendimento habitacional da empresa Y, composto por blocos de edifícios de cinco pavimentos. Com relação à simulação, optou-se por desenvolver as fases determinística e estocástica do PSP de forma concomitante, buscando-se antecipar o uso da ferramenta durante o processo. Dois modelos foram desenvolvidos: um modelo mais simples, que focava apenas nos processos críticos do empreendimento e outro completo, que modelou todos os processos do sistema de produção do empreendimento. Verificou-se que o modelo simplificado teve uma maior aplicação durante o estudo.

Por se tratar de uma pesquisa construtiva, dois tipos de contribuição eram esperados: a contribuição teórica e a contribuição prática relacionadas ao objetivo geral deste trabalho. A contribuição teórica deste trabalho ao avanço do conhecimento, diz respeito ao refinamento do modelo de elaboração do PSP na construção civil, uma atividade gerencial pouco

explorada tanto na prática do setor, como academicamente, tendo em vista o pequeno número de trabalhos já publicados. Ainda, mas não dissociada da primeira contribuição, houve a melhor compreensão acerca dos benefícios e dificuldades do emprego da simulação e sua aplicabilidade como uma ferramenta do PSP. De forma mais ampla, este trabalho procurou contribuir para um melhor entendimento acerca dos sistema de produção da construção civil e para a consolidação do PSP como um processo gerencial neste setor. Do ponto de vista prático, considera-se que este trabalho constitui-se em uma contribuição não só para as empresas construtoras que participaram dos estudos, podendo ser adaptado ao contexto específico de outras empresas e empreendimentos.

O primeiro objetivo específico deste trabalho diz respeito a “analisar o papel do PSP na gestão de empreendimentos da construção civil”. Nos estudos realizados, a seqüência de decisões prescritas no foram seguidas, mostrando-se adequada à elaboração do PSP. Entretanto, percebeu-se que algumas decisões recebem maior ênfase em função de peculiaridades do empreendimento ou interesses específicos das empresas. Com relação à extensão do processo de elaboração, esta foi efetivamente maior quando comparada ao tempo necessário para a consecução do PSP nos estudos anteriores do autor (SCHRAMM, 2004). Entretanto, nos quatro estudos realizados nesta tese, a quantidade de informações foi muito maior que na pesquisa anterior, além da inserção da simulação para apoiar a tomada de decisão.

O PSP também contribuiu para a introdução e discussão de conceitos de gestão da produção, como lotes de transferência e de produção, fluxo de trabalho, fluxo contínuo, variabilidade e sincronização entre processos. A compreensão desses conceitos foi auxiliada pela utilização de algumas ferramentas, tais como a linha de balanço e a própria simulação. Com relação aos conceitos de fluxo de trabalho e fluxo contínuo, percebeu-se em todos os estudos, que uma série de fatores contribui para que fluxos de trabalhos ininterruptos sejam priorizados em detrimento do fluxo contínuo do produto, aumentando a parcela de atividades que não agregam valor ao produto.

Ainda, foram discutidas quatro funções ou papéis básicos do PSP: (a) promover discussões e questionamentos; (b) incentivar a adoção de uma visão sistêmica; (c) sistematizar, formalizar e registrar decisões; e (d) estabelecer um estado futuro a ser alcançado. Com relação à este último papel, a função do PSP é a de estabelecer uma estrutura que, se corretamente gerenciada ao longo da fase de execução, poderá propiciar o alcance dos objetivos do empreendimento, cabendo ao planejamento e controle da produção a função de buscar a

aderência do executado ao cenário futuro proposto no PSP. Dentre os controles mais relevantes estão o controle de avanço físico e o controle de aderência ao plano de ataque do empreendimento.

O segundo objetivo específico consistiu em “avaliar o uso das técnicas simulação no PSP”. De uma forma geral, o emprego da simulação permitiu o teste de diferentes cenários ao longo dos estudos. Esses cenários consistiram de alternativas na organização do sistema de produção com relação a mudanças na estratégia de ataque do empreendimento, dimensionamento da capacidade dos recursos de produção e redistribuição de processos a esses recursos. Ainda, com base nestes cenários foram discutidos alguns conceitos como o de sincronização de processos e tempo *takt*, por exemplo.

O emprego de ferramentas que melhoram a visualização dos resultados da simulação pode trazer inúmeros benefícios ao processo. Propôs-se a integração da linha de balanço como uma ferramenta de visualização dos resultados da simulação, uma vez que esta registrava os fluxos de trabalho e do produto ao longo do tempo, valorizando a análise dos resultados da simulação não apenas sob o ponto de vista das atividades de transformação mas, sobretudo, das atividades de fluxo.

Quanto ao nível de detalhamento dos modelos, esta pesquisa indicou que modelos mais simples permitem demonstrar os efeitos da aplicação de conceitos de gestão da produção mais diretamente. Modelos mais detalhados, por sua vez, permitem avaliar os efeitos sistêmicos das decisões simuladas, possibilitando a avaliação e comparação dos efeitos dessas mudanças com as experiências práticas do envolvidos, aumentando a credibilidade do modelo. Entretanto, o excesso de detalhamento mostrou-se como um dos principais motivos para algumas das dificuldades enfrentadas no trabalho: tempo e esforço excessivos para o desenvolvimento e emprego dos modelos de simulação, além impacto reduzido do emprego das ferramentas de visualização dos resultados do modelo.

O terceiro objetivo específico foi “propor e avaliar a adoção da estratégia de reutilização de modelos como forma de reduzir o tempo de desenvolvimento do PSP”. Em função do elevado tempo de desenvolvimento de modelos de simulação, uma das dificuldades para o emprego da simulação na construção civil, propôs-se o emprego de duas estratégias: a proposição de componentes (módulos) genéricos e reutilizáveis; e a reutilização dos próprios modelos de simulação. Tais componentes foram utilizados com sucesso nos quatro estudos e caso,

enquanto o desenvolvimento e efetiva reutilização do modelo de simulação ocorreu entre dois estudos de caso.

Percebeu-se que o emprego da simulação como ferramenta do PSP não foi igual em todos os estudos realizados. Com base nas diferenças entre a importância dada pelas diferentes equipes de planejamento que tomaram parte nos estudos realizados, concluiu-se que a implementação do PSP deve ocorrer em estágios que coincidem com o nível de consolidação do PSP como uma prática gerencial e que o emprego da simulação tem seus maiores benefícios para empresas que encontra-se no estágio de maior consolidação do PSP e que detém certo domínio sobre a tipologia e tecnologias construtivas empregadas no empreendimento.

Com relação ao modelo, foram propostas duas fases no desenvolvimento do processo. Embora distintas, estas fases não devem ocorrer em uma seqüência, mas sobrepondo-se em certo ponto. A primeira, a fase determinística, tem como base o modelo de elaboração do PSP (SCHRAMM, 2004). Nesta etapa são feitas as primeiras discussões acerca das características pretendidas para o sistema de produção do empreendimento. As informações oriundas da fase determinística do PSP são utilizadas na segunda fase do processo: a fase dinâmica, na qual são desenvolvidos os modelos de simulação e são propostos e testados cenários para apoiar a tomada de decisão.

Por fim, ressalta-se que tanto o modelo proposto neste trabalho, como o modelo que o originou, tem seu escopo limitado a decisões de caráter operacional, não abordando, portanto, decisões do nível estratégico.

8.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos estudos realizados, apresenta-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- a) avaliar e refinar o modelo proposto a partir da sua aplicação em outros tipos de empreendimentos e contextos;
- b) propor diretrizes para o alinhamento do PSP aos objetivos estratégicos da produção;

- c) avaliar o emprego dos modelos de simulação na tomada de decisão em um nível mais estratégico, vinculando-o à estratégia da organização;
- d) avaliar o emprego do CAD 4D para apoiar o processo de elaboração do PSP e facilitar a comunicação de suas decisões entre os envolvidos e demais interessados.

REFERÊNCIAS

AALTONEN, J.; RINNE, J.; TUIKKALA, I. A Multidisciplinary Framework for Concept Evolution: A Research Tool for Developing Business Models. In: European-Japanese Conference 2007 on Information Modeling and Knowledge Bases. **Proceedings...** Tampere: EJC, 2007. Disponível em: <<http://ulapland.academia.edu/JukkaAaltonen/Papers>>. Acesso em 12 dez. 2009.

ABOURIZK, S. M.; HALPIN, D. W.; WILSON, J. R. Fitting Beta Distributions Based on Sample Data. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 120, n. 2, p. 288-305, June 1994.

AL-BATTAINEH, H. Productivity Simulation During the Planning Phase of the Glencoe Tunnel in Calgary, Canada: A Case Study. In: Winter Simulation Conference, 2006, Monterey. **Proceedings...** Monterey: WSC, 2006. p. 2087-2092.

ALEXOPOULOS, C. *et al.* A Discrete-Event Simulation Application for Clinics Serving the Poor. In: Winter Simulation Conference, 2001, Arlington. **Proceedings...** Arlington: WSC, 2001. p. 1386-1391.

ALSUDAIRI, A. A. *et al.* Simulation of Construction Processes: Traditional Practices versus Lean Principles. In: Annual Conference of the International Group for Lean Construction, 7., Berkeley, 1999. **Proceedings...** Berkeley: IGLC, 1999.

ALSUDAIRI, A. A.; DIEKMANN, J. E.; SONGER, A. D. Interplay of Project Complexity and Lean Production Methods. In: Annual Conference of the International Group for Lean Construction, 8., Brighton, 2000. **Proceedings...** Brighton: IGLC, 2000.

ALVES, T. C. L.; TOMMELEIN, I. D. Investigation of Buffer Dynamics in Sheet Metal Ductwork Supply Chains. In: Annual Conference of the International Group for Lean Construction, 14., Santiago do Chile, 2006. **Proceedings...** Santiago do Chile: IGLC, 2006.

ALVES, T. C. L.; TOMMELEIN, I. D. Simulation of Buffering and Batching Practices in the Interface Detailing-fabrication-installation of HVAC Ductwork. In: Annual Conference of the International Group for Lean Construction, 11., Blacksburg, 2003. **Proceedings...** Blacksburg: IGLC, 2003.

ALVES, T. C. L.; TOMMELEIN, I. D.; BALLARD, G. Simulation as a Tool for Production System Design in Construction. In: Annual Conference of the International Group for Lean Construction, 14., Santiago do Chile, 2006. **Proceedings...** Santiago do Chile: IGLC, 2006.

ARBULU, R. J. Contributors to Lead Time in Construction Supply Chains: Case of Pipe Supports Used in Power Plants. In: Winter Simulation Conference, 2002, San Diego. **Proceedings...** San Diego: WSC, 2002. p. 1745-1751.

ASKIN, R. G.; GOLDBERG, J. B. **Design and Analysis of Lean Production Systems**. New York: John Wiley & Sons, 2002.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Plano Estratégico para Ciência, Tecnologia e Inovação na Área de Tecnologia do Ambiente Construído**. [S.l.: s.n.], 2002.

ASSUMPCÃO, J. F. P. **Gerenciamento de Empreendimentos na Construção Civil: modelo para planejamento estratégico da produção de edifícios**. 1996. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

AU, G. PAUL, R. J. Visual Interactive Modelling: a pictorial simulation specification system. **European Journal of Operational Research**, v. 91, p. 14-26, 1996.

BACCARINI, D. The Concept of Project Complexity - A Review. **International Journal of Project Management**, v. 14, p. 201-204, 1996.

BALBONTIN-BRAVO, E. Simulation of Large Pre-Cast Operations. In: Winter Simulation Conference, 1998, Washington. **Proceedings...** Washington: WSC, 1998. p. 1311-1317.

BALLARD, G. *et al.* Production System Design in Construction. In: Annual Conference of the International Group for Lean Construction, 9., Singapore, 2001. **Proceedings...** Singapore: IGLC, 2001.

BALLARD, G. *et al.* Production System Design: Work Structuring revisited. **White Paper 11**. [s.l.]: Lean Construction Institute, 2001a. Disponível em: <<http://www.leanconstruction.org>>. Acesso em: 10 jun. 2003.

BALLARD, G. Lean Project Delivery System. **White Paper 08**. [S.l.]: Lean Construction Institute, 1999. Disponível em: <<http://www.leanconstruction.org>>. Acesso em: 10 jun. 2003.

BALLARD, G.; HOWELL, G. Lean Project Management. **Building Research & Information**, v. 2, n. 31, p. 119-133, 2003.

BALLARD, G.; HOWELL, G. Shielding Production: an essential step in production control. **Technical Report 97-1**. California: Construction Engineering and Management Program, Department of Civil and Environmental Engineering. University of California, 1997.

BALLARD, G.; HOWELL, G. What Kind of Production is Construction? In: Annual Conference of the International Group for Lean Construction, 6., Guarujá, 1998. **Proceedings...** Guarujá: IGLC/UFRGS, 1998.

BARROS NETO, J. P. **Proposta de Modelo de Formulação de Estratégias de Produção para Pequenas Empresas de Construção Habitacional**. 2001. Tese (Doutorado em Administração) – Programa de Pós-graduação em Administração, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

- BARTEZZAGHI, E. The evolution of production models: is a new paradigm emerging? **International Journal of Operations & Production Management**, v. 19, n. 2, p. 229-250, 1999.
- BASKERVILLE, R.; PRIES-HEJE, J.; VENABLE, J. Soft Design Science Methodology. In: 4th International Conference on Design Science Research in Information Systems and Technology. **Proceedings...** Philadelphia: DESRIST, 2009.
- BELL, P. C. *et al.* Decision-makers' Perceptions of the Value and impact of Visual interactive modelling. **The International Journal of Management Science**, v. 27, p. 155-165, 1999.
- BELL, P. C. Visual Interactive Modeling as an Operations Research Technique. **Interfaces**, v. 14, p. 26-33, July/Aug. 1985.
- BENNET, J.; ORMEROD, R. N. Simulation Applied to Construction Projects. **Construction Management and Economics**, v. 2, p. 225-263, 1984.
- BERENDS, P.; ROMME, G. Simulation as a Research Tool in Management Studies. **European Management Journal**. v. 17, n. 6, p. 576-583, 1999.
- BERNARDES, M. M. e S. **Desenvolvimento de um Modelo de Planejamento e Controle da Produção para Micro e Pequenas Empresas de Construção**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- BERTELSEN, S.; KOSKELA, L. Managing the Three Aspects of Production in Construction. In: Annual Conference of the International Group for Lean Construction, 10., Gramado, 2002. **Proceedings...** Gramado: IGLC/UFRGS, 2002.
- BIRREL, G. S. Construction Planning - Beyond the Critical Path. **Journal of the Construction Division**. v. 106, n. CO3, 1980.
- BLACK, J. T. **O Projeto da Fábrica com Futuro**. Porto Alegre: Bookman, 1998.
- BONOMA, T. V. Case Research in Marketing: Opportunities, Problems, and a Process. **Journal of Marketing Research**, v. 22, p. 199-208, 1985.
- BROWN, N; POWERS, S. Simulation in a Box (A Generic Reusable Maintenance Model). In: Winter Simulation Conference, 2000, Orlando. **Proceedings...** Orlando: WSC, 2000. p. 1050-1056.
- BULHÕES, I. R. **Diretrizes para implementação de fluxo contínuo na construção civil: uma abordagem baseada na Mentalidade Enxuta**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

CERIC, V. Visual Interactive Modeling and Simulation as a Decision Support in Railway Transport Logistic Operations. **Mathematics and Computers in Simulation**, v. 44, p. 251-261, 1997.

CHANG, D. **RESQUE**. 1987. PhD Thesis – University of Michigan, Ann Arbor, 1987.

CHAU, P. Y. K.; BELL, P. C. Designing Effective Simulation-based Decision Support Systems: An Empirical Assessment of Three Types of Decision Support Systems. **Journal of the Operational Research Society**, v. 46, p. 315-331, 1995.

COSTA, M. A. B. da. **Simulação de Sistemas**. São Carlos: UFSCar, 2002. Apostila da disciplina Simulação Aplicada à Engenharia de Produção, Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos. Disponível em: <http://www.simucad.dep.ufscar.br/ptbdisciplinas_simulacao.htm>. Acesso em: 08 fev. 2007.

COX, J. F.; SPENCER, M. S. **Manual de Teoria das Restrições**. Porto Alegre: Bookman, 2002.

DAVIS, L.; WILLIAMS, G. Evaluating and Selecting Simulation *Software* Using the Analytic Hierarchy Process. **Integrated Manufacturing Systems**, v. 5, n. 1, p. 23-32, 1994.

DAVIS, M. M.; AQUILANO, N. J.; CHASE, R. B. **Fundamentos de Administração da Produção**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

DRAPER, J. D.; MARTINEZ, J. The Evaluation of Alternative Production System Designs with Discrete Event Simulation. In: Annual Conference Of The International Group For Lean Construction, 10., Gramado, 2002. **Proceedings...** Gramado: IGLC/UFRGS, 2002.

EASTERBY-SMITH, M.; THORPE, R.; LOWE, A. **Management Research: an introduction**. London: Sage, 1991.

ELDEN, M. D. **Visual Interactive Modelling: Some Guidelines for its Implementation and Some Aspects of its Potential Impact on Operational Research**. 1992. PhD Thesis – Department of Management Science, University of Strathclyde, Glasgow, 1992.

ELSAYED, E. A.; BOUCHER, T. O. **Analysis and Control of Production Systems**. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1994.

FENTE, J.; KNUTSON, K.; SCHEXNAYDER, C. Defining a Beta Distribution Function for Construction Simulation. In: Winter Simulation Conference, 1999, Phoenix. **Proceedings...** Phoenix: WSC, 1999. p. 1010-1015.

FENTE, J.; SCHEXNAYDER, C.; KNUTSON, K. Defining a Probability Distribution Function for Construction Simulation. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 126, n. 3, p. 234-241, May/June 2000.

FERREIRA, A. B. H. **Novo Dicionário Aurélio da Língua Portuguesa**. [S.l.]: Positivo, 2004. 1 CD-ROM.

FORMOSO, C. T. **A Knowledge Based Framework for Planning House Building Projects**. 1991. PhD Thesis. University of Salford - Department of Quantity and Building Surveying. Salford, 1991.

FORMOSO, C. T. The New Operations Management Paradigm. **White Paper**. Berkeley: University of California, 2000.

FORRESTER, J. W. **Principle of Systems**. [S.l.]: Productivity Press, 1990.

FREITAS FILHO, P. J. **Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas com Aplicações Arena**. 2. ed. Florianópolis: Visual Books, 2008.

GAITHER, N. **Production and Operations Management: a problem-solving and decision-making approach**. Hinsdale: Dryden, 1980.

GAITHER, N.; FRAZIER, G. **Administração da Produção e Operações**. 8. ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2001.

GAO, J.; FISCHER, M. Framework & Case Studies Comparing Implementations & Impacts of 3D/4D Modeling Across Projects. **Technical Report 172**, Stanford: CIFE, 2008.

GIDADO, K. I. Project Complexity: The Focal Point of Constriction Production Planning. **Construction Management and Economics**, v. 14, p. 213-225, 1996.

GONZÁLEZ, V.; ALARCÓN, L. F.; GAZMURI, P. Design of Work in Process Buffers in Repetitive Building Projects: a case study. In: Annual Conference of the International Group for Lean Construction, 14., Santiago do Chile, 2006. **Proceedings...** Santiago do Chile: IGLC, 2006.

GUNAL, A.; VERN, K. The Use of Simulation for Construction Elements Manufacturing. In: Winter Simulation Conference, 1998, Washington. **Proceedings...** Washington: WSC, 1998. p. 1273-1277.

HAIR JR., J. F. *et al.* **Análise multivariada de dados**. Porto Alegre: Bookman, 2005.

HAJJAR, D.; ABOURIZK, S. M. AP2-Earth: A Simulation Based System for the Estimating and Planning of Earth Moving Operations. In: Winter Simulation Conference, 1997, Atlanta. **Proceedings...** Atlanta: WSC, 1997. p. 1103-1110.

HAJJAR, D.; ABOURIZK, S. M. Modeling and Analysis of Aggregate Production Operations. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 124, n. 5, p. 390-401, 1998.

HAJJAR, D.; ABOURIZK, S. M. Symphony: an environment for building special purpose construction simulation tools. In: Winter Simulation Conference, 1999, Phoenix. **Proceedings...** Phoenix: WSC, 1999. p. 998-1006.

HAJJAR, D.; ABOURIZK, S. M. Unified Modeling Methodology for Construction Simulation. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 128, n. 2, p. 174-185, April 2002.

HALPIN, D. W.; MARTINEZ, L. H. Real World Applications of Construction Process Simulation. In: Winter Simulation Conference, 1999, Phoenix. **Proceedings...** Phoenix: WSC, 1999. p. 956-962.

HAPIN, D. H.; WOODHEAD, R. W. **Design of Construction and Process Operations**. [s.l.]: John Wiley & Sons, 1976.

HLUPIC, V.; IRANI, Z.; PAUL, R. J. Evaluation Framework for Simulation *Software*. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.15, p. 366–382, 1999.

HONG, Z.; SHI, J. J.; TAM, C. M. Visual Modeling and Simulation for Construction Operations. **Automation in Construction**. v. 11, n. 1, p. 47-57, 2002.

HOPP, W.; SPEARMAN, M. **Factory Physics: foundation of manufacturing management**. Boston: McGraw-Hill, 1996.

HORMAN, M. J. Modeling The Effects Of Lean Capacity Strategies On Project Performance. In: Annual Conference of the International Group for Lean Construction, 9., Singapore, 2001. **Proceedings...** Singapore: IGLC, 2001.

HOUAISS, A. (Ed.). **Dicionário Eletrônico da Língua Portuguesa**. Rio de Janeiro: Editora Objetiva, 2001. 1 CD-ROM.

HOWELL, G. A. What is Lean Construction? In: Annual Conference of the International Group for Lean Construction, 7., Berkeley, 1997. **Proceedings...** Berkeley: IGLC, 1997.

HOWELL, G.; BALLARD, G. Design of Construction Operations. **LCI White Paper 04**. Portland: Lean Construction Institute, 1999. Disponível em: <<http://www.leanconstruction.org>>. Acesso em: 21 nov. 2005.

HOWELL, G.; KOSKELA, L. Reforming project Management: The Role of Lean Construction. In: Annual Conference of the International Group for Lean Construction, 8., Brighton, 2000. **Proceedings...** Brighton: IGLC, 2000.

HUANG, R.; GRIGORIADIS, A. M.; HALPIN, D. W. Simulation of Cable-stayed Bridges Using DISCO. In: Winter Simulation Conference, 1994, Piscataway. **Proceedings...** Piscataway: WSC, 1994. p. 1130-1136.

HURRION, R. D. An Investigation of Visual Interactive Simulation Methods Using the Job-Shop Scheduling Problem. **Journal of the Operational Research Society**, v. 29, p. 1085-1093, 1978.

HURRION, R. D. **The Design, Use and Required Facilities of an Interactive Visual Computer Simulation Language to Explore Production Planning Problems**. 1976. PhD Thesis – University of London, 1976.

IIVARI, J.; VENABLE, J. Action Research and Design Science Research – Seemingly similar but decisively dissimilar. In: 2009 European Conference on Information Systems. **Proceedings...** Verona: ECIS, 2009.

IOANNOU, P. G. **UM-CYCLONE User's Guide**. Ann Arbor: Department of Civil Engineering, University of Michigan, 1989.

IOANNOU, P. G.; LIKHITRUANGSILP, V. Simulation of Multiple-drift Tunnel Construction with Limited Resources. In: Winter Simulation Conference, 2005, Orlando. **Proceedings...** Orlando: WSC, 2005. p. 1483-1491.

IOANNOU, P. G.; MARTINEZ, J. C. Animation of Complex Construction Simulation Models. In: 3rd Congress on Computing in Civil Engineering, 1996, Reston. **Proceedings...** Reston: ASCE, 1996. p. 620–626.

JAKKULA, V.; LYLY-YRJÄNÄINEN, J.; SUOMALA, P. Challenges of practically relevant management accounting research – The scope and intensity of interventionist research. In: 5th Conference on New Directions in Management Accounting: Innovations in Practice and Research. **Proceedings...** Brussels: EIASM, 2006.

KAMAT, V.R. **Extensible and Scalable 3D Visualization of Simulated Construction Operations**. 2003. Ph.D. Dissertation – Department of Civil and Environmental Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, 2003.

KANNAN, G.; MARTINEZ, J.; VORSTER, M. A Framework for Incorporating Dynamic Strategies in Earth-Moving Simulations. In: Winter Simulation Conference, 1997, Atlanta. **Proceedings...** Atlanta: WSC, 1997. p. 1119-1126.

KANNAN, G.; SCHMITZ, L.; LARSEN, C. An Industry Perspective on the Role of Equipment-Based Earthmoving Simulation. In: Winter Simulation Conference, 2000, Orlando. **Proceedings...** Orlando: WSC, 2000. p. 1945-1952.

KANNAN, G.; VORSTER, M.; MARTINEZ, J. Developing the Statistical Parameters for Simultaneous Variation in Final Payload and Total Load Time. In: Winter Simulation Conference, 1999, Phoenix. **Proceedings...** Phoenix: WSC, 1999. p. 1016-1022.

KASANEN, E., LUKKA, K.; SIITONEN, A. The constructive approach in management accounting. **Journal of Management Accounting Research**. v.5, p. 243-264, 1993.

KEATING, P. A framework for classifying and evaluating the theoretical contributions of case research in management accounting. **Journal of Management Accounting Research**. v.5, p. 66-86, 1995.

KELTON, W. D.; SADOWSKI, R. P.; STURROCK, D. T. **Simulation with Arena**. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2004.

KIM, Y.; BALLARD, G. Is the Earned-value method an Enemy of Work Flow? In: Annual Conference on the International Group for Lean Construction, 8., Brighton, 2000. **Proceedings...** Brighton: 2000.

KIRKPATRICK, P.F.; BELL P.C. Visual Interactive Modelling in Industry: Results from a Survey of Visual Interactive Model Builders. **Interfaces**, v. 19, p. 71-79, 1989.

KNAPP, S.; CAHRRON, R.; HOWELL, G. Phase Planning Today. **Revista Ingeniería de Construcción**. v. 22, n. 3, p. 157-162, 2007.

KOSKELA, L. **An Exploration towards a Production Theory and its Application to Construction**. 2000. Ph.D. Thesis – Technical Research Centre of Finland, Espoo, 2000.

KOSKELA, L. Application of the New Production to Construction. **Technical Report 72**, Finland: CIFE, 1992.

KOSKELA, L. On New FootNotes to Shingo. In: Annual Conference of the International Group for Lean Lonstruction, 9., Singapore, 2001. **Proceedings...** Singapore: IGLC, 2001.

KOSKELA, L.; HOWELL, G. The Theory of Project Management: Explanation to Novel Methods. In: Annual Conference of the International Group for Lean Construction, 10., Gramado, 2002. **Proceedings...** Gramado: IGLC/UFRGS, 2002.

LAUFER, A.; TUCKER, R. L. Is Construction Planning Really Doing Its Job? A critical examination of focus, role and process. **Construction Management and Economics**, n. 5, p. 243-266, 1987.

LAW, A. M. Simulation Model's Level of Detail Determines Effectiveness. **Industrial Engineering**, v. 23, n. 10, p. 16-18, Oct. 1991b.

LAW, A. M.; HAIDER, S. W. Selecting Simulation *Software* for Manufacturing Application. **Industrial Engineering**, v. 21, n. 5; p. 33-36, May 1989.

LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation Modeling and Analysis**. 3rd ed. New York: McGraw Hill, 2000.

LAW, A. M.; MCCOMAS, M. G. How to Select Simulation *Software* for Manufacturing Applications. **Industrial Engineering**, v. 24, n. 7, p. 29-35, Jul. 1992.

LAW, A. M.; MCCOMAS, M. G. Pitfalls to Avoid in the Simulation of Manufacturing System. **Industrial Engineering**, v. 21, n. 5, p. 28-69, May 1989.

LAW, A. M.; MCCOMAS, M. G. Secrets of Successful Simulation Studies. **Industrial Engineering**, v. 22, n. 5, p. 47-72, May 1990.

LAW, A. M.; MCCOMAS, M. G. Secrets of Successful Simulation Studies. In: Winter Simulation Conference, 1991, Phoenix. **Proceedings...** Phoenix: WSC, 1991. p. 21-27.

LAW, A. M.; MCCOMAS, M. G.; VINCENT, S. G. The crucial role of input modeling in successful simulation studies. **Industrial Engineering**, v. 26, n. 7, p. 55-58, July 1994.

LIU, L. Y.; IOANNOU, P. G. Graphical Object-oriented Discrete-event Simulation System. In: Winter Simulation Conference, 1992, Piscataway. **Proceedings...** Piscataway: WSC, 1992. p. 1285-1291.

LUKKA, K. The constructive research approach. In: **Case study research in logistics** (edited by Ojala, L.; Hilmola, O-P.). Series B1. P. 83-101. Turku: Turku School of Economics and Business Administration, 2003.

MACCRIMMON, K. R.; RAYVEC, C. A. An Analytical Study of the PERT Assumptions. **Operations Research**, v. 12, n. 1, p. 16-37, 1964.

MACHADO, R. L. **A Sistematização de Antecipações Gerenciais no Planejamento da Produção de Sistemas da Construção Civil**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

MACKULAK, G. T.; LAWRENCE, F. P.; COLVIN, T. Effective Simulation Model Reuse: A Case Study for AMHS Modeling. In: Winter Simulation Conference, 1998, Washington. **Proceedings...** Washington: WSC, 1998. p. 979-984.

MAIO, C. *et al.* Probability Distribution Functions for Construction Simulation. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 126, n. 4, p. 285-292, July/Aug. 2000.

MARASINI, R.; DAWOOD, N. Simulation Modeling and Optimization of Stockyard Layouts for Precast Concrete Products. In: Winter Simulation Conference, 2002, San Diego. **Proceedings...** San Diego: WSC, 2002. p. 1731-1736.

MARTINEZ, J. C. **STROBOSCOPE: State and Resource Based Simulation of Construction Processes**. 1996. Ph.D. Dissertation – Department of Civil and Environmental Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, 1996.

MARTINEZ, J. Earthmover-Simulation Tool for Earthwork Planning. In: Winter Simulation Conference, 1998, Washington. **Proceedings...** Washington: WSC, 1998. p. 1263-1271.

- MARTINEZ, J.; IOANNOU, P. G. General Purpose Simulation with STROBOSCOPE. In: Winter Simulation Conference, 1994, Piscataway. **Proceedings...** Piscataway: WSC, 1994. p. 1159-1166.
- MARZOUK, M.; MOSELHI, O. Optimizing Earthmoving Operations Using Object-Oriented Simulation. In: Winter Simulation Conference, 2000, Orlando. **Proceedings...** Orlando: WSC, 2000. p. 1926-1932.
- MARZOUK, M.; MOSELHI, O. Selecting Earthmoving Equipment Fleets Using Genetic Algorithms. In: Winter Simulation Conference, 2002, San Diego. **Proceedings...** San Diego: WSC, 2002. p. 1789-1796.
- MELHADO, S. B.; FABRICIO, M. M. Projeto da produção e projeto para produção: discussão e síntese de conceitos In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 7., 1998, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: UFSC/ANTAC, 1998.
- MELHADO, S.B. **Qualidade do Projeto na Construção de Edifícios: aplicação ao caso das empresas de incorporação e construção.** 1994. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.
- MENDES JR., R.; HEINECK, L. F. M. Preplanning Method for Multi-Story building Construction Using Line of Balance. In: Annual Conference of the International Group for Lean Construction, 6., Guarujá, 1998. **Proceedings...** Guarujá: IGLC/UFRGS, 1998.
- MEREDITH, J. R.; SHAFER, S. M. **Administração da Produção para MBAs.** Porto Alegre: Bookman, 2002.
- MIRON, L. I. G. **Proposta de Diretrizes para o Gerenciamento dos Requisitos do Cliente em**
- MUKKAMALA; P. S.; SMITH, J. S.; VALENZUELA, J. F. Designing Reusable Simulation Modules for Electronics Manufacturing Systems. In: Winter Simulation Conference, 2003, New Orleans. **Proceedings...** New Orleans: WSC, 2003. p. 1281-1289.
- NASEREDDIN, M.; MULLENS, M. A.; COPE, D. Automated Simulator Development: A Strategy for modeling modular housing production. **Automation in Construction**, v. 16, p. 212-223, 2007.
- NUNAMAKER, J., CHEN, M., AND PURDIN, T. D. M. Systems Development in Information Systems Research. **Journal of Management Information Systems**. v.7, n.3, p. 89-106, Winter 1991.
- OLOUFA, A. A.; IKEDA, M.; NGUYEN, T. Resource-based Simulation Libraries for Construction. **Automation in Construction**, v. 7, p. 315-326, 1998.
- OSSES, N.; PIDD, M.; BROOKS, R. J. Critical issues in the development of component-based discrete simulation. **Simulation Modelling Practice and Theory**. v. 12, p. 495-514, 2004.

PAUL, R. J.; TAYLOR, S. J. E. What Use is Model Reuse: is there a crook at the end of the rainbow? In: Winter Simulation Conference, 2002, San Diego. **Proceedings...** San Diego: WSC, 2002. p. 648-652.

PAULSON JR., B. C. Interactive Graphics for Simulating Construction Operations. **Journal of the Construction Division**, v. 104, n. 1, p. 69-76, 1978.

PIDD, M. Complementarity in Systems Modelling. In: **Systems Modelling: theory and practice** (edited by Michael Pidd). Chichester: John Wiley & Sons, 2004.

PIDD, M. **Computer Simulation in Management Science**. 4th ed. Chichester: Wiley & Sons, 2002.

PIDD, M. Simulation *Software* and Model Reuse: a polemic. In: Winter Simulation Conference, 2002, San Diego. **Proceedings...** San Diego: WSC, 2002a. p. 772-775.

PORTER, K. *et al.* Manufacturing Classifications: relationship with production control systems. **Integrated Manufacturing Systems**. v. 10, n. 4, p. 189-198. [S.l.]: MCB University Press, 1999.

PRICE, S.; JOHN, P. The Status of Models in Defence Systems Engineering. In: **Systems Modelling: theory and practice** (edited by Michael Pidd). Chichester: John Wiley & Sons, 2004.

ROBINSON, S. *et al.* Simulation model reuse: definitions, benefits and obstacles. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 12, p. 479-494, 2004.

ROBINSON, S. General Concepts of Quality for Discrete-event Simulation. **European Journal of Operational Research**, v. 138, p. 103-117, 2002.

ROBINSON, S. **Simulation: The Practice of Model Development and Use**. Chichester: John Wiley & Sons, 2003.

RODRIGUES, A. A. **O Projeto do Sistema de Produção no Contexto de Obras Complexas**. (2006). Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

RODRIGUES, L. H.; MACKNESS, J. R. Teaching the Meaning of Manufacturing Synchronisation Using Simple Simulation Models. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 18, n. 3, p. 246-259, 1998.

ROHRER, M. W. Seeing is Believing: The Importance of Visualization in Manufacturing Simulation. In: Winter Simulation Conference, 2000, Orlando. **Proceedings...** Orlando: WSC, 2000. p. 1211-1216.

RUWANPURA, J. *et al.* Special Purpose Simulation Template for Utility Tunnel Construction. In: Winter Simulation Conference, 1999, Phoenix. **Proceedings...** Phoenix: WSC, 1999. p. 948-955.

RUWANPURA, J. Y.; ABOURIZK, S. M. Design, Development and Application of Soil Transition Algorithms for Tunneling Using Special Purpose Simulation. In: Winter Simulation Conference, 2001, Arlington. **Proceedings...** Arlington: WSC, 2001. p. 1512-1520.

SAFFARO, F. A.; PAULA, E. C. P. Formulating the Work Flow Plan for Horizontal Projects – Case Study. In: Annual Conference of the International Group for Lean Construction, 10., Gramado, 2002. **Proceedings...** Gramado: IGLC/UFRGS, 2002.

SALIBY, E. **Repensando a Simulação: a Amostragem Descritiva**. São Paulo: Atlas/EDUFRJ, 1989.

SANTOS, R. B. **Avaliação da Aplicação da Teoria das Restrições no processo de Planejamento e Controle da Produção de Obras de Edificação**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

SANVIDO, V.; PAULSON, B. Site-Level Construction Information System. **Journal of Construction Engineering and Management**, v.118, n.4, p. 701-715, Dec. 1992.

SAURIN, T. A. **Segurança e Produção: um modelo para o planejamento e controle integrado**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

SAWHNEY, A., ABOURIZK, S. M. Simulation Based Planning Method for Construction Project. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 121, n. 3, p. 297-303, 1995.

SCHEXNAYDER, C.; KNUTSON, K.; FENTE, J. Describing a Beta Probability Distribution Function for Construction Simulation. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 131, n. 2, p. 221-229, Feb. 2005.

SCHRAMM, F. K. **O Projeto do Sistema de Produção na Gestão de Empreendimentos Habitacionais de Interesse Social**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2004.

SHI, J. J.; ABOURIZK, S. M. An Automated Modeling System for Simulating Earthmoving Operations. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, v. 13, p. 121-130, 1998.

SHI, J. J.; ABOURIZK, S. M. Resource-based Modeling for Construction Simulation. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 123, n. 1, p. 26-33, March 1997.

SHI, J. J.; ZENG, S. X.; TAM, C. M. Modeling and Simulation of Public Housing Construction in Hong Kong. In: Winter Simulation Conference, 1998, Washington. **Proceedings...** Washington: WSC, 1998. p. 1305-1310.

SHI, J. J.; ZHANG, H. Iconic Animation of Construction Simulation. In: Winter Simulation Conference, 1999, Phoenix. **Proceedings...** Phoenix: WSC, 1999. p. 992-997.

SIMON, H. **The Sciences of the Artificial**. 3rd edition. Cambridge: MIT Press, 1996.

SKINNER, W. **Manufacturing, The Formidable Competitive Weapon**. New York: John Wiley & Sons, 1985.

SLACK, N. *et al.* **Administração da Produção**. São Paulo: Atlas, 1997.

SPETZLER, C. S.; VON HOLSTEIN, C. S. S. Probability Encoding in Decision Analysis. **Management Science**, v. 22, n. 3, p. 340-358, Nov. 1975.

THOMPSON, J. D., **Organizations in Action**. Nova York: McGraw-Hill, 1967.

TOMMELEIN, I. D. Discrete-event Simulation of Lean Construction Processes. In: Annual Conference of the International Group for Lean Construction, 5., Gold Coast, 1997. **Proceedings...** Gold Coast: IGLC, 1997.

TOMMELEIN, I. D. Process Benefits from use of Standard Products – Simulation Experiments Using the Pipe Spool Model. In: Annual Conference of the International Group for Lean Construction, 14., Santiago do Chile, 2006. **Proceedings...** Santiago do Chile: IGLC, 2006.

TOMMELEIN, I. D.; ODEH, A. M. Knowledge-based Assembly of Simulation Networks Using Construction Designs, Plans, and Methods. In: Winter Simulation Conference, 1994, Piscataway. **Proceedings...** Piscataway: WSC, 1994. p. 1 145-1158.

TSAO, C. C. Y. *et al.* Case Study for Work Structuring: installation of metal door frames. In: Annual Conference on the International Group for Lean Construction, 8., Brighton, 2000. **Proceedings...** Brighton: 2000.

TURNER, J. R. **The Handbook of Project-based Management**. London: McGraw-Hill, 1993.

UMBLE, M.M.; SRIKANTH, M.L. **Synchronous Manufacturing: principles for world-class excellence**. Wallingford: The Spectrum Publishing Company, 1995.

VAISHNAVI, V.; KUECHLER JR., W. **Design science research methods and patterns : innovating information and communication technology**. Boca Raton: Auerbach Publications, 2008.

VAN AKEN, J. E. Management Research Based on the Paradigm of the Design Sciences: The Quest for Field-Tested and Grounded Technological Rules. **Journal of Management Studies**. v. 41, n. 2, p. 219-246, 2004.

VANEGAS, J. A. BRAVO, E. B.; HALPIN, D. W. Simulation Technologies for Planning Heavy Construction Processes. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 119, n. 2, p. 336-354, June 1993.

VISKARI, S. **Managing Technologies in Research Organization: Framework for Research Surplus Portfolio**. 2006. MasterThesis (Industrial Engineering). Industrial Engineering and Management, Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, 2006.

WAGNER, P. R.; FREITAS, C. M. D. S.; WAGNER, F. R.; Um Novo Paradigma para modelagem e Simulação Interativa Visual. In: Simpósio Brasileiro de Computação Gráfica e Processamento de Imagens, 9., 1996, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBC, 1996. p. 87-94. Disponível em: <<http://mirror.impa.br/sibgrapi96/anais/artigos.html>>. Acesso em: 20 jun. 2004.

WALLSTEN, T. S.; BUDESCU, D. V. Encoding Subjective Probabilities: A Psychological and Psychometric Review. **Management Science**, v. 29, n. 2, Feb. 1983.

WALSH, K. D. Lead Time Reduction via Pre-Positioning of Inventory in an Industrial Construction Supply Chain. In: Winter Simulation Conference, 2002, San Diego. **Proceedings...** San Diego: WSC, 2002. p. 1737-1744.

WALSH, K. D.; SAWHNEY, A.; BASHFORD, H. H. Simulation of the Residential Lumber Supply Chain. In: Winter Simulation Conference, 2003, New Orleans. **Proceedings...** New Orleans: WSC, 2003. p. 1548-1551.

WELGAMA, P. S.; MILLS, R. G. J. Use of Simulation in the Design of a JIT System. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 15, n. 9, p. 245-260, 1995.

WESTBROOK, R. Action Research: a new paradigm for research in production and operations management. **International Journal of Operations & Production Management**. v. 15, n. 12, p. 6-20, 1995.

WIJESUNDERA, D. A.; OLOMOLAIYE, P. O.; HARRIS, F. C. Dynamic Simulation Applied to Materials Handling in High-Rise Construction. **Computers & Structures**, v. 41, n. 4, p. 1133-1139, 1991.

WILLIAMS, T. M. **Modeling Complex Projects**. Chichester: John Wiley & Sons, 2002.

WILLIAMS, T. M. The Need for New Paradigms for Complex Projects. **International Journal of Project Management**, v. 17, n. 5, p. 269-273, 1999.

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

YIN, R. K. **Estudo de Caso: Planejamento e Métodos**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

ZHANG, H.; SHI, J. J.; TAM, C. M. Iconic Animation for Activity-based Construction Simulation. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 16, n. 3, July 2002.

APÊNDICE A – Roteiro de Entrevista de Avaliação do Estudo de Caso

Roteiro de Entrevista Semi-estruturada

Empresa:

Nome: Cargo:

Data da entrevista:

1. Na sua opinião, qual a importância do PSP para o processo de gestão do empreendimento?
2. O que diferencia o PSP da forma como os empreendimentos eram anteriormente planejados?
3. Quais decisões do PSP foram operacionalizadas durante a execução do empreendimento?
4. Quais as principais dificuldades para esta operacionalização?
5. Como as ferramentas elaboradas foram utilizadas na tomada de decisão? Percebeu-se benefícios?
6. Com relação ao uso da simulação, quais suas impressões quanto à sua utilidade para a tomada de decisão?
7. Quais os principais benefícios e dificuldades do uso da simulação no estudo realizado?
8. Você empregaria o PSP como uma atividade de gestão em empreendimentos futuros?
9. Você utilizaria a simulação para apoiar a tomada de decisão em outros empreendimentos futuros?
Em que circunstâncias?