

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**PLANEJAMENTO LOGÍSTICO INTEGRADO APLICADO À
PROGRAMAÇÃO DE OBRAS DE INFRAESTRUTURA DE
TRANSPORTES**

MARCELLO DA COSTA VIEIRA

ORIENTADOR: REINALDO C. GARCIA

TESE DE DOUTORADO EM TRANSPORTES

PUBLICAÇÃO: T.TD-004/2019

BRASÍLIA / DF: JUL / 2019

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**PLANEJAMENTO LOGÍSTICO INTEGRADO APLICADO À
PROGRAMAÇÃO DE OBRAS DE INFRAESTRUTURA DE
TRANSPORTES**

MARCELLO DA COSTA VIEIRA

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM TRANSPORTES DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE
BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM TRANSPORTES.**

APROVADA POR:

**Prof. Dr. Reinaldo C. Garcia – PPGT/UnB
(ORIENTADOR)**

**Prof. Dr. Sérgio R. Granemann – PPGT/UnB
(EXAMINADOR INTERNO)**

**Prof. Dr. Luiz Guilherme R. de Melo – DNIT
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**Prof. Dr. José Vicente Caixeta Filho – ESALQ
(EXAMINADOR EXTERNO)**

BRASÍLIA/DF, 02 de julho de 2019.

FICHA CATALOGRÁFICA

VIEIRA, MARCELLO DA COSTA

Planejamento Logístico Integrado Aplicado à Programação de Obras de Infraestrutura de Transportes / tese. Brasília, 2019.

XII, 181 p., 210x297mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Transportes, 2019).

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Logística

2. Obras de Infraestrutura

3. Planejamento de tempo

4. Simulação Baseada em Agentes

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VIEIRA, M. C. (2019). Planejamento Logístico Integrado Aplicado à Programação de Obras de Infraestrutura de Transportes T.TD-004/2019. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 181 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Marcello da Costa Vieira

TÍTULO DA TESE: Planejamento Logístico Integrado Aplicado à Programação de Obras de Infraestrutura de Transportes.

GRAU: Doutor

ANO: 2019

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Marcello da Costa Vieira

DEDICATÓRIA

**À minha avó
Euridice Vieira**

**Aos meus pais
Wagner e Paula Vieira**

**À minha amada esposa
Lucia**

**Aos meus filhos
Juliana, Pedro, Mariana e Lucas**

AGRADECIMENTOS

Uma citação nominal a todos que direta ou indiretamente contribuíram para que esta tese de doutorado fosse concluída certamente incorreria no erro da omissão. No entanto, não posso me furtar de agradecer a colaboração de professores, colegas e amigos, pelo exemplo, incentivo e pela inestimável ajuda. A todos meus sinceros agradecimentos.

Em particular agradeço:

A professora Adelaida Pallavicini Fonseca, pelo exemplo de conduta, pela orientação, pelo seu incentivo ao desenvolvimento do conhecimento científico e, principalmente, pelo apoio e dedicação permanentes, sem os quais, difícil seria chegar ao fim do percurso.

Ao professor Reinaldo C. Garcia pela coragem e exemplo de profissionalismo ao assumir a orientação de minha tese em sua fase final de elaboração.

A minha esposa Lucia Simas França por todo seu amor e companheirismo, sem os quais o fardo a carregar durante o desenvolvimento do trabalho teria sido pesado demais.

Aos amigos do Programa de Pós-Graduação em Transportes Rafael Medeiros Hespanhol e Guilherme Luiz Bianco pela amizade fraterna e companheirismo ao longo da penosa fase de obtenção de créditos.

Aos amigos Fábio Pereira Borges e Cláudio de Matos Chagas pela longa amizade e pelo incentivo e cobrança à conclusão do trabalho.

RESUMO

PLANEJAMENTO LOGÍSTICO INTEGRADO APLICADO À PROGRAMAÇÃO DE OBRAS DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES

Sob a ótica sistêmica, uma obra de construção civil é um processo construtivo (produtivo) encadeado que tem como produto final um edifício, uma rodovia, uma ponte etc. O sucesso da realização do projeto construtivo consiste em poder integrar o planejamento de entrega das fontes de suprimentos ao plano de execução da obra de forma a reduzir as incertezas. A integração e coordenação dessas duas ações, logística e produção, depende da modelagem de três sistemas: o sistema logístico de fornecimento externo de produtos às áreas de armazenamento das usinas e canteiros de obra (cadeia de suprimento); o sistema logístico interno de fornecimento às usinas e destes às diferentes frentes de trabalho (cadeia de produção) e; o sistema logístico interno de suprimento aos canteiros de obra e deste às frentes de trabalho (cadeia de distribuição). A metodologia tradicional de planejamento de obras ignora os processos de múltiplos feedbacks, relacionamentos não lineares entre atividades e os processos de suprimentos de materiais e insumos às diferentes unidades produtivas e áreas de armazenamento. Então, o desenvolvimento de uma nova metodologia de planejamento do tempo faz-se necessária para permitir estimativas de duração dos projetos de infraestrutura. Nesta pesquisa foi proposto um modelo de simulação baseado em um sistema logístico integrado, estruturado em seis subsistemas: obtenção e preparação de dados, desenho da rede logística, entrada de dados, simulação, saída de dados e projeto de experimentos. O software *AnyLogic* foi escolhido como plataforma para se implementar o modelo de simulação pois permite o uso da Simulação Baseada em Agente. O desenvolvimento do presente trabalho demonstrou que é possível, sob a visão sistêmica da Logística conjugada com outras ciências do conhecimento tais como a Pesquisa Operacional e a Simulação Multiagentes, desenvolver uma nova metodologia de planejamento logístico integrado para projetos de infraestrutura de transportes que permita obter o sucesso nesses projetos.

ABSTRACT

INTEGRATED LOGISTIC PLANNING APPLIED TO TRANSPORT INFRASTRUCTURE SCHEDULING

Under a systemic point of view, a construction work is a linked (productive) construction process that has as its final product a building, a highway, a bridge, etc. The construction project's successful outcome consists in being able to integrate the supply sources' outputs planning with the work execution plan in order to reduce the uncertainties. The integration and coordination of these two actions, logistics and production, depends on the modeling of three systems: the logistics system of external supply of products to the storage areas of plants and construction sites (supply chain); the internal logistic system of supply to the plants and from these to the different work fronts (production chain) and; the internal logistic system of supply to the construction sites and from this to the work fronts (distribution chain). The traditional construction planning methodology ignore the processes of multiple feedbacks, nonlinear relationships between activities and the material and inputs' processes, different production units and storage areas. Therefore, development and a new time's planning methodology is required to allow duration estimates of infrastructure projects. In this research it was proposed a simulation model based on an integrated logistics system, structured in six subsystems: data's collection and preparation, logistic network's design, data entry, simulation, data output and experimental designs. The AnyLogic software was chosen as a platform to implement the simulation model because it allows the use of Agent Based Simulation. The development of the present work has shown that it is possible, under the systemic view of Logistics in conjunction with other knowledge sciences such as Operational Research and Multiagent Simulation, to develop a new integrated logistics planning methodology for transport infrastructure projects that allows the achievement of success in these projects.

SUMÁRIO

Capítulo	Página
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 DIAGNÓSTICO DO PAC – EXERCÍCIO 2013	5
1.2 RESULTADO DA PESQUISA DO <i>PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE</i> – CAPÍTULO BRASIL	7
1.3 A IMPORTÂNCIA DO PLANEJAMENTO LOGÍSTICO EM PROJETOS COMPLEXOS	8
1.4 EVOLUÇÃO DO CONCEITO DE PLANEJAMENTO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	9
1.5 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	11
1.5.1 Características da Construção Pesada	12
1.5.2 Fatores que Afetam o Sucesso dos Projetos	14
1.5.3 Uma Nova Abordagem para o Problema de Planejamento e Gerenciamento de Obras de Infraestrutura de Transportes: Ruptura de Paradigmas	16
1.6 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	18
1.7 OBJETIVOS	19
1.8 JUSTIFICATIVA	19
1.9 CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA	22
1.10 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO	23
1.11 PROPOSTA METODOLÓGICA	23
2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	26
2.1 A REVISÃO DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA NO ACERVO DA UNB	26
2.2 A REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA NOS MOTORES DE PESQUISA	26
2.3 RESULTADO DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	27
2.4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS (ESTADO DA ARTE)	32

2.4.1	Emprego do “Critical Path Method” – CPM e “Program Evaluation and Review Technique” – PERT na Programação de Atividades	33
2.4.2	Linear Projects e Repetitive Projects	35
2.4.3	Técnicas de Programação	37
2.5	METODOLOGIA TRADICIONAL DE PLANEJAMENTO DE TEMPO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	39
2.5.1	Metodologia Tradicional de Planejamento de Projetos de Construção Civil	40
2.5.2	Detalhamento dos Processos de Planejamento do Tempo de uma Obra de Construção Civil: Metodologia Tradicional	43
2.6	CONCLUSÕES	53
3	CONCEITOS E TEORIAS PARA O PLANEJAMENTO LOGÍSTICO DE PROJETOS DE INFRAESTRUTURA	55
3.1	A CADEIA DE SUPRIMENTO NO DOMÍNIO DA CONSTRUÇÃO CIVIL	55
3.2	O PAPEL DA CADEIA DE SUPRIMENTO NO PLANEJAMENTO DO TEMPO	59
3.3	PLANEJAMENTO HIERÁRQUICO DA PRODUÇÃO PUXADA APLICADO ÀS OBRAS DE INFRAESTRUTURA	61
3.3.1	Planejamento para a Produção Puxada	63
3.3.2	Planejamento Hierárquico da Produção	65
3.4	ÁREAS DE DECISÃO DO PLANEJAMENTO DE TEMPO DE PROJETOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL	68
3.4.1	Estratégias de Produção, Planejamento e Controle da Cadeia de Suprimentos	69
3.4.2	Decisões de Transporte	71
3.4.3	Decisões de Instalações e Localização	73
3.4.4	Previsão de Demanda e Capacidade	74
3.4.5	Qualidade	75
3.4.6	Filas e Fluxos	76
3.4.7	Sistemas de Planejamento, Programação e Controle da Produção	76
3.4.8	Medidas de Desempenho	77

3.5	SISTEMAS MULTIAGENTES - SMA	79
4	DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO CONCEITUAL PARA O PLANEJAMENTO LOGÍSTICO INTEGRADO	83
4.1	INTRODUÇÃO	83
4.2	A ESTRUTURA ANALÍTICA DE SERVIÇOS DE OBRAS RODOVIÁRIAS	85
4.2.1	Disciplina: Terraplenagem	87
4.2.2	Disciplina: Obras de Arte Corrente	90
4.2.3	Disciplina: Pavimentação: Camadas de Sub-Base e Base	92
4.2.4	Disciplina: Pavimentação: Camada de Revestimento Asfáltico – CBUQ	96
4.3	PLANEJAMENTO LOGÍSTICO INTEGRADO EM PROJETOS DE INFRAESTRUTURA	97
4.4	MODELO CONCEITUAL PROPOSTO PARA O PLANEJAMENTO LOGÍSTICO INTEGRADO À PROGRAMAÇÃO DE PROJETOS DE INFRAESTRUTURA	100
4.4.1	Subsistema 1 – Obtenção e preparação de dados	101
4.4.2	Subsistema 2 – Desenho da Rede Logística	105
4.4.3	Subsistema 3 – Entrada de Dados:	107
4.4.4	Subsistema 4 – Simulação	107
4.4.5	Subsistema 5 – Saída de Dados	110
4.4.6	Subsistema 6 – Projeto de Experimentos	111
5	CRIAÇÃO DE UM MODELO DE SIMULAÇÃO A PARTIR DA SIMULAÇÃO BASEADA EM AGENTES	112
5.1	INTRODUÇÃO	112
5.2	A SIMULAÇÃO BASEADA EM AGENTES	113
5.3	DESCRIÇÃO DOS AGENTES	115
5.3.1	Agente Jazida	115
5.3.2	Agente Canteiro de Obra	119
5.3.3	Agente Usina	119
5.3.4	Agente Equipe de Manutenção	120

5.3.5	Agente Equipe de Trabalho	121
5.3.6	Agente Transporte	123
5.3.7	Agentes Controle de Pedido e Trecho	125
6	APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO ATRAVÉS DE UM ESTUDO DE CASO	126
6.1	INTRODUÇÃO	126
6.2	ESTUDO DE CASO: A RODOVIA BR-163/PA	126
6.3	APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO	131
6.3.1	Obtenção e preparação de dados	131
6.3.2	Desenho da Rede Logística	139
6.3.3	Entrada de Dados	146
6.3.4	Simulação	152
6.3.5	Saída de Dados e Projeto de Experimentos	153
7	CONCLUSÕES	157
7.1	CONCLUSÕES	157
7.2	RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	160
ANEXO A	PROCESSOS DE PLANEJAMENTO DE TEMPO (PMI – 3ed.)	167
ANEXO B	PROCESSOS DE PLANEJAMENTO DE TEMPO (CARL V. LIMMER)	169
ANEXO C	PROCESSOS DE PLANEJAMENTO DE TEMPO (CLOUGH, S. SEARS E G. SEARS)	170
ANEXO D	PROCESSOS DE PLANEJAMENTO DE TEMPO (SALEH MUBARAK)	171
ANEXO E	PLANILHAS DE ENTRADA DE DADOS	172

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-1 - Matriz modal de transportes de carga nacional - em %	1
Tabela 1-2 - Execução da ação transporte PAC 2 (em R\$ bilhões - exercício 2013)	6
Tabela 2-1 - Seis Passos da Revisão Sistemática da Literatura	28
Tabela 2-2 - Relação dos Estudos Identificados	30
Tabela 3-1 - Causas de atraso em grandes projetos de construção	59
Tabela 3-2 - Áreas de decisão dos projetos de construção.....	70
Tabela 3-3 - Métricas de Desempenho.....	78
Tabela 4-1 – Comprimento Equivalente de Bueiros	92
Tabela 6-1 – Custo de Implantação por Disciplina	130
Tabela 6-2 – Quantidade Aproximada dos Principais Serviços por Segmento.....	130
Tabela 6-3 – Quadro de Quantidades Unitárias de Bueiros	135
Tabela 6-4 – Fatores de Equivalência para Bueiros	135
Tabela 6-5 – Localização Elementos Cadeia Suprimentos	136
Tabela 6-6 – Comprimento Equivalente Drenagem 01.....	137
Tabela 6-7 – Comprimento Equivalente Drenagem 02.....	137
Tabela 6-8 – Fatores de Equivalência Drenagem 01.....	138
Tabela 6-9 – Fatores de Equivalência Drenagem 02.....	138
Tabela 6-10 – Macro Heurística - NEH	141
Tabela 6-11 – Resultado Sequenciamento BR-163/PA	141
Tabela 6-12 – Cenário: Sequência Crescente Estaqueamento	141
Tabela 6-13 – Cenário: Sequência Decrescente Estaqueamento	142
Tabela 6-14 – Planilha de Cálculo de Duração de Atividades.....	145
Tabela 6-15 – Custo Total Instalação e Transporte - Usina de Solo BR-163/PA.....	147
Tabela 6-16 – Dados de Entrada para Programação Linear.....	148
Tabela 6-17 – Planilha de Entrada para Programação Linear	149
Tabela 6-18 – Planilha de Cálculo de Duração de Atividades.....	153
Tabela 6-19 – Duração dos Cenários Simulados	155

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 - Investimentos previstos no PNLP (em R\$ bilhões)	3
Figura 1-2 - Cadeia logística obras rodoviárias	17
Figura 1-3 - Sistema de demanda de tecnologia de transportes	21
Figura 1-4 - EAP Metodologia da tese	23
Figura 2-1 - Áreas do conhecimento	43
Figura 2-2 - Processos de planejamento	44
Figura 3-1 - Cadeia logística de uma obra rodoviária	58
Figura 3-2 - Planejamento hierárquico para produção puxada	67
Figura 3-3 - Esquema de Viagens de uma Obra Rodoviária	73
Figura 3-4 - Níveis de abstração dos métodos de simulação	80
Figura 3-5 - Diagrama de Estados do Agente “Service Crew”	81
Figura 3-6 - Diagrama de Mensagens	82
Figura 4-1 – Sequência Construtiva de Obras Rodoviárias	85
Figura 4-2 - Estrutura de Serviços – Obras Rodoviárias	86
Figura 4-3 – Serviços de Escavação e Carga e Compactação de Aterro	87
Figura 4-4 – Cadeia de Suprimentos da Terraplenagem	88
Figura 4-5 – Avanço Terraplenagem m ³ x km	90
Figura 4-6 – Serviço de Construção de Bueiro Tubular e Celular	91
Figura 4-7 – Serviço de Compactação de Base de Brita Graduada - BGS	93
Figura 4-8 – Usina de Solos Móvel	94
Figura 4-9 – Cadeia de Suprimentos Sub-base e Base	95
Figura 4-10 – Usina de Asfalto Móvel	96
Figura 4-11 – Lançamento de CBUQ	97
Figura 4-12 - Cadeia Logística Obras Rodoviárias	98
Figura 4-13 - Subsistemas e Processos	102
Figura 4-14 Divisão do Modelo Proposto em Subsistemas	102
Figura 4-15 Divisão do Subsistema Simulação	109
Figura 5-1 - Diagrama de Estados do Agente Jazida	115
Figura 5-2 -Diagrama de Processos	118
Figura 5-3 - Agente Canteiro de Obras	119
Figura 5-4 - Agente Usina	119
Figura 5-5 - Agente Equipe de Manutenção	120

Figura 5-6 - Agente Equipe de Trabalho.....	121
Figura 5-7 - Agente Transporte.....	124
Figura 5-8 -: Agente Controle de Pedido	125
Figura 5-9 -: Agente Trecho.....	125
Figura 6-1 – Localização do Lote 1.4 da BR-163/PA.....	127
Figura 6-2 – Localização dos Segmentos.....	128
Figura 6-3 – Seção Transversal de Pavimentação.....	129
Figura 6-4 – EAP BR-163.....	134
Figura 6-5 – MRP BR-163.....	140
Figura 6-6 – Restrições no Solver.....	147
Figura 6-7 – Sequência de Entrada de Dados	150
Figura 6-8 – Gráfico MTBF x Duração	156

1 INTRODUÇÃO

A ampliação da oferta e da eficiência da rede de infraestrutura do país se apresenta como um dos desafios a serem enfrentados rumo ao desenvolvimento nacional, de acordo com o Plano Plurianual (PPA) 2016-2019. A resolução desse gargalo é necessária para a redução de custos e a melhoria da competitividade das empresas nacionais no mercado internacional, de modo a condicionar significativamente a produtividade e a competitividade do sistema econômico como um todo e, ao mesmo tempo, melhorar o bem-estar social (TCU, 2017).

A própria configuração da rede de transportes influencia no desempenho logístico. Países de grandes dimensões tendem a concentrar sua matriz de transportes de cargas em modos de transporte de menor custo unitário, como o ferroviário e o hidroviário, este segundo a disponibilidade de rios navegáveis, um potencial competitivo brasileiro. O modo rodoviário é utilizado em curtas distâncias, nas quais sua operação é mais eficiente. China, Estados Unidos e Rússia seguem esse padrão. Entretanto, no Brasil, a matriz de transporte de cargas é predominantemente rodoviária. Atualmente, as rodovias federais totalizam 76,4 mil quilômetros, dos quais 64,8 mil km são pavimentados (EPL, 2018).

A necessidade de adequação da matriz aos padrões internacionais é claramente expressa no Plano Nacional de Logística (PNL), principal norteador das políticas públicas do setor de transporte, elaborado pela Empresa de Planejamento e Logística (EPL) em junho de 2018. Na Tabela 1-1, encontra-se a configuração da matriz de transporte de cargas nacional projetada para o ano de 2025 no PLN,

Tabela 1-1 - Matriz modal de transportes de carga nacional - em %

MODO	2015	CENÁRIO PNL 2025	DIFERENÇA
RODOVIÁRIO	65,00	50,00	- 15,00
FERROVIÁRIO	15,00	31,00	+ 16,00
HIDROVIÁRIO	5,00	5,00	0,00
CABOTAGEM	11,00	10,00	-1,00
DUTOVIÁRIO	4,00	4,00	0,00
TOTAL	100,00	100,00	

Fonte: PNL (2018)

As estimativas do Fundo Monetário Internacional (FMI), publicadas em seu “*World Economic Outlook*”, em abril de 2019, projetam uma retomada da trajetória de crescimento

econômico para o país, mesmo que num ritmo reduzido, nos próximos anos. Em um contexto de maior integração comercial, as perspectivas de crescimento da economia brasileira exigem a expansão e a melhoria da infraestrutura de transporte, elemento crucial para o planejamento e desenvolvimento da rede logística do país e essencial para a competitividade da produção nacional de bens. A estratégia governamental é apoiada na transformação estrutural da matriz modal de transporte de cargas e no aprofundamento do programa de concessões. Espera-se, no fim do processo, a obtenção de uma matriz modal equilibrada, com uma rede de transporte mais extensa, de melhor qualidade e com gestão eficiente.

A infraestrutura é um dos pilares básicos para a competitividade de um país. Segundo o relatório *The Global Competitiveness Report 2017-2018* do Fórum Econômico Mundial que define doze pilares para avaliar o Índice de Competitividade Global (*Global Competitiveness Index - GCI*), no período, o Brasil ocupou a 80º posição do GCI em uma lista com 137 países analisados. Em 2012-2013, o Brasil encontrava-se bem melhor no ranking, aparecendo em 48º lugar. Quanto ao pilar infraestrutura, o Brasil aparece em 73º lugar, porém a posição cai muito ao avaliar a qualidade geral de infraestrutura, ocupando a 108º posição. O setor de logística apresenta as piores avaliações considerando a qualidade das estradas, das ferrovias, dos portos e dos aeroportos, conforme a posição e a nota apresentadas no Relatório de Competitividade Global 2017-2018 (*WORLD ECONOMIC FORUM, 2017*).

Os investimentos em infraestruturas de transportes contribuem no desenvolvimento e crescimento econômico do país já que influenciam positivamente no volume do emprego e na demanda, além de alterar e ampliar as interações espaciais. Fromm (1968), ao discutir o papel dos transportes no desenvolvimento econômico, já foi capaz de evidenciar que os transportes criam economias internas para muitos setores e ao mesmo tempo desenvolvem a economia externa para todos eles.

Desde então, muitos especialistas nas áreas de transporte e de logística (Bowersox, 1996; Hay, 1998; Ballou, 2006; Bertaglia, 2003; Vieira, 2006; EPL, 2018 etc.) enfatizam, sob pontos de vistas convergentes, que a ampliação da rede de transportes e implantação de outros meios de transporte permitem a integração de cidades e regiões econômicas promovendo o aumento da mobilidade e da acessibilidade da população. Essa estratégia tende a diminuir os custos de transportes pela competitividade dentre as diversas alternativas de modos de transporte e de rotas para a distribuição de bens e mercadorias e transporte de pessoas. Além

disso, estimula o setor industrial, comercial, turístico e outras atividades econômicas; melhora a médio e longo prazos a economia e o bem-estar das áreas sob influência e promove uma melhor distribuição de renda.

No entanto, a ampliação da rede de transporte que permitirá a implantação dos diversos sistemas de transporte e viabilizará a rede logística do país, precisa do bom planejamento e execução das obras de engenharia de infraestrutura de transportes dentro dos prazos e orçamentos estabelecidos, questão importante e inerente à consecução dos objetivos de crescimento econômico do país.

Mapeamento realizado pelo Ministério da Infraestrutura indicou a necessidade de investimentos da ordem de R\$ 430 bilhões, em valores de junho de 2011, na expansão dos diferentes modos de transporte, de 2008 até 2023, conforme apresentado na Figura 1-1. Esse esforço seria dividido entre os setores público e privado BNDES (2012).

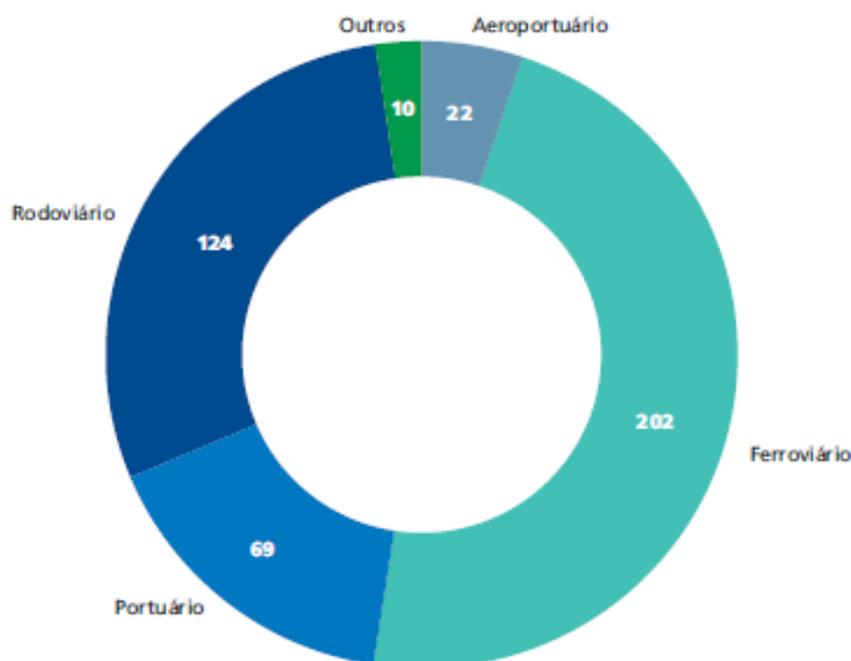


Figura 1-1 - Investimentos previstos no PNL (em R\$ bilhões)
Fonte: Ministério da Infraestrutura

O levantamento do Departamento de Transportes e Logística, da Área de Infraestrutura do BNDES, com base nos projetos apresentados ao Banco nos setores portuário, ferroviário e rodoviário, acrescidos dos investimentos públicos do governo federal previstos no PAC e dos estados nos projetos que contam com a contrapartida do BNDES, aponta um investimento no

setor de aproximadamente 0,8% do PIB. Este investimento é aquém do necessário, de acordo com a projeção do Ministério dos Transportes.

Os principais desafios na consecução dos objetivos propostos pelo BNDES são a capacidade de investimento e a qualidade da gestão dos ativos. Apesar da diversidade de avaliações sobre o estado das contas públicas, o diagnóstico de relativa limitação para ampliação dos gastos públicos é praticamente comum às diversas fontes pesquisadas (BNDES, 2012).

Se por um lado, conforme afirma o BNDES, faltam recursos públicos para garantir os investimentos necessários à ampliação da oferta e da eficiência da atual rede de infraestrutura de transporte do país; por outro, a indústria da construção civil¹ no país, em termos de competitividade, está aquém das expectativas dos investidores, já que apresenta dificuldades no cumprimento de prazos, no respeito aos orçamentos pré-determinados e no atendimento à qualidade exigida. Essa situação impacta na credibilidade da indústria da construção e faz que um projeto de infraestrutura de transporte seja visto como de alto risco para os investidores.

Vieira (2006) afirma que o setor de construção civil², particularmente o subsetor de edificações, vem se distanciando de outros setores da indústria manufatureira no aspecto evolutivo e competitivo quanto a termos de gestão. O autor aponta que isso deve-se à falta de competição de mais empresas operando no setor, como de concorrentes externos e a enorme carência habitacional brasileira.

Essa conclusão pode ser extrapolada ao subsetor da construção pesada de infraestrutura de transportes. Afinal, esse setor, além de sofrer com os baixos índices de produtividade, excesso de retrabalho, desperdício de material ainda tem que conviver com a desconfiança do Governo, dos contratantes de obras e dos órgãos de controle. A enorme demanda por obras de infraestrutura no país e, a ausência de empresas concorrentes tanto internas quanto externas e de instrumentos mais rígidos no cumprimento dos contratos, não motivam as grandes

¹ A construção civil é um setor industrial que representa uma importância fundamental na economia brasileira. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, o setor possui participação relevante no Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil (Vieira, 2006).

² A construção civil divide-se em três subsetores: edificações, responsável pela construção de edificações unifamiliares e multifamiliares; construção pesada, que objetiva a construção de infraestrutura de transportes, energia, telecomunicações e saneamento; montagem industrial, responsável pela montagem de estruturas metálicas nos diversos setores industriais, sistemas de geração de energia, de comunicações e de exploração de recursos naturais.

empresas do setor de evoluírem técnica e operacionalmente. A consequência disso pode ser aferida pelo baixo índice de sucesso de seus projetos.

Vários autores (Kerzner, 2003; Limmer, 2013; PMI, 2013 etc.) ressaltam que o sucesso de um projeto pode ser medido por um conjunto de indicadores de desempenho. Utilizando essa mesma argumentação pode-se inferir que o sucesso dos projetos de construção pesada pode ser medido também, a partir de um conjunto de indicadores de desempenho. Esses indicadores estariam relacionados ao cumprimento de prazos; aos custos predefinidos; ao atendimento dos padrões mínimos de qualidade exigidos e as expectativas dos financiadores dos projetos e das demais partes interessadas, além do atendimento aos aspectos legais.

A experiência de campo adquirida por esse pesquisador, trabalhando com o planejamento e execução de obras de construção pesada, há mais de 20 anos, somada ao estado da arte com relação a esse problema mostrou que para se caracterizar o sucesso de um projeto é necessário o atendimento simultâneo a todos esses indicadores; não bastando somente o atendimento parcial aos indicadores (restrições) supracitados.

A construção, por exemplo, de um estádio de futebol que cumpriu o prazo, atendeu ao orçamento e à qualidade predefinida, porém não atendeu a legislação vigente atinente a licitações e contratos administrativos, não pode ser considerado um projeto de sucesso. O reflexo mais dramático da dificuldade do setor de construção civil pesada no Brasil de atingir sucesso em seus projetos fica evidente no relatório anual do Tribunal de Contas da União (TCU).

1.1 DIAGNÓSTICO DO PAC – EXERCÍCIO 2013

O Relatório e Parecer Prévio sobre as Contas do Governo Federal - Exercício 2013, na parte relativa à ação setorial do governo apresenta um diagnóstico do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), principal ação do Governo Federal para investimentos em infraestrutura. Os dados apresentados a seguir foram retirados do referido relatório (TCU, 2014).

No eixo Transportes do PAC foi mantida a previsão, já existente ao final de 2012, de aplicar, até o final de 2014, prazo de vigência do PAC 2, o montante de R\$ 107,56 bilhões. Desse valor, até dezembro de 2013 foram concluídas ações no montante de R\$ 43,79 bilhões, que

representam apenas 40,7% do valor previsto. A Tabela 1-2 sintetiza as metas para 2014 e o valor aplicado nas ações do eixo concluídas até dezembro de 2013.

O elevado grau de execução na categoria Aeroporto (241,10%) na Tabela 1-2 deve-se, em boa parte, à ocorrência dos leilões de concessão dos aeroportos de Campinas e Guarulhos, em São Paulo, e de Brasília, em 2012, contabilizados no 9º Balanço do PAC com os valores de R\$ 8,72 bilhões, R\$ 4,70 bilhões e R\$ 2,85 bilhões, respectivamente. Esses valores não estavam previstos na coluna (B) “Valor original previsto até 2104”.

Tabela 1-2 - Execução da ação transporte PAC 2 (em R\$ bilhões - exercício 2013)

TIPO	VALOR - AÇÕES CONCLUÍDAS (A)	VALOR -ORIGINAL PREVISTO ATÉ 2014 (B)	EXECUÇÃO - % (A/B)
RODOVIA	20,25	50,71	39,93
FERROVIA	1,00	42,09	2,38
AEROPORTO	17,48	7,25	241,10
PORTO	0,50	4,22	11,85
HIDROVIA	0,13	1,49	8,72
ESQUIPAMENTOS - ESTRADAS VICINAIS	2,11	1,80	117,22
DEFESA E SEGURANÇA NACIONAL	2,32	0,00	0,00
TOTAL	43,79	107,56	40,71

Fonte: SEPAC

Do relatório do TCU conclui-se que apenas 1 de cada 4 obras de infraestrutura previstas no PAC foi concluída até 2013. Além do andamento físico das obras, o relatório do TCU abordou as auditorias realizadas pelo Tribunal nas obras em andamento. De um total de 1.145 contratos/obras, 134 se encontravam paralisados em 2013, o que corresponde a 11,70%.

A ineficiência do setor de construção pesada observada pelo TCU confirma os resultados da pesquisa do *Project Management Institute* (PMI), realizada junto aos gerentes de projetos tanto do Governo quanto do setor privado. Da mesma forma, Gomide et al. (2018) afirma que além das restrições fiscais que restringem o investimento em infraestrutura no Brasil, os empreendimentos realizados pelo governo não são eficientes. Uma das justificativas é a limitada capacidade de execução pelo Estado no planejamento, na elaboração e na escolha dos projetos, e, também, nos controles administrativos e na coordenação governamental.

A indústria nacional da construção pesada não tem conseguido concluir com sucesso os projetos³ e assim atender à necessidade de investimento no setor de transportes. O resumo dos resultados dessa pesquisa é apresentado no item a seguir.

1.2 RESULTADO DA PESQUISA DO *PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE* – CAPÍTULO BRASIL

O estudo realizado em 2010 pelo PMI, intitulado “Estudo de Benchmarking em Gerenciamento de Projetos Brasil 2010” constatou que:

- 38% dos entrevistados, pertencentes ao setor de Engenharia e 48%, do setor Governo – Administração Direta alegaram que em suas empresas/órgãos existe uma cultura apenas embrionária de gerenciamento de projetos, limitada a alguns profissionais e em algumas áreas;
- 15% dos entrevistados, pertencentes ao setor de Engenharia e 33%, do setor Governo – Administração Direta alegaram que em suas empresas/órgãos existe alto grau de resistência em relação ao Gerenciamento de projetos;
- 66% dos projetos pertencentes ao setor de Engenharia e 40% do setor Governo – Administração Direta alcançaram sucesso em termos de prazo, custo, qualidade e satisfação dos clientes;
- 69% dos entrevistados, pertencentes ao setor de Engenharia e 100%, do setor Governo – Administração Direta alegaram que costumam ter problemas no cumprimento dos prazos em seus projetos;
- 56% dos entrevistados, pertencentes ao setor de Engenharia e 75%, do setor Governo – Administração Direta alegaram que costumam ter problemas no cumprimento dos custos em seus projetos; e
- 25% dos entrevistados, pertencentes ao setor de Engenharia e 65%, do setor Governo – Administração Direta alegaram que costumam ter problemas com a qualidade em seus projetos.

Os projetos analisados pelo PMI estão organizados em 05 Grupos de Processos distintos: iniciação, planejamento, execução, monitoramento e controle e, encerramento. Apesar de que

³ O PMI define *Project*, traduzido para o português como “projeto”, por um esforço temporário empreendido para criar um produto, serviço ou resultado exclusivo (PMI, 2013). Apesar de se usar a mesma palavra em português para definir projetos de engenharia; os significados são diferentes. Neste texto, a palavra projeto, quando usada sozinha, será sinônimo de “empreendimento”.

todos esses projetos analisados apresentam uma sequência lógica de processos, os resultados indicam uma baixa maturidade no gerenciamento de projetos por parte dos setores da economia pesquisados, principalmente na Administração Pública, que mostra uma baixa taxa de sucesso. Resta então definir, qual dos cinco grupos de processo influencia negativamente nos indicadores de desempenho.

O PMBOK⁴ afirma que o sucesso dos projetos, sejam de construção ou não, dependem com maior intensidade do Grupo de Processos de Planejamento. Segundo Limmer (2013) o planejamento permite:

“Definir a organização para realizar a obra; tomar decisões gerenciais e operacionais; alocar recursos; integrar e coordenar esforços de todos os envolvidos; assegurar boa comunicação entre os participantes da obra; suscitar a conscientização dos envolvidos para prazos, qualidade e custos; caracterizar a autoridade do gerente; estabelecer referencial para controle; e definir prioridades através de objetivos intermediários. ”

As principais razões para investir tempo no desenvolvimento do planejamento são: (KERZNER, 2003)

- Eliminar ou reduzir as incertezas;
- Aumentar a eficiência da produção;
- Melhorar o entendimento dos objetivos;
- Estabelecer a base para monitoramento e controle.

1.3 A IMPORTÂNCIA DO PLANEJAMENTO LOGÍSTICO EM PROJETOS COMPLEXOS

As obras de construção pesada, foco do presente trabalho, apresentam particularidades que as transformam em projetos complexos, que vão desde a qualidade e acurácia dos dados levantados, necessários e indispensáveis para os estudos prévios ao traçado da rota; ao desenho geométrico horizontal e vertical; ao cálculo dos esforços estruturais a que são submetidas tanto pelo impacto dos veículos (automóveis, trens ou aviões) que por ela trafegarão como pelas forças da natureza que a degradarão ou mesmo a destruirão, segundo sua intensidade; ao desenho e cálculo das obras de arte, até a realização dos estudos econômicos, sociais, ambientais e financeiros.

⁴ Project Management Body of Knowledge (PMBOK) é o livro de boas práticas em gerenciamento de projetos editado pelo PMI. Encontra-se atualmente na sua quinta versão, publicado em 2013.

Essas obras são as que mais impactam na sociedade pela abrangência e dimensão espacial, pelo volume de recursos envolvido nas diferentes fases dos processos de planejamento e execução e pelo alcance econômico e social esperado. Sua complexidade centra-se na dificuldade de se planejar e gerenciar um projeto dessa dimensão que abrange um volume de recursos na mesma proporção de sua grandeza. Recursos que representam investimentos elevados, de difícil captação e de difícil recuperação, caso o projeto não seja finalizado, ou não se conclua dentro do orçamento e prazo estabelecido, ou não consiga chegar a ter o sucesso desejado. Questão que repercute intensamente na credibilidade dos gestores do projeto que participaram nas diferentes fases de seu planejamento e execução.

Segundo Hillson (2013) complexidade é uma variável qualitativa, portanto de difícil mensuração. O autor defende que a complexidade não é apenas uma função de escala, já que um projeto pode ser grande, mas simples, ou pequeno e complexo. Na realidade, a complexidade surge da estrutura do projeto e da forma como os seus elementos se relacionam entre si. Trata-se da imprevisibilidade e da sensibilidade de sua produção global frente a variações dos dados de entrada, número de interligações e dependências dentro dos diferentes elementos e componentes do projeto. Portanto, o comportamento de projetos complexos é muitas vezes ambíguo, o que significa que projetos complexos são sempre arriscados.

A complexidade dos projetos exige “expertise” e conhecimentos multidisciplinares da equipe de planejadores. As decisões e escolhas realizadas nessa fase repercutem ao longo de todo o ciclo de vida do projeto. Acontece que é justamente nessa fase que se precisa de uma boa base de dados e informações de qualidade para a tomada de decisão. Entende-se também, que o planejamento é um processo dinâmico, portanto ele deve ser progressivo e retroalimentado constantemente, principalmente em obras de grande porte.

1.4 EVOLUÇÃO DO CONCEITO DE PLANEJAMENTO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Dos resultados obtidos de uma pesquisa exploratória não estruturada junto a profissionais da área de construção pesada, aplicada nos dois primeiros anos dessa pesquisa, infere-se que o processo de tomada de decisão na fase de planejamento é difícil e complexo. No entanto, poucas são as iniciativas adotadas para amenizar esse problema.

Apesar da importância do setor na economia nacional, a rigor, pode-se concluir que os conceitos utilizados nos processos de planejamento e controle dos projetos de construção civil pouco evoluíram nas últimas décadas⁵, apesar da grande evolução tecnológica. A utilização maciça de softwares não reduziu o empirismo nem aumentou a capacidade de modelagem e tratamento de variáveis na fase de planejamento, já que eles se concentraram apenas na automatização desses processos e tratamento de base de dados.

Pelo contrário, a maior disponibilidade de ferramentas informatizadas passa a ideia de que é fácil elaborar o planejamento de um projeto de construção civil bastando simplesmente saber como operar o software. Isto agravou o problema e pouco contribuiu para o sucesso dos projetos de construção civil, principalmente os de construção pesada.

O setor de construção civil sempre apresentou sérios problemas com perdas, desperdícios, prazos, produtividade e qualidade. Problemas difíceis de equacionar, já que envolve o gerenciamento e controle de recursos internos e externos ao ambiente da construção. Segundo Vieira (2006), esses problemas foram equacionados nos outros setores da indústria manufatureira a partir da abertura econômica ocorrida no país na década de 1980, onde a indústria seriada passou a sofrer com a forte concorrência externa. Houve, então uma transformação radical nas estruturas operacionais e administrativas das empresas desse segmento, as quais tiveram que se requalificar tecnologicamente e fazer toda uma reengenharia para adaptar-se as mudanças do ambiente de concorrência que cercavam as empresas.

A indústria se remodelou, desde sua concepção como empresa sob uma visão sistêmica, buscou a interdependência dos processos e das estruturas dos sistemas produtivo e logístico com os outros sistemas da empresa (financeiro, administrativo etc.) sob uma única missão e adotou novas ciências de conhecimento para realizar todo esse processo de reengenharia. A ciência da logística foi adotada para ganhar vantagens competitivas por meio da redução de custos, melhoria dos serviços e cumprimentos de prazo.

⁵ Os argumentos que levaram o autor a essa conclusão ficarão mais claros nos próximos capítulos que tratam da revisão bibliográfica e da metodologia tradicional de planejamento.

As empresas do setor concluíram que era essencial desenhar o projeto logístico da empresa antes da sua implantação ou reestruturação. Assim, surgiu o planejamento logístico-produtivo da empresa, ação estratégica que sob uma visão sistêmica envolveu a análise da capacidade de produção da empresa em conjunto com o planejamento da rede logística de suprimentos e a rede logística de distribuição para atender a uma determinada função de demanda.

Esse processo de construção do projeto logístico permitiu as empresas do setor otimizar processos e quantificar os recursos necessários, eliminar gargalos, desperdícios e folgas inúteis, conhecer melhor a empresa e o ambiente em que se encontra inserida, lidar com as incertezas e aprender a agir com rapidez diante das convulsões do mercado (VIEIRA, 2006). Uma vez construído o projeto logístico, o seguinte passo foi sua implantação, para o qual as empresas aprenderam a construir seu plano estratégico e investir naquelas ações que viessem a agregar valor à empresa. Aqui o sistema logístico de informação teve um papel essencial na organização, já que facilitou a tomada de decisão em tempo real.

Das análises realizadas, as atividades de uma obra de construção civil muito se assemelham às atividades tradicionais de uma empresa de manufatura. Então, nada mais natural do que incorporar conceitos da engenharia de produção e da ciência da logística à metodologia tradicional de planejamento de projetos de construção de forma a aumentar o índice de sucesso desses projetos. A proposta é inverter os esforços dos tomadores de decisão, ao invés de se buscar a mudança de processos para reduzir o atraso de cronogramas ou o estouro de orçamentos através de novos métodos construtivos e de equipamentos mais modernos, investir no planejamento da obra sob a visão sistêmica da logística.

1.5 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A rigor, pode-se concluir que o setor industrial brasileiro viveu nas últimas décadas uma grande pressão por redução de custos e por qualidade advinda de novos entrantes ocasionados pela abertura do mercado nacional e pela globalização. Essa pressão externa impulsionou as empresas nacionais a buscar a integração entre todas as etapas do ciclo produtivo, desde o fornecimento de matérias-primas, da produção e da distribuição de produtos usinados.

O impacto dessa pressão, que mudou as relações comerciais e estruturas funcionais e operacionais das empresas do setor produtivo, não teve tanto impacto no setor da construção

civil, já que a indústria da Construção Civil possui barreiras naturais a novos entrantes e se distanciou ao longo dos anos das outras indústrias (VIEIRA, 2006). Pode-se inferir que, como consequência desse fato, a Construção Civil não evoluiu na gestão da produção e ainda trata a cadeia de suprimento de forma dissociada, sem ter uma visão sistêmica que integre todos os processos produtivos à rede de suprimentos, buscando a otimização dos mesmos e a redução de custos logísticos quanto a definição de lotes econômicos de estoque e redução de custos de transporte, quanto a movimentação desses lotes.

Independente disso, a indústria da Construção Civil apresenta diversas características similares que a aproximam da Indústria de Manufatura tradicional. Dentre elas, tem-se:

- Processos sequenciados e definidos;
- Canal de suprimento – produção – distribuição de produtos⁶ sob determinada demanda;
- O desafio de integração da localização da fábrica com os armazéns e com os centros de fornecimento e os mercados de consumo, visando à redução de custos logísticos dentre as diversas funções logísticas e a melhoria dos serviços aos clientes consumidores.
- A busca constante pela otimização de processos e de metodologias e técnicas para quantificar e controlar os recursos necessários tendendo a eliminação de gargalos, desperdícios e folgas inúteis.

1.5.1 Características da Construção Pesada⁷

A Construção Pesada ou de Infraestrutura como também é conhecida é um subsetor da Construção Civil e destaca-se pelo planejamento e construção de grandes obras consideradas pelos especialistas do setor como complexas. Dentre as principais características da Construção Pesada ressalta-se:

- Criação de um produto único: O produto final construído é “personalizado”, cada obra tem suas próprias características;
- O produto final produzido é imóvel: são os processos, mão de obra, matérias-primas e equipamentos que se deslocam ao longo do trabalho, ou seja, a linha de produção é móvel, muda de localização;

⁶ Distribuição de produtos no caso da construção civil refere-se à entrega do lote necessário por período de tempo às diferentes equipes de trabalho atuando na obra. Na análise considera-se os tempos gastos desde a origem de armazenamento até à linha de produção e destes até seu local de consumo.

⁷ Adaptado de Vieira (2006).

- Alta linearidade: são obras predominantemente horizontais, que envolvem a movimentação de materiais em grandes volumes e distâncias;
- Possui atividades repetidas: o mesmo ciclo de produção repete-se a cada quilômetro da construção de uma rodovia, por exemplo;
- Não tem padrão contínuo de procedimentos e responsabilidades;
- Complexidade do sistema produtivo: especificações complexas e muitas vezes confusas, ou genéricas demais, ou ambas;
- Muitos processos artesanais com possibilidades limitadas para automação;
- Interdependência forte entre as fases de construção da obra: as atividades dependem uma das outras para serem executadas;
- Emprego maciço de equipamentos pesados de engenharia: fato que se comprova na própria composição de custos das obras de infraestrutura, onde aproximadamente 70% dos recursos orçados são compostos pela depreciação, manutenção e operação de equipamentos de engenharia.
- A mão de obra não é o principal recurso produtivo e, em geral, tem caráter eventual, é desqualificada e possui alta rotatividade, o que gera baixa motivação para o trabalho;
- Sincronismo: o ciclo de produção depende do sincronismo entre as fontes de fornecimento de materiais e as usinas, e destas às diversas equipes de trabalho na execução das diferentes fases de execução; assim como a sincronização entre os diversos equipamentos dentro da mesma equipe produtiva etc.
- O tempo e custo de produção de uma unidade de produto (quilômetro construído) é elevado;
- A linha de produção é sujeita a intempéries e sofre pela interferência e interveniência entre tarefas: sem padrão contínuo de procedimentos e responsabilidades;
- Grande escala: os serviços executados são em grande escala e, conseqüentemente acontecem grandes momentos de transporte de insumos e de produtos, alguns de pouco valor agregado; assim, é necessário contar com volumosos estoques para suprir a demanda das diferentes frentes de trabalho e diversidades fontes de fornecedores para garantir o suprimento contínuo às equipes de trabalho.
- Montagem de diversas frentes de trabalho: Interferência e interveniência entre tarefas, operações unitárias em paralelo;

1.5.2 Fatores que Afetam o Sucesso dos Projetos

O resultado da pesquisa exploratória junto aos profissionais da área de construção pesada no Brasil, mencionada no item 1.2, assim como a análise feita nos processos do TCU e no relatório do PMI, permitiu elencar uma série de fatores que reforçam a hipótese da complexidade dessas obras e da falta de sucesso. Os fatores identificados podem ser classificados em dois grupos: os que se relacionam à experiência profissional da equipe responsável pelo processo de planejamento e, os relativos à própria obra de construção.

Quanto aos fatores relacionados com a experiência profissional da equipe podem-se citar dentre os mais relevantes os seguintes fatores:

- Falta de uma visão sistêmica sobre o empreendimento, que facilite a identificação de gargalos, principalmente dos operacionais e logísticos;
- Falta de experiência ou excesso de confiança dos profissionais encarregados do planejamento; isso contribui para avaliar as situações segundo as próprias opiniões ou intenções, muitas vezes sem justificativas;
- Ausência de *benchmarking*, de ativos organizacionais ou de lições aprendidas em empreendimentos similares;
- Ausência de gerenciamento de riscos (identificação, plano de respostas e uso de reservas de contingências);
- Ausência de decisões racionais baseados em métodos analíticos, ou seja, tem-se excesso de empirismo, assim, observam-se estimativas baseadas em médias aritméticas ou aproximações; de simplificações de variáveis que afetam prazo e custo e de adoção de premissas sem fundamento;
- Falta de análise de cenários e de análise de sensibilidade das principais variáveis;
- Desconhecimento da disciplina de logística como ciência capaz de fundamentar as decisões do planejador.

Quanto aos fatores relacionados com a própria obra, têm-se os fatores inerentes e os que se derivam deles. Foram identificados os seguintes:

- Dificuldades construtivas dos projetos de infraestrutura de transporte;
- Horizontalidade do projeto (em caso de rodovias e ferrovias) que dependendo de uma série de fatores gera mobilização do canteiro de obra e do acampamento, provocando um intenso fluxo de insumos, materiais, equipamentos e veículos de diversos tipos

para movimentar tudo; que somado ao fluxo diário de abastecimento da obra, cria um impacto muito grande na região de influência e termina conflitando com o fluxo do trânsito local;

- Variabilidade topográfica, geotécnica e climática que condicionam sua execução, agravados pela linearidade da obra (em caso de rodovias e ferrovias);
- Incertezas que surgem ao longo do processo de execução da obra, algumas delas de natureza imprevisível;
- Emprego maciço de máquinas e equipamentos pesados;
- Grandes volumes de insumos envolvidos, o que acarreta dificuldades logísticas de fornecimento, transporte e armazenagem;
- Coordenação entre as atividades de suprimento, execução e cumprimento de prazos;
- Rígidos padrões de qualidade exigidos para aceitação dos serviços;
- Interferências existentes;
- Interesses conflitantes entre as partes interessadas;
- Dificuldade em reduzir os impactos ambientais na região de influência, dentre outros.

Além dos fatores elencados acima se tem os problemas de acompanhamento da obra de infraestrutura de transportes, ou seja, faltam mecanismos de controle e de indicadores em tempo real que detectem de forma imediata qualquer desvio ou alteração do projeto com o planejado e programado quanto a tempo e orçamento.

Dentro do planejamento de uma obra de construção pesada, a programação de atividades é relegada ao segundo plano. As técnicas empregadas na elaboração dos cronogramas não se aplicam corretamente às atividades repetitivas e às obras lineares. Diversas variáveis relevantes são desconsideradas no processo de planejamento, o que prejudica a aderência dos cronogramas projetados a realidade dos canteiros de trabalho.

Há necessidade, portanto, de se desenvolver novas metodologias de programação de atividades e ferramentas que facilitem a tomada de decisão do planejador. Essa metodologia deve lançar mão de ferramentas e processos já consagrados na logística e na engenharia de produção e adaptá-los às especificidades dos projetos de infraestrutura.

1.5.3 Uma Nova Abordagem para o Problema de Planejamento e Gerenciamento de Obras de Infraestrutura de Transportes: Ruptura de Paradigmas

Sob a ótica sistêmica, uma obra de construção civil é um processo construtivo (produtivo) encadeado que tem como produto final um edifício, uma rodovia, uma ponte etc. No entanto, a atual abordagem para o planejamento de obras de construção de infraestruturas de transportes focadas nos mesmos métodos de estudo, planejamento e gerenciamento tradicionalmente empregados nas obras de edificação, sem a devida coordenação e integração de todos os processos logísticos e produtivos envolvidos, desde sua fase de planejamento até sua execução final, está colocando em xeque o sucesso desses projetos, a falta de confiabilidade nas empreiteiras e no cumprimento dos planos de desenvolvimento e crescimento da infraestrutura de transportes do país.

O sucesso da realização do projeto construtivo consiste em poder integrar o planejamento de entrega das fontes de suprimentos ao plano de execução da obra de forma a reduzir as incertezas, quanto à falta de estoque ou o acúmulo desnecessário destes em períodos de tempo que não serão utilizados, assim como definir a frota adequada que manterá esse suprimento contínuo as linhas de produção e/ou frentes de trabalho da obra ao mínimo custo.

A integração e coordenação dessas duas ações demanda como etapa essencial a modelagem de três sistemas: o sistema logístico de fornecimento externo de produtos às áreas de armazenamento das usinas e canteiros de obra (cadeia de suprimento); o sistema logístico interno de fornecimento às usinas e destes às diferentes frentes de trabalho (cadeia de produção) e; o sistema logístico interno de suprimento aos canteiros de obra e deste às frentes de trabalho (cadeia de distribuição), tal como se mostra na Figura 1-2.

Vale ressaltar que o desempenho dos sistemas logísticos de uma empresa, além de depender das suas principais funções, como estoque e transporte, também é função do desempenho dos diversos sistemas produtivos que interagem com ele. Portanto não é possível, somente focar na otimização dos sistemas logísticos, sabendo que estes dependem da forma em que os sistemas produtivos operam na produção do produto final.

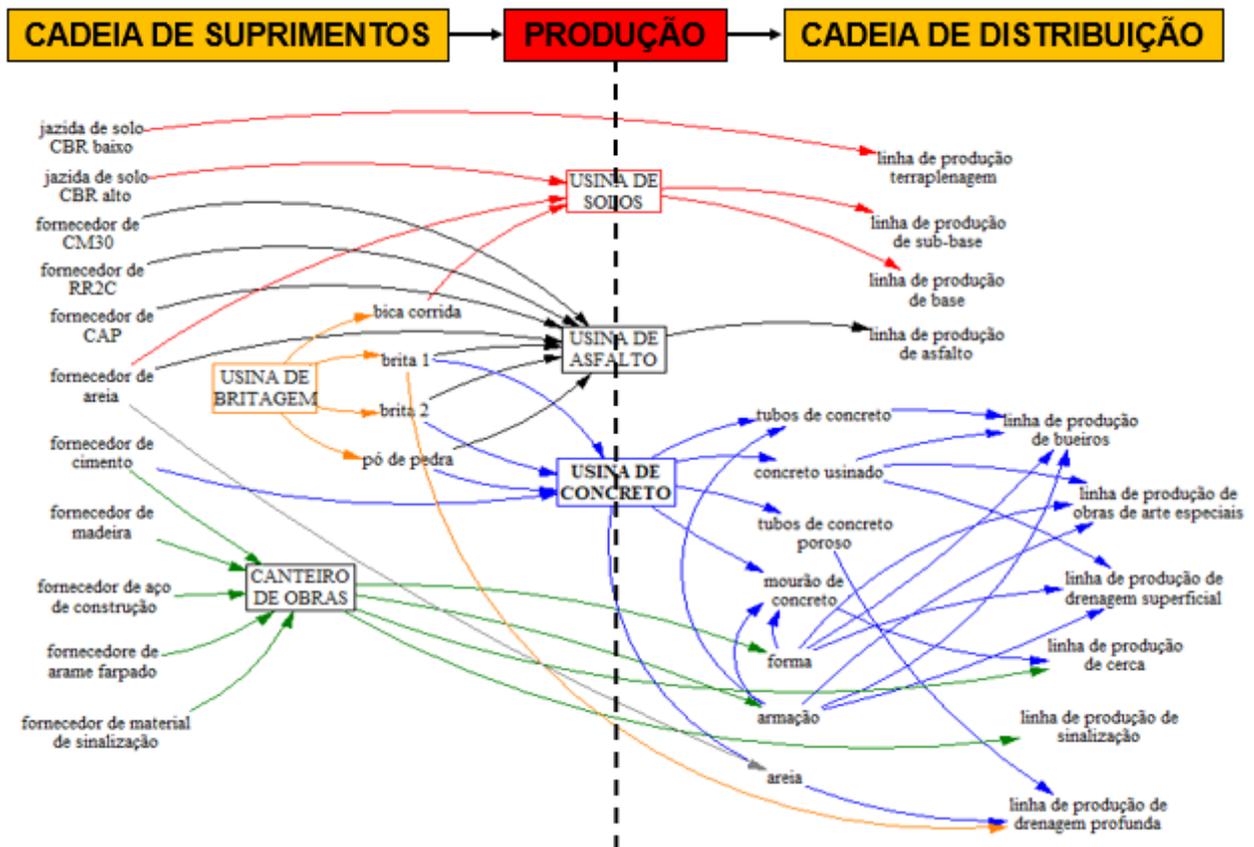


Figura 1-2 - Cadeia logística obras rodoviárias

Por exemplo, a integração e coordenação dos diversos processos logísticos e produtivos de uma obra de infraestrutura de transportes são essenciais para seu sucesso, já que o processo decisório depende de decisões encadeadas entre logística e produção, como é o caso das seguintes decisões:

- A localização e análise da capacidade de abastecimento das fontes de materiais e insumos até às áreas de armazenamentos das usinas e canteiros de obras está em função da localização das usinas e canteiros de obras, assim como da sua capacidade de produção;
- O dimensionamento e localização das usinas e canteiros de obras é função do tamanho da obra, metodologia de trabalho e prazo final de entrega da obra;
- A definição da produtividade das unidades e equipes de trabalho, assim como, a escolha dos equipamentos de trabalho e de transporte é função da capacidade de suprimento das usinas e dos canteiros de obras;
- A seleção da metodologia de trabalho que, em geral, é função da dimensão da obra da infraestrutura que será construída, influencia nos processos logísticos e produtivos;

- A definição do prazo de entrega final da obra de infraestrutura determina o avanço programado por dia, que depende da função de desempenho dos processos logísticos e produtivos etc.

A rigor, conclui-se que é difícil modelar e otimizar o sistema logístico de uma obra de infraestrutura de transportes deixando de lado o sistema produtivo tal como hoje é concebido e abordado. É impossível separar ambos sistemas quando se tem como propósito a fluidez do processo construtivo ao longo das diversas fases que contempla a construção de uma rodovia. Como já foi comentado anteriormente, a definição de políticas de estoque, de transporte e de localização de unidades produtivas é importante para o cumprimento das metas produtivas, principalmente quando essas etapas são encadeadas e contínuas e lidam com a variabilidade.

O principal interesse da pesquisa proposta seria otimizar todos os processos de forma integrada de forma a reduzir os custos logísticos dos diferentes sistemas modelados, assim, a abrangência do tema proposto nos conduz a adoção de uma abordagem sistêmica, que segundo Neumann e Scalice (2015) é uma metodologia que busca conjugar conceitos de diversas áreas a respeito de um determinado objeto de pesquisa.

Conforme apresentado anteriormente, observa-se a premência de outros conhecimentos para permitir uma abordagem diferenciada a fim de diminuir as incertezas (riscos) que uma obra de infraestrutura de transportes está exposta ao longo de seu ciclo de construção (produção). Para tanto, será necessário aprofundar o estudo da Logística para desenvolver um novo campo de pesquisa que poderá ser denominado “LOGÍSTICA NA CONSTRUÇÃO DE OBRAS DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES”.

O desafio, portanto, será trazer essa fundamentação teórica não somente da Logística, mas da Administração da Produção, do Gerenciamento de Projetos, dos Sistemas de Informações Geográficas, e da Pesquisa Operacional de forma a agregar valor ao processo de tomada de decisão necessário ao planejamento do tempo de uma obra de infraestrutura de transporte.

1.6 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Como integrar os processos logísticos aos processos produtivos de uma obra de construção de rodovia de forma que subsidie aos gestores e engenheiros quanto à tomada de decisão mais

eficiente e eficaz e que lhes permita obter sucesso no planejamento e execução de um projeto rodoviário, cumprindo com as metas produtivas e os prazos de entregas ao mínimo custo?

1.7 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é elaborar, implementar e testar uma metodologia para o planejamento logístico de projetos de infraestrutura de transportes integrada ao plano de execução da obra, capaz de alcançar uma maior assertividade e segurança na tomada de decisão.

Objetivos Específicos:

- Modelar a rede logística de forma dinâmica, no tempo e no espaço em função da localização dos canteiros, usinas, fontes de abastecimento e dimensionamento do projeto; e integrada à rede logística externa;
- Elaborar um modelo de simulação para o planejamento de obras; e
- Testar o modelo proposto por meio de um estudo de caso.

1.8 JUSTIFICATIVA

Espera-se que a adoção dessa nova metodologia resgate a confiabilidade nos projetos de infraestrutura de transportes e traga ganhos competitivos tanto nas empreiteiras que a utilizem como nas regiões onde estas obras serão construídas.

Essa pesquisa é relevante dentro do contexto da logística, que tem o transporte como uma de suas principais funções, desde duas visões distintas:

- Toda infraestrutura de transporte que é construída e concluída com sucesso passa a formar um arco da rede logística regional ou nacional, trazendo ganhos competitivos à região em particular e ao país como um todo, já que aumenta as alternativas de transporte.
- A infraestrutura de transporte como um dos principais componentes do Sistema de Transporte é fundamental para o desempenho dos veículos que sobre ela transitarão independente se forem veículos de transporte de carga ou de passageiros. O importante é prover um nível de serviço adequado às demandas por transporte com segurança, conforto, confiabilidade e ao mínimo custo de operação.

O transporte tanto de passageiros quanto de cargas é uma demanda derivada das atividades econômicas e sociais de uma região. Ambos influenciam a qualidade de vida das pessoas. O deslocamento de pessoas é um serviço vital de transporte, principalmente nas áreas urbanas. Mais de 50% das viagens em centros urbanos são viagens de trabalho. A habilidade das pessoas em se deslocarem e de se integrarem umas às outras reflete diretamente na percepção que elas têm de sua qualidade de vida.

O transporte de cargas por sua vez é importante para o desenvolvimento econômico da sociedade pois sua eficiência ao distribuir mercadorias reduz custos finais de bens e serviços, viabilizando mercados e empresas e, dessa forma, também interfere, só que indiretamente, no bem-estar social e na qualidade de vidas das pessoas. A rigor, fica evidente que o transporte está fortemente ligado aos conceitos de utilidade de lugar e de tempo (HAY, 1998).

Assim, um produto pode ter um elevado valor de mercado, mas só terá utilidade se for entregue no local desejado, na quantidade necessária e dentro de um intervalo de tempo oportuno. Esse autor define sistema como o conjunto de partes ou elementos que são utilizados para um propósito comum e que estão tão inter-relacionados que a mudança de um dos seus componentes causa efeito nos outros. Esta definição pode ser facilmente extrapolada ao conceito de sistemas de transportes.

O sistema de transportes compreende, então, todas as linhas e os serviços de transporte disponíveis numa região. O objetivo de um sistema de transportes é atender às demandas específicas dentro de um nível de serviço e de qualidade adequado e respeitando o limite de recursos possível. O nível de serviço relaciona a capacidade, a frequência e a acessibilidade do serviço de transporte. Já a qualidade do serviço de transporte inclui sua segurança, confiabilidade, comodidade, conveniência e efeitos adversos mínimos ao meio ambiente, tudo a um custo razoável.

Segundo Hay (1998), um sistema de transporte é composto por cinco componentes principais: veículos, força motriz, sistema de vias, terminais e sistema de controle. Esses componentes se combinam para produzir serviço e utilidade, de acordo com a disponibilidade de capital. A Figura 1-3 apresenta o sistema de Demanda de Tecnologia em Transportes, conforme proposto pelo autor. Nela observa-se que o sistema de vias é composto pelo projeto

geométrico das vias, que define seu traçado e capacidade e pela localização das rotas, que procura identificar a necessidade de viagens, respeitando as características físicas do terreno.

Então, conclui-se que a expansão da infraestrutura de transportes, ou seja, do sistema de vias existentes, é condição necessária para que o sistema de transporte atenda às demandas específicas de transporte da sociedade com o nível de serviço e a qualidade adequada. Portanto, é fácil perceber que a evolução do alcance e da eficiência desse sistema de transportes, formado por uma rede de estradas, canais de navegação, ferrovias, rotas aéreas etc. é condição necessária ao desenvolvimento econômico da sociedade.

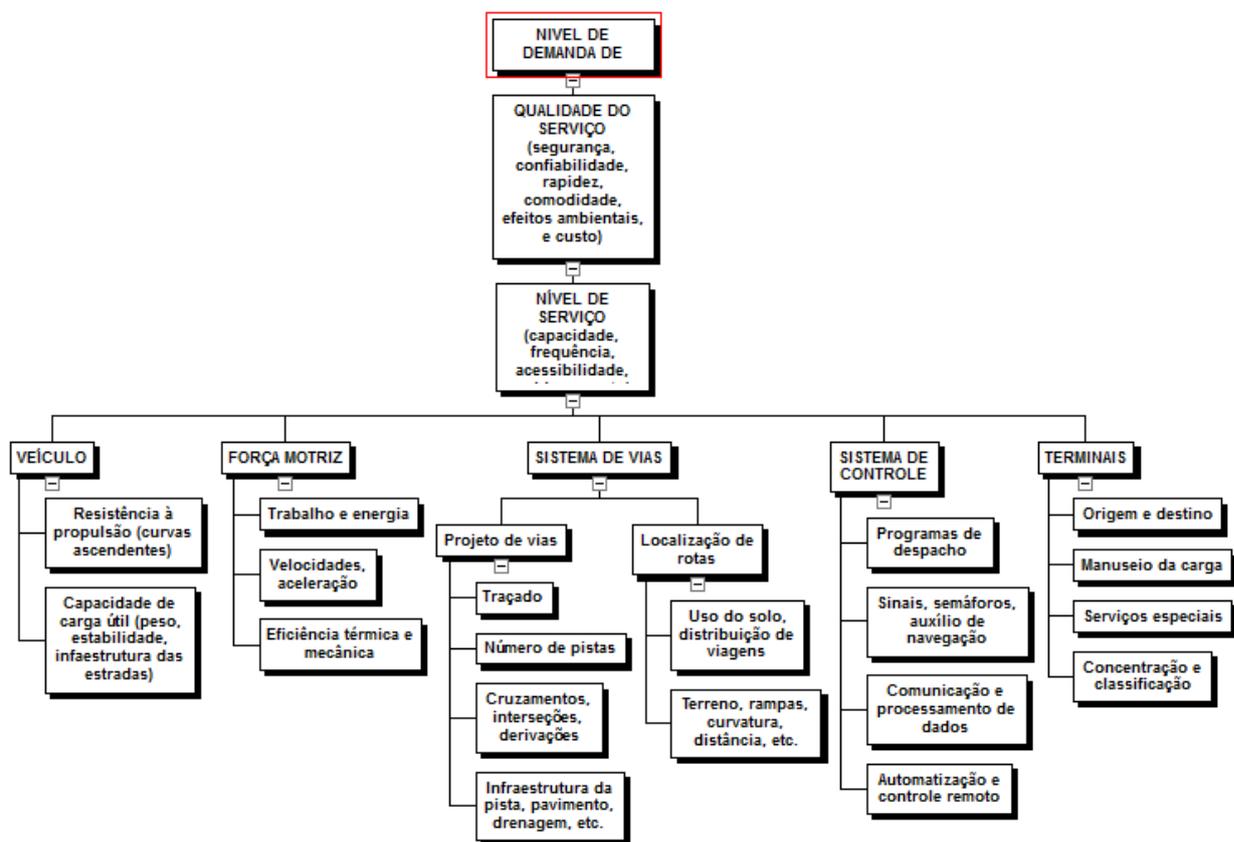


Figura 1-3 - Sistema de demanda de tecnologia de transportes

Fonte: Adaptado de Hay (1998)

Adotando-se como verdadeira a premissa de que os recursos financeiros são sempre escassos e que, portanto, devem ser priorizados, uma vez tomada a decisão de investimento na construção de uma via de transporte, a obra de engenharia que a viabiliza deve ter sucesso, ou seja, atingir o prazo, o custo e a qualidade previstos.

A falta de um arco dessa rede ou a ausência do mesmo por não ter sido concluído, independentemente do modo de transporte, restringe o desenvolvimento de uma região e imobiliza todo o montante do capital investido; já que os benefícios advindos de uma obra de infraestrutura (redução dos tempos de viagens e dos acidentes e aumento do conforto dos usuários) só se solidificam com a conclusão total da obra. A conclusão, com sucesso, das obras de infraestrutura, portanto, está diretamente relacionada à qualidade de vidas das pessoas e ao desenvolvimento econômico dos países.

Além da importância relacionada aos aspectos econômicos e sociais, a construção civil também impacta o meio ambiente. A obtenção e utilização de recursos naturais em larga escala, quanto a produção de quantidade considerável de entulhos de obra, ou ainda a modificação e uso do espaço urbano elevam o setor da construção à categoria de importante gerador de impactos ambientais. Com isso, qualquer tipo de estudo que avalie ou quantifique perdas ou consumo de materiais nos canteiros de obras torna-se relevante ambiental e economicamente.

Diversas pesquisas e publicações especializadas voltadas para a construção civil no Brasil e no exterior têm demonstrado o esforço do setor em busca de soluções para problemas que envolvem projetos e sistemas construtivos. Tais esforços são aplicados em torno de melhoria da qualidade e valorização dos projetos de engenharia, sistemas de racionalização na construção, coordenação de projetos e gestão interna das empresas. Porém, o foco dessas pesquisas tem sido o subsetor da construção de edificações, seus processos produtivos e novos equipamentos; pouca atenção tem sido dada à construção pesada.

1.9 CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA

A contribuição esperada por essa pesquisa é de focar na resposta às questões levantadas na caracterização do problema e se concentrar na fase de planejamento para dar um tratamento científico ao problema em questão. Assim, acredita-se que a pesquisa será importante tanto para o Governo, quanto para as empresas construtoras e para o meio acadêmico.

Para o Governo permitirá que sejam realizados editais de licitação de obras públicas com preços e prazos de referência mais realistas e, portanto, que permitam a fiscalização mais efetiva e que reúnam maiores chances de sucesso.

Para as construtoras haverá uma redução de incertezas inerentes aos erros de planejamento, o que poderá torná-las mais competitivas.

E à Academia ao abrir um novo campo de aplicação aos conceitos e ferramentas já conhecidos de logística e uma nova fronteira de pesquisa para o desenvolvimento de novas teorias e ferramentas úteis ao planejamento de projetos num importante setor da economia, carente de desenvolvimento tecnológico – o subsetor da construção pesada.

1.10 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

O caso abordado nessa pesquisa será o de uma rodovia, que apresenta uma complexidade inerente em tudo seu processo de construção. Devido a esse problema e abrangência do tema, quanto a montagem das bases de dados necessários para alimentar o processo de planejamento logístico-produtivo e ao aprendizado necessário das técnicas de otimização e simulação, essa pesquisa focará apenas aspectos relevantes ao planejamento de tempo do empreendimento. O orçamento será abordado de forma superficial, restrito à Função Objetivo para decisão de localização de instalações e seleção de fornecedores.

1.11 PROPOSTA METODOLÓGICA

A fim de atingir os objetivos estipulados para a tese propôs-se uma metodologia dividida em três etapas complementares: a etapa de preparação, a etapa de desenvolvimento e a etapa de validação através de um estudo de caso. A Figura 1-4 apresenta a visão esquemática resumida da metodologia proposta:

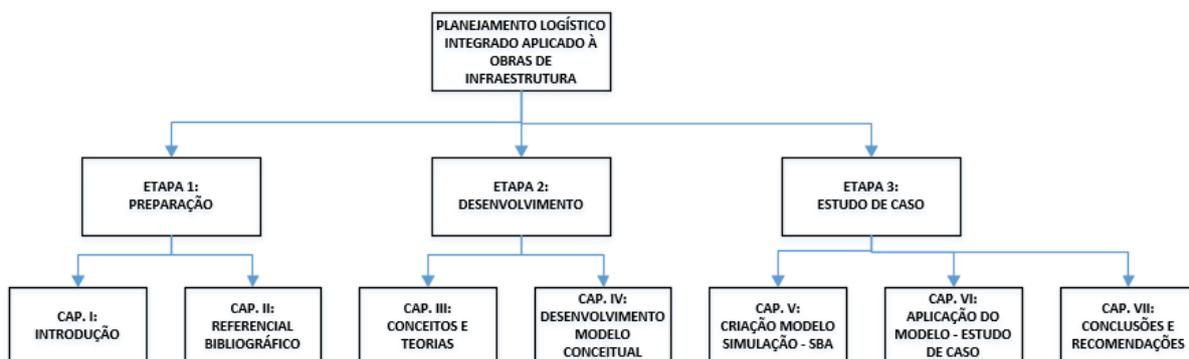


Figura 1-4 - EAP Metodologia da tese

A metodologia ora exposta será abordada de forma mais detalhada no decorrer do trabalho, principalmente no Capítulo 4 - Desenvolvimento de um Modelo Conceitual para o Planejamento Logístico Integrado.

No CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO o problema em estudo é caracterizado e delimitado, são formulados os objetivos e apresentada a metodologia da pesquisa.

No CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO é apresentada a Revisão Sistemática da Literatura, são descritas técnicas que compõem o estado da arte da programação de atividades e apresentada a metodologia tradicional de planejamento de tempo na construção civil.

O CAPÍTULO 3 – CONCEITOS E TEORIAS PARA O PLANEJAMENTO LOGÍSTICO DE PROJETOS DE INFRAESTRUTURA trata da importância da cadeia de suprimento no domínio da construção civil e seu reflexo no planejamento do tempo. Também são apresentadas as diversas decisões envolvidas no processo de programação de atividades; e por último é apresentado o conceito de sistemas multiagentes (SMA).

No CAPÍTULO 4 – DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO CONCEITUAL PARA O PLANEJAMENTO LOGÍSTICO INTEGRADO são apresentados os principais serviços de engenharia que compõem uma obra rodoviária e detalhado o novo modelo proposto para a programação de projeto de infraestrutura.

No CAPÍTULO 5 – CRIAÇÃO DE UM MODELO DE SIMULAÇÃO A PARTIR DA SIMULAÇÃO BASEADA EM AGENTES são descritos os agentes que compõem o modelo de simulação, detalhados seus estados e sua comunicação.

No CAPÍTULO 6 – APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO ATRAVÉS DE UM ESTUDO DE CASO é apresentada a obra de implantação da BR-163, descrita a preparação dos dados a partir do projeto de engenharia, e a aplicação da metodologia proposta no Capítulo 4.

No CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES são apresentadas as conclusões sobre os resultados obtidos e sua aderência aos objetivos propostos na pesquisa. Também são propostas sugestões para continuação dos estudos sobre o tema.

2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

O levantamento do referencial bibliográfico no presente trabalho teve por objetivo identificar as fronteiras do conhecimento e as lacunas das pesquisas realizadas no Brasil e em outros países acerca do tema escolhido e, proporcionar *insight* sobre as ferramentas já utilizadas para o planejamento logístico e planejamento do tempo em projetos de construção pesada, a fim de que se possa avaliar seus resultados e propor uma nova metodologia capaz de agregar essas experiências passadas e adaptá-las ao planejamento de projetos de construção pesada. Para tanto, optou-se por dividir a pesquisa em duas frentes: inicialmente no banco de dissertações e teses da Universidade de Brasília e a seguir ampliou-se a pesquisa para as plataformas científicas existentes de bancos de dados.

2.1 A REVISÃO DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA NO ACERVO DA UNB

Nos acervos da UnB foram consultadas três fontes de dados, os sites www.unb.br/teses-dissertacoes e <http://repositório.unb.br/faculdadetecnologia> e, o arquivo da biblioteca do Centro Interdisciplinar de Estudos em Transportes – CEFTRU. Dos três acervos não foi possível encontrar nada relacionado ao tema de pesquisa proposto nesse trabalho que pudesse contribuir com o estado da arte. De todas as pesquisas consultadas apenas duas foram selecionadas como de interesse: uma sobre a influência do planejamento e controle de obras nos horizontes de médio e curto prazos e outra sobre a proposição de diretrizes focadas na gestão para melhorias do controle de prazo de construção. Ambas, porém, relacionadas às obras de edificações.

2.2 A REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA NOS MOTORES DE PESQUISA

A Revisão Sistemática da Literatura é uma metodologia rigorosa, usualmente adotada na área da saúde, que tem como propósito identificar os estudos sobre um tema em questão (DE LA TORRE-UGARTE-GUANILO ET AL., 2011). Difere das tradicionais revisões narrativas por adotar um processo replicável, científico e transparente, que garante rigor, integridade e qualidade dos resultados, proporcionando um caminho passível de auditoria sobre as decisões dos autores, os procedimentos adotados e as conclusões obtidas (TRANFIELD ET AL., 2003).

A metodologia proposta na RSL é a sequência de seis passos de pesquisa (SONI & KODALI, 2011):

- Passo 1: definição do problema de pesquisa claro, objetivo e conciso;
- Passo 2: definição da estratégia de pesquisa, mediante a escolha das bases de dados, do período de pesquisa e dos termos de busca;
- Passo 3: definição de critérios para inclusão ou exclusão de trabalhos;
- Passo 4: seleção dos artigos, conforme a estratégia de pesquisa (Passo 2) e critérios de inclusão e exclusão (Passo 3);
- Passo 5: análise dos artigos selecionados; e
- Passo 6: apresentação dos resultados.

A Tabela 2-1 apresenta a descrição dos procedimentos e as finalidades para cada passo da metodologia de RSL, aplicados ao problema de pesquisa em estudo. Como pode ser observado, a pesquisa foi estruturada em três grupos, sendo o grupo A relacionado ao termo equivalente a programação de obras de construção civil e os grupos B e C relacionados a temas de logística e administração da produção, respectivamente. Os três grupos, por sua vez, foram divididos em 20 termos de busca ligados por operador booleano do tipo “and”.

2.3 RESULTADO DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

A seguir serão sumarizados os 19 artigos selecionados ao final dos cinco passos iniciais da metodologia de RSL e que tratam diretamente da construção pesada, mas sob diferentes enfoques e com o emprego de diversas ferramentas. Visando facilitar o entendimento, os artigos foram separados em três temas relevantes, que são:

- Critical Path Method - CPM e Program Evaluation and Review Technique - PERT;
- Linear Projects e Repetitive Projects; e
- Técnicas de programação.

A Tabela 2-2 apresenta a relação dos estudos identificados após o “Passo 2”, totalizando 5.984 resultados. Na primeira coluna estão apresentados os termos de busca utilizados na pesquisa, organizados nos três grupos supracitados. Na segunda coluna estão apresentadas as bases de dados em que foram efetuadas as buscas: *Science Direct*, *Capes/MEC* e *Scopus*. Na terceira coluna estão apresentados os de resultados, por grupo de termos de buscas, e os percentuais na última coluna.

Tabela 2-1 - Seis Passos da Revisão Sistemática da Literatura

PASSO	DESCRIÇÃO	FINALIDADE
1. Definição do problema de pesquisa	a. PROBLEMA DE PESQUISA: Qual o panorama internacional sobre emprego de ferramentas e conceitos de logística e de administração da produção no planejamento de tempo em projetos de construção civil?	Ampliar o conhecimento relacionado ao emprego de logística e de administração da produção no planejamento de tempo de projetos de construção civil.
2. Definição da estratégia de pesquisa	a. Horizonte de tempo: de 1960 a 2015	Abranger o período entre as primeiras publicações sobre "Critical Path Method - CPM", que revolucionou o planejamento de tempo em projetos. O CPM é atribuído à James Kelley Jr., da Remington Rand, e Morgan Walker, da Dupont de Nemours, em 1957.
	b. Bases de Pesquisas: Google Scholar, Capes e Scopus.	
	c. Identificação de Estudos: Busca de trabalhos publicados com termos clássicos sobre o tema (no título, palavras chave e resumo) por meio de 03 grupos e 20 combinações de termos de busca.	
	- Grupo A: publicações relacionadas ao planejamento de tempo em projetos de construção [termos de busca - 1. "Construction Project Scheduling" e 2. "Civil Construction Project Scheduling"].	Identificar publicações relacionadas ao planejamento de tempo em projetos de construção mediante 02 termos clássicos sobre o tema.
	- Grupo B: publicações relacionadas ao planejamento de tempo em projetos de construção e Logística [termos de busca - 3. "Construction Project Scheduling and Logistics" e 4. "Civil Construction Project Scheduling and logistics"].	Identificar publicações relacionadas ao planejamento de tempo em projetos de construção e logística, usando o operador boleano de inclusão "and".
- Grupo C: publicações relacionadas ao planejamento de tempo em projetos de construção e Planejamento e Controle de Produção e Operações [termos de busca - 5. "Construction Project Scheduling and Production Scheduling"; 6. "Civil Construction Project Scheduling and Production Scheduling"; 7. "Construction Project Scheduling and Production Planning"; 8. "Civil Construction Project Scheduling and Production Planning"; 9. "Construction Project Scheduling and Just in Time"; 10. "Civil Construction Project Scheduling and Just in Time"; 11. "Construction Project Scheduling and MRP"; 12. "Civil Construction Project Scheduling and MRP"; 13. "Construction Project Scheduling and Shop Floor Control"; 14. "Civil Construction Project Scheduling and Shop Floor Control"; 15. "Construction Project Scheduling and Lean Production"; 16. "Civil Construction Project Scheduling and Lean Production"; 17. "Construction Project Scheduling and Lean Construction"; 18. "Civil Construction Project Scheduling and Lean Construction"; 19. "Construction Project Scheduling and Optimized Production Technology"; 20. "Civil Construction Project Scheduling and Optimized Production Technology"].	Identificar publicações relacionadas ao planejamento de tempo em projetos de construção e Planejamento e Controle de Produção e Operações mediante a combinação dos 02 termos do primeiro com 08 termos relacionados ao segundo, usando o operador boleano de inclusão "and".	
3. Definição de critérios para inclusão e	a. Critérios de inclusão: - Todos os artigos científicos que atendam aos Grupos B e C.	Identificar estudos que abordem simultaneamente aplicações do planejamento de tempo com a logística e planejamento de produção.

PASSO	DESCRIÇÃO	FINALIDADE
exclusão de trabalhos	b. Critérios de exclusão: - Todos os trabalhos que não sejam artigos científicos; e - Todos os resultados repetidos.	Limpeza da base de dados.
4. Seleção dos artigos	a. Critérios de seleção: - Artigos que atendam totalmente os objetivos do trabalho.	Selecionar artigos que abordem simultaneamente aplicações do planejamento de tempo com a logística e planejamento de produção.
5. Análise dos artigos selecionados	a. Elementos para análise: - Artigos publicados por revista; - Evolução das publicações por ano; - Distribuição e evolução das publicações por país.	Ampliar o conhecimento relacionado ao emprego de logística e de administração da produção no planejamento de tempo de projetos de construção civil mediante análise da produção científica internacional.
6. Apresentação dos resultados	Elaboração de texto científico.	Apresentar os resultados, destacando as lacunas e oportunidade de novas pesquisas.

Tabela 2-2 - Relação dos Estudos Identificados

GPT	TERMOS DE BUSCA	BASE DE DADOS			TOTAL	%
		Science Direct	Capes/ MEC	Scopus		
A	1. Construction Project Scheduling	47	1.848	1.435	4.488	75,00
	2. Civil Construction Project Scheduling	8	947	203		
B	3. Construction Project Scheduling and Logistics	9	30	22	77	1,29
	4. Civil Construction Project Scheduling and Logistics	-	14	2		
C	5. Construction Project Scheduling and Production Scheduling	49	179	165	1.419	23,71
	6. Civil Construction Project Scheduling and Production Scheduling	1	67	17		
	7. Construction Project Scheduling and Production Planning	22	119	68		
	8. Civil Construction Project Scheduling and Production Planning	-	33	11		
	9. Construction Project Scheduling and Just in Time	1	10	15		
	10. Civil Construction Project Scheduling and JIT	-	10	1		
	11. Construction Project Scheduling and Material Requirement Planning - MRP	-	135	7		
	12. Civil Construction Project Scheduling and Material Requirement Planning - MRP	-	16	1		
	13. Construction Project Scheduling and Shop Floor Control	-	2	-		
	14. Civil Construction Project Scheduling and Shop Floor Control	-	177	-		
	15. Construction Project Scheduling and Lean Production	3	17	11		
	16. Civil Construction Project Scheduling and Lean Production	-	9	1		
	17. Construction Project Scheduling and Lean Construction	3	38	23		
	18. Civil Construction Project Scheduling and Lean Construction	-	23	4		
	19. Construction Project Scheduling and Optimized Production Technology	2	16	-		
	20. Civil Construction Project Scheduling and Optimized Production Technology	-	163	-		
TOTAL =		145	3.853	1.986	5.984	100,00

Dos 5.984 trabalhos científicos identificados, 1.496, ou seja, 25% dos resultados referem-se à produção científica elaborada a partir da interseção entre o planejamento do tempo de projetos de construção civil e a logística ou a administração da produção (Grupos B e C), áreas de interesse da pesquisa.

Ao aplicar os critérios de seleção estipulados nos passos 3 e 4 apresentados na Tabela 2-1, dos 1.496 artigos foram selecionados inicialmente 87 artigos, que representam 5,82% das publicações selecionadas nos passos 3 e 4 e apenas 1,45% do total de publicações

identificadas no passo 2. Essa seleção preocupou-se em excluir as publicações que não eram artigos científicos, repetidos ou fora do contexto da pesquisa.

O Anexo A apresenta a lista de artigos selecionados com o título, o assunto, a área de aplicação, a ferramenta utilizada para a solução do problema de pesquisa, além dos dados da publicação, tais como periódico, ano, autor e país do autor. Os 19 artigos com os números hachurados são aqueles considerados de fato úteis a essa pesquisa.

O Anexo B ordena os 87 artigos selecionados por periódico e por ano de publicação. Essa tabela tem dois objetivos principais: classificar os periódicos por relevância em relação ao objeto de pesquisa e identificar se a pesquisa ainda é atual a partir da análise da distribuição das publicações ao longo dos anos. Já o Anexo C apresenta a relação de artigos classificados pelo país de origem do primeiro autor, por ano. Desta vez, o objetivo é identificar em que países o tema é considerado relevante e quais os principais autores.

Em resumo, os anexos A, B e C apresentam a relação dos artigos selecionados, a relação de artigos publicados por ano e a relação dos artigos publicados por país (primeiro autor) / por ano, respectivamente. Convém destacar que a grande parte dos artigos selecionados se refere ao setor da construção civil, ou de forma geral ou especificamente ao subsetor de edificações. Se fosse estabelecido como critério de seleção extrair da amostra apenas os artigos relacionados ao subsetor da construção pesada (que objetiva a construção de infraestrutura de transportes, energia, telecomunicações e saneamento) a amostra ficaria reduzida significativamente.

Dentre as diversas conclusões possíveis a partir da análise das tabelas supracitadas, pode-se citar as seguintes:

- Os bancos de dados pesquisados apresentam elevado índice de repetição;
- Menos de 6% do total de trabalhos científicos são relacionados a aspectos do planejamento da construção civil a partir da logística e da administração da produção;
- Apenas 19 artigos selecionados (1,3% dos 1.496 relacionados simultaneamente a logística e administração de produção aplicados na construção civil) apresentam aplicações dos temas pesquisados especificamente na Construção Pesada. Este fato confirma a hipótese inicial de que o subsetor da construção civil carece de novas pesquisas;

- Três periódicos publicaram nas últimas 03 décadas, praticamente a metade dos 87 artigos selecionados sobre os temas em estudo: o *Journal of Construction Engineering and Management* (25 artigos / 28,7%), o *Automation in Construction* (8 artigos / 9,2%), e o *European Journal of Operation Reseach* (também 8 artigos / 9,2%);
- Dentre os artigos selecionados, 30 (34,5%) possuem autores americanos e 07 (8,1%) são chineses, que somados representam quase a metade das publicações;
- Os artigos selecionados foram publicados entre 1984 e 2015, sendo que aproximadamente 50% foram publicados nos últimos 10 anos, o que mostra que o tema é atual e o interesse da comunidade científica pelo tema é crescente;
- Os 87 artigos foram publicados por 80 autores diferentes. Os autores com maior número de publicações foram o chinês Rong-yau Huang, com três publicações; e os americanos Greg Duffy e David Arditi, ambos com 2 publicações. Enquanto o chinês direcionou seu esforço no emprego de algoritmos na programação de atividades repetitivas nos “*Repetitive Constructions Projects*”; os americanos dedicaram-se ao tema “*Linear Projects Scheduling*”.
- Nenhum artigo selecionado foi publicado por autor brasileiro.

Desse modo, o emprego da metodologia de Revisão Sistemática da Literatura mostrou-se útil ao objetivo proposto de ampliar o conhecimento relacionado ao emprego de logística e de administração da produção no planejamento do tempo de projetos de construção civil. A pesquisa mostrou a carência de estudos relacionados nessa área, principalmente no subsetor da construção pesada, o que justifica o desejo e a necessidade de se aprofundar nesse tema.

2.4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS (ESTADO DA ARTE)

A seguir serão sumarizados os 19 artigos selecionados ao final dos cinco passos iniciais da metodologia de RSL e que tratam diretamente da construção pesada, mas sob diferentes enfoques e com o emprego de diversas ferramentas. Visando facilitar o entendimento, os artigos foram separados em três temas relevantes, que são:

- Critical Path Method - CPM e Program Evaluation and Review Technique - PERT⁸;
- Linear Projects e Repetitive Projects⁹; e

⁸ O método CPM / PERT é a principal ferramenta de programação de projetos em geral. Seu emprego remonta da década de 1960 e deu início a ciência da programação de atividades em ambientes de projetos. Mesmo sendo amplamente empregado até hoje, sempre suscitou críticas do meio acadêmico e, com menos ênfase, do meio profissional.

- Técnicas de programação¹⁰.

2.4.1 Emprego do “Critical Path Method” – CPM e “Program Evaluation and Review Technique” – PERT na Programação de Atividades¹¹

O CPM e o PERT foram criados em 1957 e 1958, respectivamente. O CPM, desenvolvido para ser empregado na reconstrução de instalações fabris pela DuPont, organiza as atividades em redes de precedência e examina as folgas para a determinação de um caminho crítico. Este caminho crítico definirá a duração total do projeto. Já o PERT foi criado pelo Escritório de Projetos Especiais do Departamento da Marinha dos Estados Unidos da América como parte do desenvolvimento do projeto do míssil Polaris, lançado de submarino nuclear.

Este projeto envolveu 250 empreiteiros, cerca de 9.000 subempreiteiros e a fabricação de 70.000 componentes, muitos dos quais nunca antes fabricados (LIMMER, 2013). O PERT apresenta uma visão probabilística para o cálculo da duração de projetos. No decorrer dos anos os métodos se fundiram numa única técnica de programação de atividades.

Segundo Jaafari (1984), diversas publicações apresentaram argumentos contrários ao emprego do CPM / PERT na programação de atividades em projetos de construção:

- O CPM não foi desenvolvido para satisfazer as necessidades de planejamento em projetos de construção (ARDITI, 1983; BIRREL, 1980);
- Os pressupostos básicos de atividades de projeto com tempo fixo e natureza discreta não são realistas, especialmente quando as unidades repetitivas ou projetos lineares devem ser construídos (ARDITI, 1983; JONHSTON, 1981; PEER, 1974);
- O Planejamento da construção envolve essencialmente dar atenção igual a todas as atividades, de modo que a maioria delas sejam críticas, e não apenas determinar um único caminho crítico (ARDITI, 1983; PEER, 1974; SALINGER, 1980);

⁹ Os projetos lineares e repetitivos apresentam características que os diferenciam dos demais projetos, com reflexos na programação de suas atividades. Os projetos de infraestrutura, objetos desta tese, são projetos lineares, e, portanto, convém identificar suas características e formas de programação.

¹⁰ A revisão do estado da arte revelou diferentes técnicas de programação que podem substituir ou complementar o PERT / CPM na programação de projetos. A busca por uma nova metodologia de planejamento do tempo em projetos de construção pesada depende, portanto, da seleção de uma técnica apropriada de programação e sequenciamento das atividades.

¹¹ Foram citados como referências os artigos mais tradicionais e consagrados relativos ao método PERT/CPM. A pesquisa realizada demonstrou que nas últimas décadas não houve contribuição significativa com relação a essa metodologia.

- A alocação de recursos, nivelando as atividades é incapaz de assegurar a plena continuidade para uma equipe de produção ou processo que talvez seja a espinha dorsal do planejamento operacional nos processos de construção, especialmente em casos repetitivos (ARDITI, 1983; JONHSTON, 1981; PEER, 1974);
- O agendamento pelo CPM é trabalhoso. Os relatórios de status levam tempo para chegar a gestores e tomadores de decisão, e, no momento em que estes recebem essas informações, tendem a estar desatualizadas (BARNES, 1977; GILBERT, 1983; GOUGH-PALMER, 1983; POPESCU, 1979);
- Integração na prática do controle do progresso e do custo baseado em CPM tem sido extremamente difícil, caro e improdutivo (BARNES, 1977; GOUGH-PALMER, 1983; POPESCU, 1979).

A literatura sobre o gerenciamento de projetos únicos apresenta também, várias críticas ao PERT / CPM, tais como:

- Não oferecem datas de conclusão praticáveis, pelo fato de subestimar sistematicamente os orçamentos e por utilizar recursos ineficazmente (KLINGEL, 1966; BADIRU, 1993; MEREDITH & MANTEL, 2003);
- Direccionam-se apenas ao produto final, separando planejadores de executores; pressupõe uma capacidade infinita; e não reconhece a falta de histórico que fundamente as estimativas (KERZNER, 1994);
- Dificuldade de reconhecer com antecedência as próprias atividades, suas durações e relações de precedência; falta de atividades cíclicas e condicionais; e a pressuposição de uma relação linear inversa entre custo e duração - colisão de atividades (WIEST & LEVY, 1977); e
- O método PERT pressupõe que existe uma independência de caminhos de atividades, ou seja, um determinado caminho não pode provocar um atraso em outro (VAN SLYKE, 1963; SCHONBERGER, 1981).

Lu (2003) afirma que o CPM falha ao abordar aspectos importantes no planejamento de projetos de construção, tais como:

- Natureza dinâmica e repetitiva das operações de construção;
- Restrições de disponibilidade de recursos; e

- Complexidade dos relacionamentos e da interdependência entre os diversos componentes do sistema.

Em contrapartida, Jaafari (1984) argumenta que não há nada de intrinsecamente errado em qualquer conceito do CPM; a culpa reside na forma como a metodologia é aplicada na prática. Segundo o autor são dois os fatores que afetam o sucesso do emprego dessa metodologia: emprego de taxas de produtividades realistas; e inclusão de buffers de tempo suficiente entre caminhos diferentes, que serve para simular condições de campo reais que indicam atraso no início de novas atividades.

Jaafari (1984) ainda defende que, mesmo em projetos lineares, o uso do CPM não é apenas relevante, como também mais construtivo. Isso ocorre porque essas construções lineares raramente são tão uniformes na secção transversal ou na composição do material como eles aparentam ser inicialmente. Nesse tipo de projeto existem pontes, túneis, bueiros, interseções, junções de tubos, estações de bombeamento etc., que, juntamente às habituais variações no terreno, interrompem a continuidade dos trabalhos. Estes fatos acarretam um diferente conteúdo do trabalho por unidade de comprimento, de modo que o agendamento “sincronizado” linear é de pouco interesse prático. O autor questiona se não seria mais apropriado planejar as construções lineares de forma a dividi-las em segmentos lineares justamente nesses pontos discretos.

2.4.2 Linear Projects e Repetitive Projects

O termo "*Linear Scheduling Method*" não possui origem definida, possivelmente vem de diferentes países. O método foi inicialmente concebido para resolver problemas de produção industrial e sua consideração para uso na indústria da construção é bastante recente. O método inclui uma infinidade de variações que são baseadas nos mesmos princípios orientados aos recursos. Cada variação do método é nomeada de forma diferente na literatura, por exemplo: "*Line of Balance Schedules – LOB*", "*Vertical Production Method – VPM*", "*Time-Space Scheduling*", "*Cascade Networks*", "*Velocity Diagrams*", "*Fenced Bar-Charts*", "*Chain Bar-Charts*", "*Construction Management System*", e "*Combined PERT / LOB*".

A despeito dos diferentes nomes utilizados, todos apresentam características comuns. Alguns outros fazem uso de técnicas de interação e simulação, abordagens estocásticas e programação

dinâmica ou linear. O consenso é que o LSM é bem adequado aos projetos compostos por atividades de natureza repetitiva (ARDITI & ALBULAK, 1986).

No meio científico, projetos lineares e projetos repetitivos são definidos como termos equivalentes. Projetos de construção que podem ser divididos em diversas partes ou unidades idênticas, em que atividades se repetem de uma unidade para outra, são caracterizados como projetos repetitivos ou lineares¹². Alguns autores argumentam que, no caso de projetos lineares ou repetitivos tais como rodovias e dutos, é vantajoso usar o “*Linear Scheduling Method - LSM*” ou método de agendamento linear (BIRREL, 1980; JOHNSTON, 1981; PEER, 1974; SELINGER, 1980; STRADAL, 1982). Já Arditi & Albulak (1986) afirmam que o LSM é mais adequado ao planejamento de projetos que exibem características repetitivas, porém a sua utilização na indústria da construção ainda é limitada.

Isie et al. (2009) dividem os projetos repetitivos em contínuos e discretos. Projetos repetitivos contínuos são as rodovias, ferrovias, barragens, túneis onde as equipes percorrem o terreno como em um “desfile”, uma após a outra, com certa quantidade de distância e intervalo de tempo entre as operações. Já nos projetos repetitivos discretos, as unidades de produção trabalham separadas, tal como na construção de prédios de múltiplos pavimentos ou conjuntos residenciais.

Ammar & Elbeltagi (2001) afirmam que a linearidade dos projetos pode ser devido à repetição uniforme de um conjunto de atividades que compõe o projeto (por exemplo, várias casas semelhantes e arranha-céus que compreendem plantas típicas); ou devido à disposição geométrica do projeto (por exemplo, rodovias e gasodutos).

Kannan & Senthil (2014) argumentam que os dois maiores desafios para a programação de projetos de rodovias são a representação linear de suas atividades e a obtenção de taxas prováveis de produção das equipes de trabalho. Os autores recomendam o emprego do LSM combinado a determinação de funções de distribuição específicas para cada atividade em substituição as técnicas de redes de precedência e a distribuição Beta, características do CPM

¹² Estes projetos são classificados de acordo com a natureza da repetição em AGRAMA (2011): Repetição horizontal: que se repete devido ao seu traçado geométrico tais como rodovias, ferrovias, gasodutos e túneis. Este tipo é geralmente chamado de projetos lineares; Repetição vertical: projetos que se repetem devido à repetição vertical de um pavimento-tipo, tais como edifícios de grande altura; e Repetição horizontal e vertical: projetos que se integram entre os dois acima tipos.

/ PERT. Eles afirmam que o “framework” básico proposto para estimativas de tempo em obras lineares tem sido adotar o LSM para a programação. Como alternativa, um modelo gráfico de fluxo simples foi apresentado incorporando prováveis taxas de produção de equipes de trabalho e reservas ou “buffers”.

Os projetos de construção pesada são caracterizados pelo uso intensivo de recursos (equipamentos de engenharia) e dependem de processos repetitivos. Esses processos estão presentes na operação de unidades de produção tais como equipes de engenharia e usinas. Os métodos construtivos são tipicamente cíclicos e qualquer acréscimo na produtividade ou eficiência da equipe produtiva impacta significativamente no desempenho do projeto (VENEGAS, BRAVO & HALPIN, 1993).

2.4.3 Técnicas de Programação

“*Project Scheduling*” é uma etapa muito importante do processo de planejamento pois é a base para a alocação de recursos, estimativa de custos e o acompanhamento da performance dos projetos. A essência do “*Project Scheduling*” é a correta estimativa de duração das atividades e o estabelecimento de uma rede de precedências que represente a relação entre as atividades. Existem muitos métodos para a determinação da duração das atividades. Analisar dados históricos de projetos similares, consultar especialistas ou se basear na experiência do planejador estão entre os métodos mais utilizados. Outra forma é dividir a quantidade de trabalho por a produtividade da equipe (AHUJA, 1994).

A pesquisa bibliográfica indicou outras ferramentas que podem ser utilizadas direta ou indiretamente para a programação e sequenciamento de atividades em projetos:

- O método “*Line of Balance – LOB*” para agendamento de atividades é uma das variações do LSM. O LOB tem sido desenvolvido nas últimas décadas para gerenciar projetos que compreendem atividades de natureza repetitiva. Embora os LSM sejam amplamente aceitos por serem mais adequados para a programação e controle de projetos repetitivos, há indícios de que a sua utilização não seja generalizada (ARDITI e ALBULAK, 1986). Uma descrição elaborada do método LOB é dada em Lumsden (1968).
- A filosofia “*Just in Time*” (JIT) é um sistema sincronizado de produção em fluxo contínuo sem estoques, onde nenhum material deve chegar ao seu local de

processamento ou nenhum serviço deve ser realizado sem que a necessidade imediata do sistema produtivo. Observa-se que essa concepção em muitas situações é utópica, em especial no setor de construção civil. Sabe-se que esse setor se diferencia dos demais setores da indústria de produção em série justamente pela complexidade em relação ao sistema produtivo e pelas incertezas ocasionadas por interferências internas e externas ao canteiro de obras. (VIEIRA, 2006). Verificando-se os resultados positivos deste método surge a intenção de aplicá-lo na construção civil; no entanto, sendo uma indústria com características muito distintas da produção em série, foi necessário adaptá-la, nascendo a “*Lean Construction*”.

- A “*Lean Construction*” é então a adaptação da “*Lean Production*” à indústria da construção, gerada em 1990, tem como marco fundamental a publicação do trabalho “*Application of the New Production Philosophy in the Construction Industry*” - Koskela (1992).
- A metodologia de simulação de eventos discretos, diz respeito "a modelagem de um sistema à medida que este evolui ao longo do tempo por uma representação em que as variáveis de estado mudam apenas por saltos discretos em pontos de interesse" (LAW & KELTON, 1982). A Simulação fornece, então, uma solução alternativa promissora para o planejamento de construção, pois permite a modelagem de um sistema a partir de um mapeamento de seus processos muito mais próximo do mundo real e com uma quantidade de parâmetros e de variáveis significativamente superiores às técnicas tradicionais. Esta característica somada a capacidade de tratamento estocástico da variabilidade a que esses processos estão normalmente submetidos e, ainda, a capacidade de teste de cenários tornam a Simulação de Eventos Discretos uma poderosa ferramenta de planejamento de projetos de construção civil, igualmente útil a edificações quanto a construção pesada.
- Algoritmos Genéticos "GAs" são inspirados na teoria da evolução de Darwin. O GA é um procedimento de pesquisa global que busca a partir de uma população soluções para outra, com foco na área da melhor solução. Ele foi modelado com um conjunto de soluções (representado por cromossomos) chamado população inicial. O cálculo é realizado através da criação de uma população inicial de indivíduos e modificação das características da população de soluções (indivíduos) ao longo de um grande número de gerações seguidas pela avaliação, uma solução satisfatória é encontrada (AZIZ, HAFEZ e ABUEL-MAGD, 2014).

- Aziz et al. (2014) desenvolveram um modelo que incorpora os conceitos básicos do CPM aliados a um Algoritmo Genético Multiobjetivo. O principal objetivo do modelo foi sugerir um apoio prático para planejadores de mega construções, horizontais ou verticais que necessitam otimizar a utilização de recursos, a fim de minimizar a duração do projeto e seu custo e, ao mesmo tempo, maximizar sua qualidade. O software proposto é nomeado “*Smart Critical Path Method System - SCPMS*”, que usa recursos do Método do Caminho Crítico "CPM" e "GAs" multiobjetivo.

Técnicas de simulação foram usadas para estimar durações de atividades em projetos rodoviários, mas o uso da técnica de rede nesse trabalho mostrou-se incompatível com as relações lineares que caracterizam as atividades de um projeto rodoviário. Lu (2003) usou a modelagem de um caso específico de construção de camadas granulares através de simulação de eventos discretos para demonstrar suas vantagens em relação ao CPM.

A prática de agendamento atual adotada por construtores é baseada em um software comercial que se utiliza do gráfico de Gantt e de um diagrama de redes de precedência. A exigência de um único tipo de metodologia de programação para projetos de estradas tem sido identificada como uma área potencial da investigação, devido à natureza peculiar do relacionamento entre as atividades, do número de atividades envolvidas, do seu modo de execução e do ambiente de trabalho (KANNAN e SENTHIL, 2014).

2.5 METODOLOGIA TRADICIONAL DE PLANEJAMENTO DE TEMPO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Conforme pôde ser observado na Revisão Sistemática da Literatura, não existe uma distinção clara entre as abordagens de planejamento do tempo dos subsetores que compõem o setor da Construção Civil. Assim, não existe uma metodologia própria aos projetos de Construção Pesada. Então, optou-se por nomear de “Metodologia Tradicional” os processos e ferramentas comumente utilizados pelos profissionais do setor, que na RSL, aparece quase sempre aplicado às obras de edificações.

Os engenheiros civis formados nas últimas décadas terminaram sua graduação com conhecimentos limitados sobre o planejamento de obras e, principalmente, sobre a programação de suas atividades no tempo. Ainda se ensina, mesmo nas universidades

brasileiras mais renomadas dentro e fora do país, o método PERT/CPM, desenvolvido no final da década de 1950 e, como vimos, pouco indicado ao planejamento de projetos lineares ou repetitivos, tais como as obras de infraestrutura de transportes.

Em uma visão mais ampla, considerando todos os aspectos do planejamento de obras de construção civil, verifica-se que as ementas das IES de Engenharia Civil abordam, além do PERT/CPM, outros tópicos tais como: organização do canteiro de trabalho; cronograma físico-financeiro; dimensionamento e operação de equipamentos; orçamento e composição de preços; técnicas das linhas de balanço; planejamento de obras com assistência do computador; produtividade na construção; controle (apropriação) de prazos e de custos de obras; controle de qualidade (indicadores de desempenho); produção industrial: planejamento e programação; histograma de recursos; nivelamento de recursos; programação de atividades; e sistemas de informação.

Como pôde ser observado, alguns tópicos que constam das ementas ou são sinônimos de programação de atividades ou são processos da elaboração de um cronograma; já outros tópicos estão ligados a obtenção de informações gerenciais que servem de subsídio a estimativa das produtividades das equipes e/ou as durações das atividades.

Uma vez identificado o método PERT/CPM como a bagagem teórica que os engenheiros possuem para a programação das atividades de construção essa passará a ser considerada neste trabalho como a principal ferramenta de programação de atividades da metodologia tradicional de planejamento de tempo em projetos de construção civil.

2.5.1 Metodologia Tradicional de Planejamento de Projetos de Construção Civil

A fim de mapear os processos de planejamento do tempo em projetos de construção civil foram selecionadas três obras de autores consagrados, sendo um nacionalmente e dois internacionalmente, que tratam especificamente desse tema:

- **PLANEJAMENTO, ORÇAMENTAÇÃO E CONTROLE DE PROJETOS E OBRAS**, de Carl V. LIMMER. Editora LTC, 2013;
- **CONSTRUCTION PROJECT SCHEDULING AND CONTROL**, de Saleh MUBARAK. Editora Wiley, 2010;

- **CONSTRUCTION PROJECT MANAGEMENT: A PRATICAL GUIDE TO FIELD CONSTRUCTION MANAGEMENT**, de Richard H. CLOUGH, Glenn A. SEARS, e S. Keoki SEARS. Editora Wiley, 2008.

O livro de Carl V. Limmer, baseado em suas notas de aula do Curso de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense / RJ, talvez seja o livro texto mais utilizado pelos engenheiros civis brasileiros ao longo de suas vidas profissionais e é indicado como bibliografia pela maioria das IES de engenharia do país.

O livro de Mubarak é fruto da soma de sua larga experiência do autor como gerente de construção no “*Public Works Department of Hillsborough County*” - Tampa / Florida com a robusta formação teórica consolidada ao longo dos anos em que atuou como membro do “*PMI College of Scheduling*”. O livro foca na programação de atividades como parte do esforço de gerenciamento de projetos de construção civil.

O livro de Clough & Sears, atualmente na 5ª edição, tem sido considerado por mais de 30 anos como o guia mais relevante do Método do Caminho Crítico - CPM no planejamento de projetos de construção civil. O prof. Richard H. Clough é considerado como um dos principais educadores americanos na gestão da construção civil.

Além dessas três referências, ao se mapear os processos de planejamento de um projeto, não há como desviar da metodologia consagrada pelo “Project Management Institute” em sua publicação de referência “Um guia do conhecimento em gerenciamento de projetos – Guia PMBOK®”, atualmente na 6ª edição, de 2017. Neste guia há um capítulo inteiro dedicado ao gerenciamento do tempo em projetos.

Além dos processos de gerenciamento de tempo, o Guia PMBOK, PMI (2017), será útil ao propósito desta pesquisa, pois apresenta uma metodologia consagrada e atual para o mapeamento de processos de gestão. Essa metodologia será utilizada como referência na identificação e na apresentação dos processos de planejamento do tempo em projetos de construção civil, conforme previsto pelos autores selecionados.

O Guia PMBOK mapeou ao todo 47 processos de gerenciamento de projetos. Esses processos foram agrupados em 10 áreas de conhecimento (integração, custos, tempo, escopo, qualidade,

riscos, recursos humanos, comunicações, aquisições e partes interessadas) e em 05 grupos de processos ou macroprocessos (iniciação, planejamento, execução, monitoramento e controle e encerramento)¹³.

Neste trabalho, procurou-se identificar, pela consulta a bibliografia selecionada, os processos e macroprocessos relacionados ao planejamento do tempo em projetos de construção civil. Então, os processos indicados para o planejamento de tempo nas 03 publicações supracitadas e, além delas, no Guia PMKOK, foram mapeados.

É oportuno esclarecer que, com exceção do PMI (2017) que expõe claramente os processos de gerenciamento do tempo, os processos identificados nas outras fontes de consulta foram interpretados a partir do que foi apresentado pelos autores, algumas vezes de forma difusa. Do mesmo modo, foram inferidas as entradas, ferramentas e técnicas e as saídas de cada um desses processos.

Fica claro, ao se estudar o enfoque dados pelos autores, que o planejamento do tempo representa apenas uma das facetas do planejamento do projeto; sua execução está diretamente interligada ao orçamento, à análise de riscos do empreendimento, ao tempo de processamento das aquisições, à disponibilidade e produtividade de recursos humanos e dos equipamentos empregados, à definição detalhada do escopo etc.

A integração entre os diferentes aspectos do planejamento deve ser coordenada de forma a permitir a obtenção de informações gerenciais relevantes aos processos do planejamento do tempo além de garantir a coerência entre as premissas adotadas. O planejamento quando realizado de forma integrada permite que o controle do empreendimento seja realizado com menor esforço, maior foco e maior chance de ser efetivo, ou seja, capaz de identificar desvios ao planejado e propor medidas corretivas oportunas.

A seguir é apresentada a Figura 2-1, conforme proposto na metodologia de gerenciamento proposta pelo PMI (2017), que representa a ligação existente entre o gerenciamento do tempo

¹³ Para o PMI, uma área de conhecimento representa um conjunto completo de conceitos, termos e atividades que compõem um campo profissional, campo de gerenciamento de projetos, ou uma área de especialização. Os grupos de processos são categorias que agregam os processos e o processo é o conjunto de ações e atividades inter-relacionadas que são executadas para criar um produto, serviço ou resultado. Cada processo é caracterizado por suas entradas, ferramentas e técnicas que podem ser aplicadas, e as saídas resultantes (PMI, 2017).

e as demais áreas do conhecimento. Uma vez entendida de forma geral a abordagem dada pelos autores consultados ao planejamento do tempo nos projetos de construção civil, pôde-se inferir quais seriam os processos, suas entradas e saídas, além das ferramentas que compõe a metodologia tradicional de planejamento do tempo. É isso que se pretende apresentar na sequência deste trabalho. Os anexos D, E, F e G apresentam os processos indicados pelo PMI e pelos autores consultados.

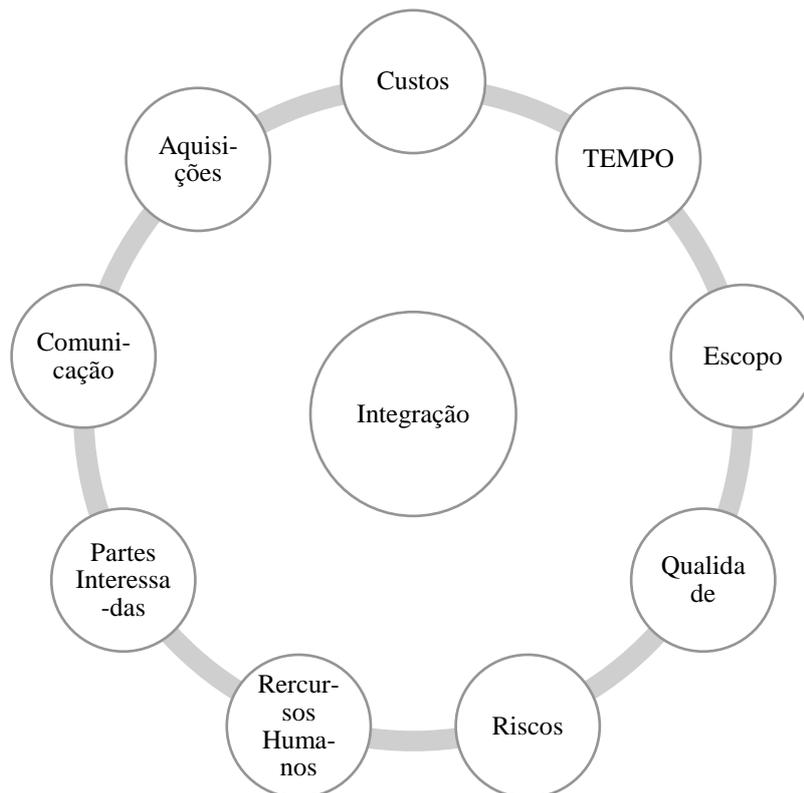


Figura 2-1 - Áreas do conhecimento
Fonte: Adaptado da metodologia do PMBOK – 6ª ed.

2.5.2 Detalhamento dos Processos de Planejamento do Tempo de uma Obra de Construção Civil: Metodologia Tradicional

Os processos identificados na bibliografia consultada permitem uma generalização dos processos relativos ao planejamento do tempo. A Figura 2-2 apresenta os 06 processos identificados que sintetizam os procedimentos geralmente adotados pelos planejadores de projetos de construção civil. Além dos processos também são apresentadas as relações de precedência existentes entre eles. A seguir, cada um dos processos será apresentado de forma resumida, visando permitir não somente seu entendimento, mas principalmente, suas premissas, limitações e dependências.

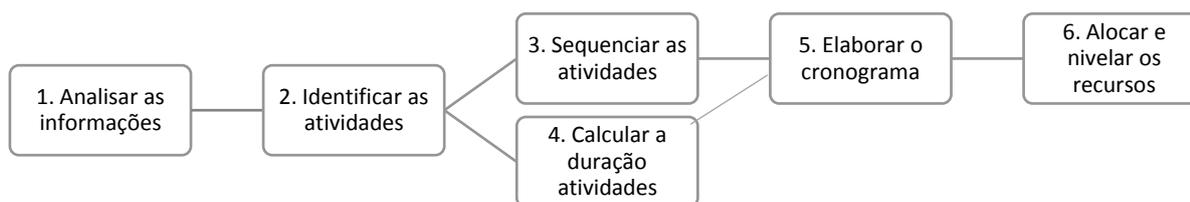


Figura 2-2 - Processos de planejamento

1.1.1.1 Processo 1: Analisar as informações

O primeiro passo para se planejar um projeto é conhecê-lo de forma detalhada. O planejamento e o controle de um empreendimento exigem o conhecimento deste, o que só poderá ser alcançado por meio da análise dos elementos que o compõem (LIMMER, 2013). Segundo Clough & Sears (2008), o planejamento requer um profundo conhecimento dos métodos construtivos combinados com a habilidade do planejador de visualizar elementos discretos de trabalho e estabelecer suas interdependências.

A análise das informações tem por objetivo permitir que o construtor compreenda o que está e o que não está incluído no escopo projetado. E ainda, possa decompor o escopo nas entregas de partes, segmentos e componentes necessários a conclusão do objeto. Assim, o processo de “analisar as informações” consiste na pesquisa, consulta e análise, de maneira detalhada e sistemática, de todos os documentos e demais informações disponíveis sobre o projeto, a fim de se identificar métodos, etapas, restrições, premissas, partes interessadas e relações as mais diversas.

Em projetos de construção civil, as informações utilizadas pelos programadores de atividades estão em sua grande maioria agrupadas em relatórios que compõem os diversos volumes do Projeto Básico/Executivo de engenharia. O que é uma vantagem – a facilidade de obtenção de informações – pode, entretanto, se transformar em dificuldade uma vez que passa a ideia ao planejador que as informações ali apresentadas esgotam o assunto e permitem uma ampla visualização e contextualização do problema logístico a ser enfrentado.

Uma das principais características dos projetos de construção civil e que os diferenciam da maioria dos outros projetos é a sua espacialidade. Uma obra de engenharia deve ser entendida como um conjunto de elementos em 4 dimensões. Além dos 3 eixos cartesianos que dão

forma e volume à essas obras também existe uma quarta dimensão - a dimensão tempo - a ser considerada.

Quando os projetistas elaboram os projetos de engenharia, precisam apresentá-los de forma simplificada, nas duas dimensões disponíveis numa folha de papel. Com isso, as informações, agora limitadas as tabelas, relatórios e desenhos bidimensionais, são simplificadas e, assim, perdem muito em qualidade. Nem mesmo a visita ao local da obra é capaz muitas vezes de resolver esse problema.

Outro efeito da dificuldade de visualização espacial do empreendimento é a dificuldade de se dividir o projeto em entregas menores e mais facilmente gerenciáveis. Essa divisão, recomendada pela bibliografia consultada, tradicionalmente não é feita pelos programadores de atividades que; ou não se utilizam da EAP ou, quando utilizam, dividem as atividades em fases da obra. Assim, deixam de considerar a divisão da obra em partes fisicamente (espacialmente) identificáveis, o que facilitará a elaboração de um cronograma em 4 dimensões.

Com isso, muitas das dificuldades construtivas e logísticas que serão enfrentadas na execução das obras não são detectadas com clareza na fase de planejamento, o que muitas vezes inviabilizam a contextualização do empreendimento dentro das particularidades do local da obra. Isso dificulta a realização dos serviços conforme a sequência e a velocidade estabelecidos no cronograma da obra.

2.5.2.1 Processo 2: Identificar as Atividades

O processo de identificar ou definir as atividades compreende o detalhamento dos pacotes de trabalho produzidos durante a etapa anterior de conhecimento e análise das informações do projeto. Esses pacotes de trabalho, que formam o último nível da Estrutura Analítica do Projeto (EAP), agora devem ser detalhados em atividades a fim de se formar uma base que permita estimar, programar, executar, monitorar e controlar os trabalhos do projeto.

Na construção civil, as atividades equivalem aos serviços de engenharia. Esses serviços são parcelas (subdivisões) ou etapas das entregas previstas no projeto e servem de base para que os orçamentistas elaborem as composições de custos unitários e que os programadores

calculem a duração das atividades e, a partir daí, por agregação, sejam calculados o custo e o prazo totais da obra. As atividades são, então, os menores elementos em que se dividem os orçamentos e os cronogramas. Daí a importância de que essas atividades sejam definidas de forma a englobar todo o escopo do projeto e, somente o escopo do projeto.

A lista das atividades e a EAP podem ser desenvolvidos sequencialmente ou paralelamente, com ambos servindo de base para o desenvolvimento da lista final das atividades. Cada pacote de trabalho dentro da EAP é decomposto em atividades menores, necessárias para a produção das entregas do pacote de trabalho. Do mesmo modo, o planejamento em ondas sucessivas é uma técnica recomendada neste processo pois os pacotes de trabalho podem ser detalhados em atividades de forma progressiva, até o nível conhecido de detalhe.

Membros da equipe do projeto ou outros especialistas, que tenham experiência e habilidade tanto na técnica de elaboração e decomposição da EAP e na elaboração de cronogramas ou que possuam expertise nas técnicas construtivas previstas no projeto de engenharia podem contribuir para a definição das atividades (PMI, 2017). Neste processo ficou evidente o foco da metodologia no levantamento de atividades operacionais (serviços de engenharia) em detrimento das atividades logísticas (administrativas).

A lista de atividades que serve de base a elaboração do cronograma e que está disponível nos projetos de engenharia é a mesma que serve de referência à elaboração dos orçamentos. O objetivo dessa lista, denominada nos projetos de engenharia como “quadro de quantidades”, é quantificar os montantes de serviços previstos nos diferentes projetos separando-os por disciplinas, tais como terraplenagem, drenagem, pavimentação etc.

Esse “quadro de quantidades” é uma etapa preliminar na elaboração do orçamento. Cabe ao orçamentista elaborar uma ficha de composição unitária para cada um dos serviços de engenharia quantificados, e assim, chegar ao custo final do empreendimento. Acontece que o “quadro de quantidades” se resume aos serviços finais, passíveis de medição e avaliação de qualidade. Não fazem parte dessa lista de serviços as atividades intermediárias, que antecedem e viabilizam que as atividades principais sejam executadas e concluídas.

Um exemplo da diferença entre as atividades operacionais e as logísticas ocorre no projeto de pavimentação de rodovias. O principal serviço de engenharia desse tipo de projeto é o

lançamento e compactação do Concreto Betuminoso Usinado à Quente (CBUQ), ou seja, a execução do pavimento asfáltico. No quadro de quantidades do projeto de pavimentação esse serviço aparece conforme descrito. Então um engenheiro desavisado pode programar essa atividade no primeiro dia de obra. Porém, a instalação da Usina de Asfalto ou o procedimento de compra de asfalto de uma usina particular já instalada, atividades que obrigatoriamente antecedem o lançamento do CBUQ na pista não aparecem diretamente na lista de atividades.

A experiência de campo diz que o tempo necessário, por exemplo, à aquisição, transporte, montagem, instalação e teste de uma usina de asfalto móvel não é inferior a dois meses (não considerados o licenciamento ambiental). Então, a atividade de lançamento e compactação de CBUQ, se programada no início do projeto teria um atraso de no mínimo dois meses no seu início. Esse exemplo mostra que os erros na elaboração de um cronograma podem ocorrer já na etapa de levantamento de atividades.

2.5.2.2 Processo 3: Sequenciar as Atividades

O processo de sequenciar as atividades está presente, de formas distintas, em todos os autores pesquisados e, ainda, faz parte da ementa dos cursos de engenharia das universidades brasileiras e internacionais. Assim, é de se esperar que faça parte também da rotina de planejamento do tempo de todo profissional com formação superior do país, encarregado da tarefa de elaborar o cronograma de uma obra de engenharia.

Na bibliografia consultada, o processo de sequenciar as atividades do projeto às vezes recebe outros nomes. Limmer (2013) o denomina “elaborar a rede de planejamento”; já Mubarak (2010) o divide nos processos “determinar relações lógicas entre atividades” e “desenhar a rede lógica”. Fica claro que se trata das mesmas ações e, portanto, optou-se por agrupá-las num único processo.

Do ponto de vista da teoria dos grafos, o problema do sequenciamento de atividades envolve o uso de um algoritmo de determinação de um caminho de valor máximo em um grafo sem circuitos (grafos orientados que não possuem ciclos fechados) onde os valores podem ser determinísticos - CPM ou estocásticos - PERT (BOAVENTURA NETTO, 2006).

A representação de um projeto através de uma rede é a base para a programação e o controle do projeto, assim como a análise de custos e de recursos. Segundo Fernandes e Godinho Filho (2010), essa representação serve aos seguintes propósitos:

- Representar de maneira simplificada o projeto;
- Avaliar propostas de alteração do projeto;
- Estimar o tempo de conclusão do projeto;
- Prevenir ou impedir atrasos;
- Avaliar as consequências de se alocar mais ou menos recursos para cumprir determinada atividade;
- Melhorar a coordenação do projeto etc.

A rede é montada de forma que todas as atividades estejam ligadas, com exceção da primeira e da última, a pelo menos uma predecessora e a pelo menos uma sucessora. Uma atividade predecessora é uma atividade que antecede uma atividade dependente em um cronograma. Uma atividade sucessora é uma atividade dependente que vem depois de outra atividade em um cronograma. Os relacionamentos lógicos entre as atividades devem procurar se aproximar, com o maior realismo possível, da conexão existente entre atividades subsequentes. As atividades críticas são aquelas que apresentam folga igual a zero. O caminho crítico é o conjunto formado por essas atividades críticas. Atrasos em quaisquer das atividades do caminho crítico gerará atraso no projeto.

Uma consequência na falha de identificação das atividades é percebida quando da montagem do diagrama de redes. Pode ser que esse diagrama não inclua todos os obstáculos que devem ser superados antes do início de uma atividade, omitindo assim etapas importantes e que consomem tempo e recursos que deixam de ser previstos.

Outro aspecto que merece destaque é que o diagrama de redes, conforme previsto no Método do Caminho Crítico, aplica-se satisfatoriamente a redes com atividades não simultâneas, relacionadas a partir de ligações tipo Término – Início, e não repetitivas. No caso de obras de construção civil a relação entre as atividades do cronograma é mais complexa e as atividades são repetitivas, dificultando assim sua representação de forma simplificada.

2.5.2.3 Processo 4: Calcular a Duração das Atividades

Segundo o PMI (2017), estimar as durações das atividades é o processo de estimativa do número de períodos de trabalho que serão necessários para terminar atividades específicas com os recursos estimados. O processo de calcular a duração das atividades é executado, obviamente, simultaneamente a elaboração da rede de precedências. Sem o cálculo ou estimativa das durações, torna-se impossível determinar a folga das atividades, a duração e o caminho crítico do projeto.

Até aqui, o método apresentado para a elaboração de redes de precedências – o Método do Caminho Crítico (CPM) – considerou a duração das atividades do projeto como determinística, ou seja, representada por um valor fixo. Cabe à equipe de planejamento optar, se possuir dados suficientes e se jugar relevante, por considerar a abordagem PERT. A diferença é que a duração das atividades passa a ser representada por uma variável aleatória com média μ e variância δ^2 , a qual segue alguma distribuição de probabilidade.

A distribuição de probabilidade que representa o conjunto da amostra de dados de durações passadas das atividades pode ser escolhida através de um teste de aderência. De acordo com Sipper & Bulfin (1997), caso não se conheça essa distribuição de probabilidade, as distribuições de probabilidade uniforme, triangular e a beta podem ser utilizadas. Assim como as durações das atividades críticas do projeto são variáveis aleatórias, o caminho crítico, obtido pela soma dessas variáveis, também é uma variável aleatória, portanto, também pode ser representado como uma distribuição de probabilidade, com uma média e uma variância.

Clough & Sears (2008) apresentam seis regras para a estimativa de duração de atividades:

- Para uma dada atividade considerar que todos os recursos estarão disponíveis quando requeridos;
- Assumir um nível normal de força de trabalho e de equipamentos;
- Se a unidade de trabalho é dia, usar um dia normal de trabalho;
- Estimar a duração de cada atividade individualmente, ignorando qualquer superposição entre atividades, evitando ainda adaptá-la ao tempo disponível;
- Considerar o calendário de dias trabalháveis; e
- Assumir condições climáticas normais para a estimativa da duração.

Apesar da metodologia PERT ter sido inventada na mesma época em que o CPM, sua utilização na engenharia civil é reduzida e o cálculo das durações das atividades quase sempre determinístico. A principal dificuldade em se adotar métodos probabilísticos, conforme levantado na pesquisa bibliográfica, reside na ausência de dados históricos de produtividade/produção e composição de equipes.

As seis regras de Clough & Sears (2008) para a estimativa de duração de atividades apresentam simplificações e são baseadas em premissas que distanciam a duração obtida para o projeto da realidade do campo, principalmente em projetos de construção civil. Dentre essas premissas destacam-se:

- Estimacão da duraco das atividades de forma isolada: a duraco de cada atividade será obtida assumindo que todos os recursos estarão disponíveis prioritariamente àquela atividade, ou seja, não há conflito entre as atividades;
- Recursos ilimitados: para uma dada atividade, todos os materiais, recursos humanos, equipamentos e outras necessidades estarão disponíveis, em quantidade e qualidade, quando requeridas;
- Produo eficiente: assume-se que as equipes de trabalho executarão as atividades de forma mais eficiente e econmica possível;
- Produo baseada num dia normal de trabalho: para o autor, dia normal de trabalho  aquele que desconsidera desperdício de tempo em atividades que não agregam produo. Essas perdas de tempo podem ser motivadas por atividades logísticas, administrativas ou ainda relacionadas a condioes climáticas não-ideais. Também não são consideradas as horas que ultrapassam a jornada de trabalho prevista.

Na construo pesada, onde há emprego maciço de equipamentos de engenharia, esses recursos, devido ao seu valor de aquisio ou locao elevados, são comumente empregados em diversas atividades simultâneas. O conflito na utilizao desses recursos dificulta tanto a análise de forma isolada das atividades quanto a aplicao do conceito de recursos limitados, pois dificilmente os recursos estarão disponíveis na quantidade e com a qualidade operacional necessária para que se alcance uma produtividade elevada e constante, pressupostos para uma produo eficiente.

Estimar a duração de atividades de forma isolada, sem considerar as restrições de recursos, é prática comum entre os planejadores de projetos de engenharia e induz a uma maior distância entre o cronograma e a realidade do projeto. Clough & Sears (2008) advertem, porém, que quando houver indícios claros de que as atividades concorrerão pelos recursos disponíveis há necessidade de se utilizar o que foi denominado de “restrições de precedência”. Esses conflitos deveriam ser mais bem investigados e resolvidos na fase de nivelamento.

Acontece que, como definido anteriormente, uma obra de infraestrutura é um projeto complexo devido entre outros fatores à sua vulnerabilidade às diversas variáveis que influenciam tragicamente na produtividade de suas equipes de trabalho. Então, é possível deduzir que esse tipo de empreendimento não possui uma quantidade considerável de “dias normais de trabalho”, ou seja, dias sem a ocorrência de ao menos uma dessas variáveis.

Assaf & Al-Hejji (2006) conduziram uma pesquisa sobre o desempenho de grandes projetos de construção na Arábia Saudita a fim de determinar as causas de atraso nas obras. Identificaram 73 (setenta e três) causas de atraso. Ao imaginarmos, como mero exercício de probabilidade, que cada uma dessas causas possua a probabilidade de ocorrência de apenas 2% em um dia típico de trabalho, podemos facilmente inferir que esse dia típico terá uma probabilidade de ser um “dia normal de trabalho” inferior a 25% ($(1 - 0,002)^{73} = 0,228$). Mais detalhes sobre essa pesquisa serão apresentados no próximo capítulo da tese. Esse exercício demonstra o quanto o planejamento do tempo em um projeto de construção pesada, adotando-se as premissas propostas por Clough & Sears (2008), pode distanciar o cronograma previsto do real.

2.5.2.4 Processo 5: Elaborar o Cronograma

Desenvolver o cronograma é o processo de análise da sequência lógica das atividades, suas durações, recursos necessários e restrições do cronograma visando criar o modelo do cronograma do projeto. O desenvolvimento de um cronograma de projeto aceitável é muitas vezes um processo iterativo, onde o cronograma se molda a cada iteração as restrições impostas, tanto de recursos quanto de prazos e custos.

O processo “Elaborar o Cronograma”, conforme proposto por Limmer (2013) e pelo PMI (2017), apresenta-se dividido em outros processos nos demais autores pesquisados. Clough &

Sears (2008) divide nos processos de “Calcular a Duração Total do Projeto” e em “Acelerar o Projeto”. Já Mubarak (2010) divide em “Revisar e Analisar o Cronograma”, “Implementar o Calendário” e “Alocar Recursos”.

As técnicas de compressão de cronograma são comumente utilizadas pelos engenheiros civis na elaboração de cronogramas. São empregadas para encurtar a duração do mesmo sem reduzir o escopo do projeto, a fim de cumprir as restrições do cronograma, as datas impostas, ou outros objetivos do cronograma. Isso é possível através da adição de recursos (horas extras, recursos adicionais ou o pagamento para a aceleração da entrega das atividades no caminho crítico). A compressão nem sempre produz uma alternativa viável e pode resultar num maior risco e/ou custo.

A opção do programador de atividades de utilizar a data mais tarde na elaboração do cronograma, privilegiando assim o resultado financeiro do empreendimento, na prática elimina as folgas das atividades não críticas, fazendo com que o cronograma seja formado por um conjunto de caminhos quase-críticos. Por outro lado, a opção pelas datas mais cedo desequilibra o fluxo de caixa e sobrecarrega o uso dos recursos, aumentando a necessidade de nivelamento. Não existe uma heurística no método PERT/CPM que auxilie a tomada de decisão do programador.

2.5.2.5 Processo 6: Alocar e Nivelar os Recursos

O processo de alocar e nivelar recursos está presente de uma forma ou de outra na maioria da bibliografia pesquisada. Compreende, de uma forma geral, as tarefas relacionadas ao gerenciamento de recursos (mão-de-obra, equipamentos, insumos etc.) de forma que os mesmos sejam atribuídos em quantidade e qualidade suficiente à realização das atividades do cronograma. O objetivo é cumprir as expectativas de duração previamente estipuladas, fornecendo a operação os meios necessários, com oportunidade.

Segundo Clough & Sears (2008), o suprimento e a disponibilidade desses recursos são influenciados por escassez sazonais, disputas trabalhistas, quebras de equipamentos, demandas concorrentes, atrasos de entrega, e incertezas diversas.

Considerando a máxima de que o gerenciamento de projetos trabalha com recursos sempre escassos, ou seja, em quantidade e qualidade inferiores às aspirações do gerente do projeto, há de se prever que esse processo seja iterativo. Cada tentativa irá procurar aproximar o cronograma das restrições a que o projeto se submete. Até esta fase, o cronograma não estava alinhado totalmente a realidade ambiente do projeto.

Por nivelamento de recursos entende-se a técnica em que as datas de início e término são ajustadas com base nas restrições de recursos, considerando as folgas calculadas por ocasião da elaboração da rede. O objetivo é equilibrar a demanda de recursos com o suprimento disponível.

O nivelamento de recursos pode ser usado quando os recursos compartilhados ou de necessidade crítica só estão disponíveis em certas épocas, ou em quantidades inferiores às necessárias, ou quando existem atividades simultâneas que concorrem pelo mesmo recurso. Em alguns casos, o objetivo do nivelamento é apenas manter o uso de um recurso em um nível constante ao longo do projeto ou de parte dele evitando assim demissões e desmobilizações desnecessárias e onerosas.

A etapa de nivelamento é importante, pois é a última oportunidade de se corrigir parte das simplificações anteriormente feitas no cálculo da duração das atividades. Para tanto é necessário que o programador disponha de informações, algumas delas estatísticas, acerca da disponibilidade de utilização dos recursos previstos. Além disso, convém determinar as “restrições de precedência” entre as atividades previstas, principalmente aquelas que formam o caminho crítico do projeto.

2.6 CONCLUSÕES

Os métodos CPM e PERT, detalhados anteriormente, ignoram os processos de múltiplos feedbacks, relacionamentos não lineares entre atividades e os processos de suprimentos de materiais e insumos as diferentes unidades produtivas e áreas de armazenamento. Então, o planejamento de projetos, usando métodos que carecem de uma metodologia que faça tanto a análise estratégica quanto operacional, induz ao erro que se propaga ao longo de toda a cadeia de produção da construção. Desse modo, esses métodos são inadequados ao planejamento de projetos complexos e dinâmicos.

Na tentativa de superar essas deficiências, diversas ferramentas de simulação têm sido empregadas com o objetivo de melhor representar as interdependências entre as atividades, dentre elas merece destaque o “Discret Event Simulation – DES”. No entanto, o DES tem sido empregado na solução de problemas apenas no nível operacional, devido as suas próprias características intrínsecas.

Quando o projeto em estudo está relacionado, assim como os projetos de construção civil, a sistemas logísticos ou “Supply Chain” há a necessidade de uma análise de nível macro ou estratégico desde a concepção do projeto. Visão e análise no nível estratégico permitem aos planejadores ver não somente as relações e a sequência entre as atividades que serão realizadas, mas também o impacto de como um evento ou decisão pode afetar a desempenho geral do projeto. Há necessidade, portanto, de se propor um método que englobe as duas abordagens: uma com nível de gestão macro ou estratégica e outra com nível de gestão micro ou operacional. Cada uma das abordagens requer ferramentas com diferentes características.

No nível estratégico, a ferramenta deve ser capaz de representar o comportamento do projeto como um todo. Esse tipo de análise faz parte do escopo dos Sistemas Dinâmicos (SD) ou dos Sistemas Multiagentes (SMA), que se preocupam com a interação entre componentes do sistema e com suas respostas aos testes de cenários e de implementação de diferentes políticas (tais como: *overtime*, capacidade flexível, erros e mudanças, pressão por produtividade etc).

Já no nível operacional, com capacidade de análise detalhada das atividades, o método deve propor ferramentas de rede, de simulação de eventos discretos (DES), de otimização e estatística. O resultado da simulação serve para testar as políticas e estratégias definidas no nível estratégico, agora com foco no dimensionamento e na alocação de recursos produtivos (tais como: equipamentos, unidades de produção, mão de obra etc.).

3 CONCEITOS E TEORIAS PARA O PLANEJAMENTO LOGÍSTICO DE PROJETOS DE INFRAESTRUTURA

Para o desenvolvimento e construção da nova metodologia de planejamento logístico e de planejamento de projetos de infraestrutura de forma integrada, objetivo principal desta pesquisa, requereu a exploração e revisão de uma vasta gama de literatura tanto para o estudo da arte como para a procura de novos conhecimentos que vissem agregar valor ao trabalho de pesquisa. Como já foi mencionado no capítulo de revisão sistemática da bibliografia, não foi possível encontrar trabalhos que abordassem o planejamento logístico integrado a projetos de infraestrutura de transporte ou a obras pesadas de forma geral.

Nesse sentido, existe uma lacuna de conhecimento quanto as novas abordagens no campo de pesquisa proposto nesse trabalho, questão que reforça a importância desse trabalho e o seu ineditismo. No entanto, o fato de não encontrar pesquisas relacionadas a esse campo de conhecimento foi um desafio grande, já que foi necessário construir uma base de conhecimento fundamentada em outras ciências. Assim, tirou-se proveito de todas as fundamentações teóricas e referências bibliográficas relacionadas a logística, produção, pesquisa operacional, planejamento de projetos etc.

No presente capítulo apresentam-se várias fundamentações teóricas e pesquisas relacionadas, que junto com as abordadas no capítulo anterior ajudaram a construir o alicerce de nesse novo campo de estudo, necessário para desenvolver essa pesquisa. Ressaltando que ainda existem outras teorias que também contribuíram a criar a base metodológica dessa pesquisa, no entanto não são apresentadas no trabalho porque saem do contexto principal do tema, mas que foram importantes para reflexionar e construir o pensamento sistêmico e para desconstruir padrões mentais que limitam e restringem as possibilidades de explorar novos conhecimentos e avançar com novas pesquisas.

3.1 A CADEIA DE SUPRIMENTO NO DOMÍNIO DA CONSTRUÇÃO CIVIL

O termo cadeia de suprimentos vem do inglês *supply chain management* (ou gerenciamento da cadeia de suprimentos). Esse é um termo “recente” e que expande o conceito de logística,

conforme definido pelo *Council of Logistics Management (CLM)*¹⁴. A cadeia de suprimentos se divide em três grandes áreas: a logística de suprimentos, a logística da produção e a logística de distribuição. O interesse mais amplo do domínio da logística foca nas logísticas de suprimento e de distribuição, deixando as atividades internas de produção a cargo do domínio da Engenharia de Produção.

A partir do ano 2000, o foco das pesquisas, seguindo a mesma tendência de evolução do estudo da logística, passou a dar mais ênfase ao gerenciamento da cadeia de suprimentos da construção como um todo e a considerar as suas peculiaridades (ALVES & TOMMELEIN, 2007). No entanto, de acordo com London & Kenley (2001), pouco se conhece sobre os tipos, estruturas, níveis de complexidade, aspectos econômicos e comportamento das cadeias de suprimentos da indústria da construção civil. Esses autores constataram que faltam pesquisas teóricas e empíricas dentro da comunidade da construção civil que considerem esses aspectos fundamentais.

Se no campo da pesquisa científica houve uma tímida evolução, na prática a evolução sentida em outros setores manufatureiros não foi acompanhada pelo setor da construção civil. Esse fenômeno pode haver acontecido porque a indústria da construção é caracterizada pela fragmentação, por organizações baseadas em projetos, instabilidade, projetos únicos, alta dependência da mão-de-obra, desconsideração dos níveis de incerteza, entre outras (LAUFER e TUCKER, 1987; KOSKELA, 1992).

Agora, é importante ressaltar que devido a esses fatores, fazem que o setor sempre conviva com perdas, desperdícios, problemas relacionados ao cumprimento de prazos, produtividade e qualidade, além de certa improvisação dentro de seu ambiente construtivo (VIEIRA, 2006). Para Formoso et al. (1996), as perdas e desperdícios de materiais na construção civil podem se apresentar de diversas formas:

- Por superprodução: produção em quantidades superiores ao necessário;
- Por transporte: manuseio excessivo ou inadequado de materiais;
- Por substituição: emprego de material com característica superior ao especificado;

¹⁴ Segundo o CLM: “*Logística é o processo de planejamento, implantação e controle do fluxo eficiente e eficaz de mercadorias, serviços e das informações relativas desde o ponto de origem até o ponto de consumo com o propósito de atender às exigências dos clientes*”.

- Por problemas de gerenciamento do estoque: falta de cuidados na armazenagem dos materiais e falta de locais adequados para sua armazenagem;
- Pela elaboração de produtos defeituosos: fabricação de elementos que não atendem as especificações devido a deficiências de projeto, de planejamento e controle, na utilização de materiais defeituosos e a falta de treinamento de mão de obra;
- Por problemas de procedimentos: falta de procedimentos padronizados, ineficiência dos métodos de trabalho etc.

Para Sterman (1992), os empreendimentos de construção pertencem à classe dos sistemas dinâmicos, complexos e sem padronização. Estes sistemas são constituídos de múltiplos componentes interdependentes, intervenientes, dinâmicos, envolvendo vários ciclos de controle e com relações não-lineares.

Para Vieira (2006), a indústria da construção civil diferencia-se de forma significativa das outras indústrias manufatureiras seriadas em sua concepção geral, como já foi comentado no item 1.5. Ao se analisar as especificidades do setor de construção civil apontadas na literatura, pretende-se buscar justificativas para o distanciamento observado entre a logística empresarial vigente em diversos setores da cadeia produtiva do país e o setor da construção civil.

Numa obra rodoviária, por exemplo, cada frente de serviço, responsável por cada etapa do processo construtivo representa um cliente/agente interno que deve ser suprido. O fornecedor de insumos pode ser considerado um agente interno dessa cadeia produtiva. Nesse tipo de obra, esses agentes estão localizados de forma descentralizada, espalhados em diversos canteiros de trabalho separados até por dezenas de quilômetros de distância, o que dificulta ainda mais a coordenação entre as diversas atividades de suprimento, manufatura e distribuição que se repetem ao longo da cadeia logística da construção.

Esses agentes internos, pertencentes ou não aos quadros da empresa construtora, são supridos por outros fornecedores, que por geral são externos à obra. Esse suprimento de fontes externas é o que constitui a etapa da administração de materiais ou suprimentos. A etapa de manufatura ou produção ocorre dentro dos diversos canteiros de obra. Dentre os agentes internos, Vieira (2006) destaca:

- Fornecedores de projeto: arquitetônico, estrutural, instalações etc.;

- Fornecedores de serviços técnicos especializados de infraestrutura: levantamento topográfico, sondagem, terraplenagem, estaqueamento etc.;
- Fornecedores técnicos especializados: em métodos construtivos, orçamentos;
- Fornecedores de ferramentas e equipamentos: guas, empilhadeiras, guinchos, andaimes, escoramentos, elevadores de carga, geradores, bombas de concreto, vibradores de imersão;
- Fornecedores de materiais: madeira, formas e escoramentos, aço e armaduras, argamassas, cimento e cal, concreto estrutural, elementos de alvenaria, componentes de instalação em geral, esquadrias revestimentos cerâmicos, tintas etc.; e
- Fornecedores de subsistemas: elementos pré-moldados, elevadores, esquadrias etc.

Ao se analisar o subsetor de construção pesada, entende-se que as distâncias e as relações envolvidas entre os diversos agentes internos e externos, fazem com que a cadeia logística global seja dividida em cadeias menores onde se repetem ciclos de suprimento – produção – distribuição. Assim, um meio-fio pré-moldado de concreto, produzido numa das unidades de produção que compõe o canteiro de obras (provavelmente na própria usina de concreto) será distribuído ao cliente interno – a equipe de drenagem superficial encarregada de sua instalação nos bordos da pista de rolamento da rodovia em construção. Assim, pode-se esquematizar a cadeia de suprimentos de uma obra rodoviária (Figura 3-1). As setas na vertical indicam os caminhos percorridos por materiais de construção e por materiais usinados, produzidos pelas diversas unidades de produção.

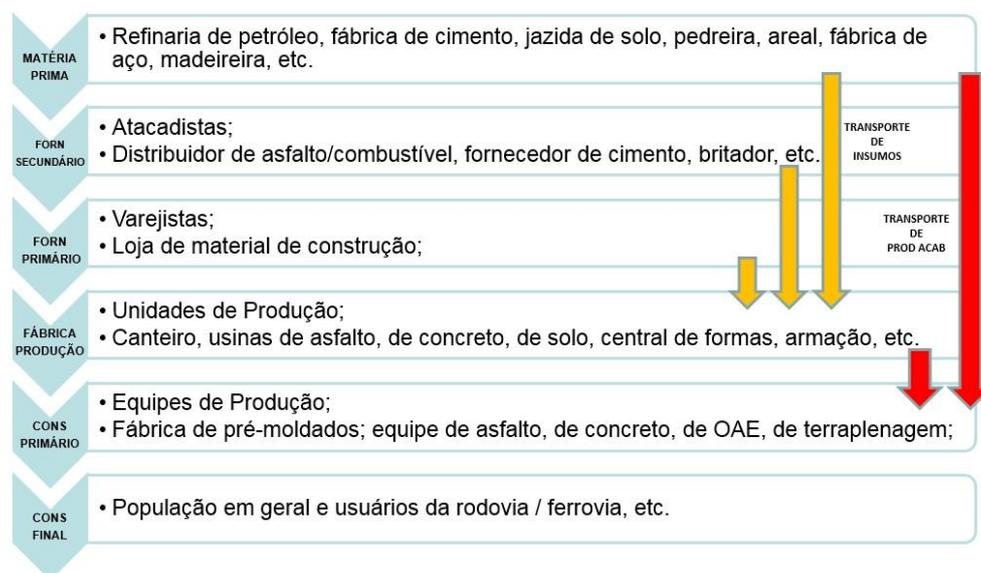


Figura 3-1 - Cadeia logística de uma obra rodoviária

3.2 O PAPEL DA CADEIA DE SUPRIMENTO NO PLANEJAMENTO DO TEMPO

Uma vez entendida a estrutura e as particularidades do gerenciamento da cadeia de suprimentos, principalmente, do setor de construção civil, é oportuno discutir qual a relação entre essa cadeia e o planejamento do tempo em projetos de construção. Para exemplificar essa relação, apresenta-se a continuação um resumo dos resultados de várias pesquisas que abordam os atrasos em obras e as causas que as motivaram.

Assaf & Al-Hejji (2006) conduziram uma pesquisa de campo sobre o desempenho de diferentes tipos de grandes projetos de construção na Arábia Saudita a fim de determinar as causas de atraso nas obras, sob a perspectiva de contratantes, construtores e consultores. Cerca de 75% dos construtores e 55% dos consultores afirmaram que os projetos atrasavam em média entre 10 e 30% em relação ao cronograma original. As 73 (setenta e três) causas de atraso foram categorizadas em 9 (nove) grupos. Na Tabela 3-1 apresenta-se uma lista das causas que guardam alguma relação com o fornecimento de materiais, as atividades de produção, a distribuição de componentes ou a integração da cadeia de suprimentos.

Tabela 3-1 - Causas de atraso em grandes projetos de construção

GRUPO	CAUSA DE ATRASO
CONTRATANTE	Problemas de comunicação e de coordenação entre as partes
CONSTRUTOR	Conflitos nos cronogramas dos subcontratados
	Retrabalho devido a erros de construção
	Problemas de gerenciamento e supervisão pelo contratante
	Atraso no trabalho dos subcontratados
CONSULTOR	Atraso na aprovação de mudança de escopo
MATERIAL	Escassez de materiais de construção no mercado
	Mudanças no tipo e na especificação de materiais durante a construção
	Atraso na entrega de materiais
	Atraso na fabricação de componentes
	Atraso no processo de aquisição de materiais
	Atraso na seleção de materiais de acabamento devido as opções de mercado
EQUIPAMENTOS	Baixa produtividade e eficiência de equipamentos
MÃO DE OBRA	Mão de obras desqualificada
	Baixa produtividade da mão de obra
EXTERNOS	Controle de tráfego e restrições no canteiro de trabalho

Fonte: extraído e adaptado de Assaf e Al-Hejji (2006)

Em outro estudo, Frimpong et al. (2003) pesquisaram as causas de atrasos e sobre preços em projetos de captação de águas subterrâneas em países em desenvolvimento, tais como Gana, no continente africano. Os resultados indicaram que 75% dos projetos excederam os cronogramas e orçamentos iniciais. Vinte seis causas foram identificadas por construtores, proprietários e consultores, dentre as quais se destacam: atrasos de pagamentos de medições;

deficiência de gestão dos construtores; falhas no processo de aquisição de materiais; e deficiência de desempenho técnica.

Outro questionário foi conduzido por Sambasivan & Son (2006) para levantar as causas e consequências de atrasos a clientes, consultores e construtores de grandes projetos na Malásia. Esse estudo, por sua vez, identificou as 10 causas mais importantes de atraso de uma lista total de 28 causas identificadas. As causas, em ordem de importância: (1) planejamento errado dos construtores; (2) falhas de gestão dos construtores; (3) falta de experiência do construtor; (4) falhas no pagamento pelos proprietários; (5) problemas com subcontratados; (6) escassez de material; (7) escassez de mão de obra; (8) quebras e indisponibilidade de equipamentos; (9) falta de comunicação entre as partes interessadas; e (10) erros durante a fase de construção.

Nota-se que grande parte das causas se repete nos três estudos, independentes da diversidade dos projetos pesquisados e dos locais de obras. Além disso, uma parte relevante delas possui relação com o fornecimento de materiais, as atividades de produção, a distribuição de componentes ou ainda com a integração da cadeia de suprimentos. Essas pesquisas reforçam a ideia de que existe forte relação entre os atrasos nas obras e as deficiências no gerenciamento integrado da cadeia de suprimentos. Mas qual a contribuição da logística na solução desses problemas?

Vieira (2006) dá uma direção a seguir, válida para obras de edificações, ao afirmar que a logística procura solucionar entre outros problemas o de descontinuidade de produção e de estoques desnecessários, fatos que repercutem diretamente na produtividade e nos custos. Uma supervisão e um controle mais contundente entre as atividades intervenientes irão minimizar problemas relacionados à descontinuidade como a falta de frentes de serviço, materiais e mão de obra. Por outro lado, irá também prevenir problemas de interferência entre tarefas, impedindo retrabalhos e perdas de tempo.

Estoques desnecessários são também fatores que dão origem a problemas como deterioração de materiais, ocupação de espaços e recursos preciosos fora de hora. Outro aspecto que, segundo Vieira (2006), pode contribuir significativamente para minimizar esses problemas é a escolha de técnicas construtivas e relacionamentos com fornecedores baseados em inovações tecnológicas.

Assim, Vieira (2006) apresenta estratégias baseadas na logística empresarial com o objetivo de atender as demandas do sistema produtivo, mas que podem ser adaptadas para responder as causas de atrasos apontadas na literatura. São elas:

- A simplificação do processo de gestão a partir de um planejamento logístico prévio, parte integrante do projeto de engenharia da obra;
- A redução de recursos humanos, privilegiando processos industrializados;
- A redução de estoques ao longo de toda a cadeia de suprimentos;
- A redução e maior confiabilidade do tempo de atendimento dos pedidos (“lead time”); e
- Aumento da produtividade e do nível de serviço com diminuição de custos e reflexos na competitividade.

3.3 PLANEJAMENTO HIERÁRQUICO DA PRODUÇÃO PUXADA APLICADO ÀS OBRAS DE INFRAESTRUTURA

Os problemas nos diferentes níveis organizacionais e setores da economia, incluindo a indústria da construção civil, exigem níveis de detalhamento e frequência de planejamento diferentes. Na gestão de projetos de construção os recursos têm existência física (materialidade), tais como equipamentos, instalações, materiais e pessoas. Esses recursos possuem uma característica importante para o gestor: a Inércia Decisória!

A inércia decisória pode ser definida como o espaço de tempo entre a tomada de decisão e sua implementação (seus efeitos). Como exemplo, verifica-se que a inércia decisória entre o pedido e o recebimento de um insumo, tal qual um saco de cimento, é diferente do tempo de resposta da aquisição de um equipamento leve como uma retroescavadeira e muito diferente de um equipamento de porte tal qual a entrega e instalação de uma usina de asfalto.

Os horizontes de planejamento devem ser coerentes com as inércias das decisões envolvidas. A probabilidade de erro cresce juntamente com a inércia decisória. Para que o gestor da operação tome uma boa decisão, é necessário que ele tenha uma visão, a mais clara possível, de futuro. Assim, sua decisão deverá ser tomada o mais tarde possível a fim de reduzir as incertezas e, conseqüentemente, a possibilidade de erro, desde que respeitando a inércia para que possa ter efeito oportuno.

Previsões (visão de futuro) são necessárias para suportar o processo decisório em operações. Corrêa (2012), identifica os principais erros cometidos quanto às previsões:

- Confundir previsões (estimativas baseadas em dados históricos) com metas (desejos ou necessidades);
- Gastar tempo e esforço discutindo se acerta ou erra as previsões; quando o mais relevante é o quanto se erra e como reduzir o erro; e
- Considerar nas previsões apenas um número e não dois (a estimativa e o erro-médio).

Fica claro, portanto, que para evitar os três tipos de erros apontados na literatura, as estimativas a serem feitas na fase de planejamento dos projetos de construção civil deverão deixar de ser determinísticas e passar a ser probabilísticas.

É desejável, portanto, que as ferramentas de análise e planejamento sejam consistentes para todos os níveis hierárquicos de planejamento. Para desenvolver métodos de planejamento da produção consistentes Hoop & Spearman (2013) recomendam os seguintes passos no desenvolvimento de uma estrutura de trabalho para o planejamento:

- Dividir apropriadamente o sistema geral em partes mais facilmente gerenciáveis, preservando sua integração com o todo;
- Identificar as conexões entre as partes em relação à capacidade, a combinação de produtos, pessoal etc.; e
- Usar as informações geradas para melhorar a consistência do sistema.

A primeira etapa corresponde a desagregação dos vários problemas em partes individuais gerenciáveis. Isso terá de ser feito, pois qualquer sistema de produção do mundo real, por mais simples que seja, é complexo demais para ser abordado em um único modelo. Existem várias dimensões possíveis para a desagregação: o tempo, os processos, os produtos e o pessoal. Dentre esses o mais utilizado e que melhor se adapta ao conceito de inércia decisória é a dimensão do tempo. Isso torna essencial a utilização de horizontes de planejamento diferentes nos processos decisórios.

Segundo a bibliografia pesquisada, existem 03 grandes níveis hierárquicos do planejamento:

- **Nível Estratégico (longo prazo):** definição dos objetivos do empreendimento e estratégias para atingi-los, considerando questões como que fabricar, como fabricar, onde fabricar, onde obter as matérias-primas;
- **Nível Tático (médio prazo):** definição dos trabalhos, quais recursos a empregar, que ações serão tomadas na manutenção dos equipamentos, quais produtos serão produzidos, limitadas às decisões de longo prazo; e
- **Nível Operacional (curto prazo):** decisões que envolvem o controle, a movimentação de materiais e dos recursos humanos, o ajuste do processo e dos equipamentos, ações corretivas.

Em relação as fábricas, um horizonte de planejamento longo corresponde, em média a 2 anos; um horizonte médio corresponde a 1 mês e um curto equivale a 1 dia. Para o caso da construção civil pode valer a mesma regra, devendo apenas o longo prazo ser compatível a duração estimada para a obra. Neste caso, para uma obra de construção de um lote de rodovia de 30 a 40 km de extensão, com duração média entre 2 a 3 anos convém considerar o planejamento de longo prazo superior a 12 meses.

Além do tempo, outra dimensão de desagregação que interessa ao estudo em questão está relacionada aos produtos. Uma forma de agregação é de juntar as peças que tem os mesmos roteiros de produção. Para o planejamento, em geral, é preferível manter o número básico de roteiros, ignorar as variações mínimas e dividir os produtos em famílias, onde os tempos de setup são desprezíveis.

3.3.1 Planejamento para a Produção Puxada

Uma maneira eficiente de desdobrar o problema de planejamento e controle da produção (PCP) em partes mensuráveis é construir uma estrutura de trabalho hierárquica do planejamento. É consenso entre os principais autores de engenharia de produção consultados (entre eles: Pound e Bell, Hoop & Spearman, Corrêa etc.) de que os sistemas de produção puxada oferecem muitos benefícios em relação aos tradicionais de produção empurrada. Para entender a diferença principal entre puxar e empurrar a produção é importante observar que a característica essencial de qualquer sistema de controle é o mecanismo que aciona a movimentação do trabalho.

Assim, um sistema de produção empurrada programa as liberações de trabalho com base nas informações de fora (relacionadas a demanda prevista); enquanto um sistema de produção puxada autoriza as liberações com base nas informações internas do sistema (consumo de produtos acabados ou componentes). De forma resumida, os sistemas de produção puxada são:

- **Mais eficientes**, porque podem alcançar a mesma produtividade de um sistema empurrado, mas com menos níveis médios de WIP¹⁵;
- **Mais fáceis de controlar**, pois dependem da definição e controle dos WIP e não das taxas de liberação de trabalhos como nos sistemas empurrados;
- **Mais robustos**, pois o desempenho de um sistema puxado é menos sensível aos erros nos níveis de WIP do que nas taxas de liberações de trabalhos em um sistema empurrado; e
- **Mais eficientes no suporte a melhoria de qualidade**, pois os baixos níveis de WIP dos sistemas puxados exigem altos níveis de qualidade e sincronismo para evitar paradas e facilitam a manutenção devido as menores filas e a maior rapidez na detecção de defeitos.

Se por um lado, o sistema puxado, baseado em taxas, é atraente sob o ponto de vista da logística, não é, necessariamente, bom para a função do planejamento. Em um sistema puxado os consumidores puxam aquilo que necessitam, ou seja, até que a demanda realmente ocorra, o sistema não possui nenhuma informação a respeito. Assim, um sistema puxado não oferece nenhum mecanismo para administrar o planejamento das necessidades de matérias-primas, de pessoal, de manutenção de equipamentos etc. (HOOP & SPEARMAN, 2013).

A maneira sugerida por Hoop & Spearman (2013) para conjugar os benefícios operacionais dos sistemas puxados com uma estrutura de planejamento coerente e com os prazos finais dos clientes é a utilização do modelo da correia transportadora. O modelo da correia transportadora é baseado no fato de que um sistema puxado mantém uma boa constância nos níveis de WIP, de maneira que a velocidade da linha de produção e o tempo de percorrê-la são relativamente constantes ao longo do tempo. Assim, podemos caracterizar a linha de produção

¹⁵ Trabalhos em processo (Work in Process) que consistem em estoques existentes entre o início e o fim de um roteiro de produção.

a partir de dois parâmetros: a taxa prática de produção (r_b^p) o lead time prático mínimo (T_0^p). Usando a Lei de Little, podemos notar que o nível de WIP “w” deve ser igual a:

$$w = r_b^p \times T_0^p \quad (3.1)$$

O modelo da correia transportadora permite, dentre outros: prever quanto tempo os novos pedidos serão atendidos; fornece uma ferramenta flexível para a análise de cenários alternativos de produção e dos diferentes efeitos da alteração de prioridades ou de decisões de capacidade relacionadas a produtividade; e ainda, permite desenvolver um modelo otimizado, capaz de finalizar os produtos dentro das datas de entrega aos clientes.

3.3.2 Planejamento Hierárquico da Produção

A partir do modelo da correia transportadora para prever a finalização dos trabalhos, pode-se desenvolver uma estrutura hierárquica do planejamento e controle da produção (PCP) adaptada aos sistemas de produção puxada. Cada retângulo da Figura 3-2 representa um módulo de planejamento (problema decisório individual)¹⁶.

A hierarquia do PCP desmembra-se em três níveis, ou horizontes, de planejamento. As estratégias de longo prazo estabelecem um ambiente capaz de cumprir com os objetivos gerais da fábrica. As ferramentas de médio prazo se utilizam dos planos estratégicos para gerar um plano geral de ação que prepara o ambiente produtivo para a fabricação de produtos. Já as ferramentas de nível operacional fazem parte do controle do fluxo de materiais através da fábrica e da medição dos progressos e dos ajustes necessários ao plano mestre de produção.

No nível estratégico, o **módulo de planejamento agregado** engloba os **módulos de planejamento da capacidade** e de **planejamento da força de trabalho**. O módulo de planejamento da capacidade se utiliza das previsões de demandas para determinar as necessidades de equipamentos e máquinas.

¹⁶ Informações mais detalhadas sobre o planejamento hierárquico da produção puxada podem ser obtidas a partir da consulta a bibliografia especializada, de onde se recomenda o livro *A ciência da Fábrica*, 3ª edição, editora Bookman, 2013.

As decisões básicas desse módulo são sobre que tipos de máquinas e quanta capacidade deverão ser instalados; decisões sobre fabricar ou comprar em relação às peças, componentes e produtos finais; decisão de necessidade e viabilidade de aumento de capacidade; consideração da confiabilidade e da manutenção no cálculo da capacidade real; e efeitos da variabilidade no desempenho dos recursos.

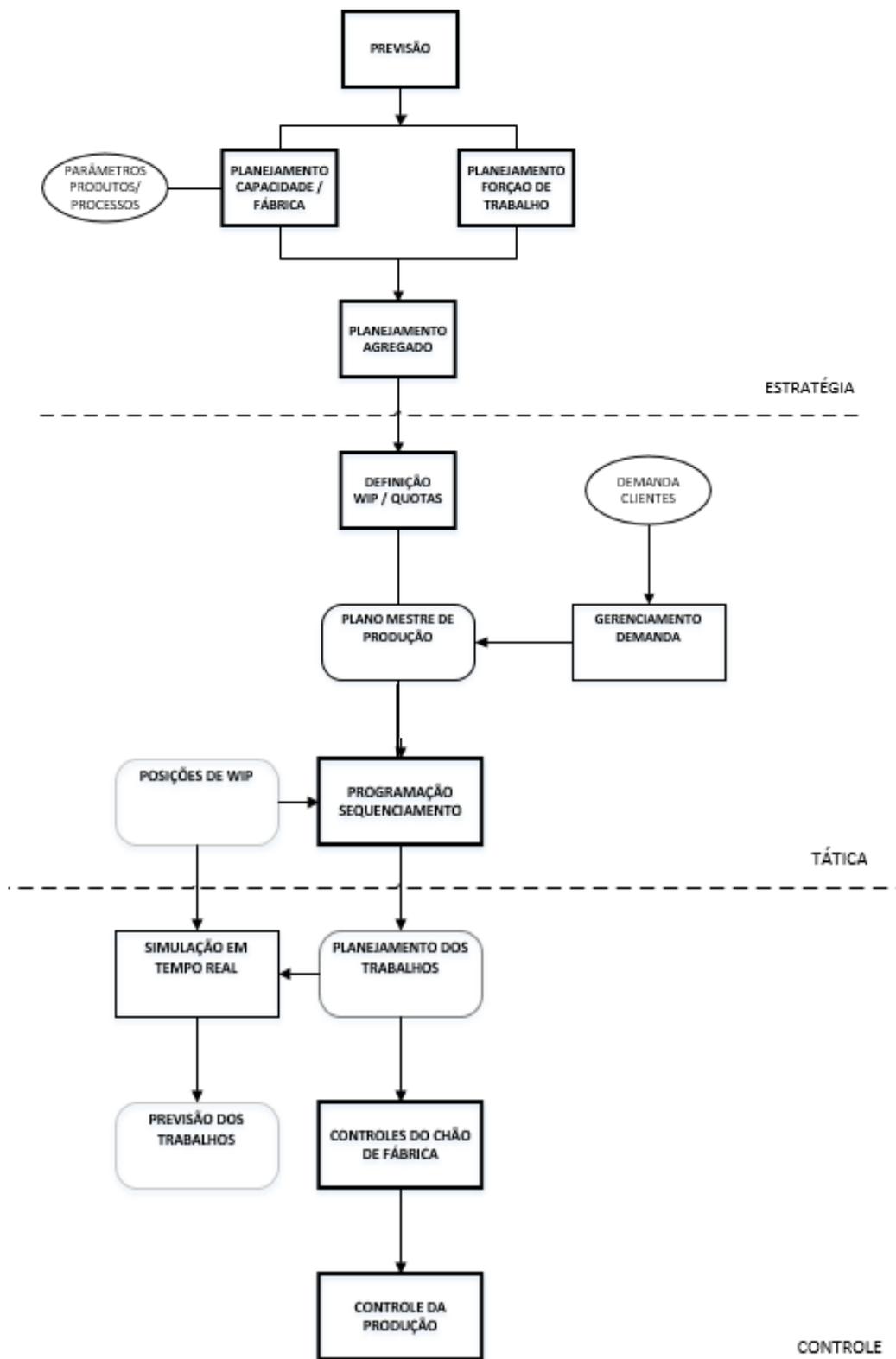


Figura 3-2 - Planejamento hierárquico para produção puxada

Já o módulo do planejamento da força de trabalho usa as previsões de demanda para gerar um plano de necessidade de pessoal (contratações, qualificações, treinamento etc.). A programação linear (PL) é uma ferramenta muito útil para a formulação e solução de muitos problemas comumente enfrentados no módulo de planejamento agregado. Esses problemas apresentam, normalmente, uma função objetivo em termos de minimização de custos, o que facilita o emprego de PL. As decisões do módulo de planejamento agregado apresentam grande inércia decisória, exigindo planejamento bastante antecipado.

O nível tático compreende os módulos de definição de WIP/quotas, de gerenciamento da demanda e de programação e sequenciamento. O **módulo de definição de WIP/quotas de produção**¹⁷ é responsável por transformar o plano agregado em parâmetros de controle para um sistema de produção puxada.

O **módulo de gerenciamento da demanda** é responsável pelo processamento e agrupamento dos pedidos dos clientes de modo a fornecer uma carga constante de trabalho para a fábrica. Já o **módulo de programação e sequenciamento** define as regras para liberação e sequenciamento da lista de pedidos. Dentre as regras de sequenciamentos mais comuns na Pesquisa Operacional pode-se citar a de menor tempo de processamento (SPT) e a de prazo mais curto (PMC).

O nível de planejamento operacional compreende os módulos de controle do chão de fábrica e controle da produção. O **módulo de controle do chão de fábrica** (CCF) controla os fluxos de materiais através da fábrica enquanto o **módulo de controle da produção** é responsável pela coleta, processamento e análise das informações gerenciais que serão retroalimentadas no processo de planejamento.

3.4 ÁREAS DE DECISÃO DO PLANEJAMENTO DE TEMPO DE PROJETOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

As áreas de decisão da construção civil podem ser extrapoladas a partir das áreas de competência levantadas na logística e na administração da produção e operações. De fato, boa parte das áreas de decisão identificada na literatura pesquisada é comum a essas duas

¹⁷ A quota de produção é a quantidade de trabalhos que serão finalizados em determinado período.

disciplinas. Este fato é previsível, pois elas se complementam dentro do conceito de cadeia de suprimentos integrada.

Dessa análise, foi possível identificar oito áreas de decisão e as decisões sobre recursos produtivos mais relevantes ao planejamento logístico e modelagem de obras da construção civil: Estratégias de Produção; Planejamento e Controle da Cadeia de Suprimentos; Decisões de Transporte; Decisões de Instalações e Localização; Previsão de Demanda e Capacidade; Qualidade; Filas e Fluxos; Sistemas de Planejamento, Programação e Controle da Produção e; Medidas de Desempenho. A Tabela 3-2 consolida essas informações.

Depois do estudo dessas oito áreas de decisão buscou-se ver como esse conhecimento poderia contribuir ao estudo do planejamento logístico e de construção de forma integrada. Os resultados dessa análise e da sua adaptação ao tema abordado nesse trabalho mostram-se a seguir.

3.4.1 Estratégias de Produção, Planejamento e Controle da Cadeia de Suprimentos

Essa área de decisão se confunde com a própria definição do escopo do projeto da obra. Nela são definidos os objetivos principais do projeto, e como esses objetivos podem ser hierarquizados em uma árvore de objetivos para serem mais facilmente gerenciáveis. Aqui também, serão consideradas as premissas adotadas no planejamento e as restrições quanto a prazo, custo e qualidade e, recursos disponíveis.

O detalhamento do escopo do projeto somente será possível a partir do levantamento das informações relevantes que constam: no projeto de engenharia, seja ele básico ou executivo; na visita técnica ao local do empreendimento e; em outras fontes, tais como, o da própria empresa construtora ou informações disponíveis na internet. Dentre as informações que podem ser obtidas do projeto de engenharia, citam-se as seguintes:

- Métodos construtivos, quantidades e tipos de serviços;
- Localização e dimensão do canteiro de obras previsto;
- Partes interessadas no projeto;
- Unidades de produção, fontes de matérias-primas e fornecedores de materiais;
- Equipes de trabalho previstas e suas produtividades;
- Turnos de trabalho;

- Equipes de transporte previstas e suas velocidades médias de deslocamento;
- Curva ABC de serviços e de materiais;
- Essas informações deverão ser confirmadas em uma visita técnica ao local da obra etc.

Tabela 3-2 - Áreas de decisão dos projetos de construção

ÁREAS DE DECISÃO	DECISÕES SOBRE RECURSOS PRODUTIVOS
Estratégia de produção e planejamento e controle da cadeia de suprimentos	Crítérios de desempenho (objetivo principal e secundários)
	Trade-off entre aspectos de desempenho e restrições
	Premissas e restrições do projeto
	Definição do composto de atividades logísticas
	Políticas de estoque e de ressurgimento (tipos de estoque, puxado ou empurrado)
	Decisões de comprar ou fazer
	Política de gestão da rede
	Detalhes do sistema de controle (tolerância ao erro, resposta do sistema, fixação de metas de custo e de serviço ao cliente, controle da informação - auditorias, relatórios regulares)
	Ações corretivas (ajustes, replanejamento e ação contingencial)
	Política de gestão da rede
Decisões de transporte	Demanda de transportes
	Oferta de transportes
	Roteirização e programação de veículos
	Forma de interação com o cliente
	Métodos de trabalho
Localização e Instalações	Nível de automação
	Quantidade de unidades
	Localização das unidades
Previsão de demanda e Capacidade	Arquitetura e layout das unidades
	Previsão e gestão de demanda
	Seleção de equipamentos
Força e projeto de trabalho	Acréscimos de capacidade (escala e momento)
	Nível de qualificação
	Nível de autonomia
	Recrutamento, seleção e treinamento
	Remuneração e recompensa
Qualidade	Motivação e <i>empowerment</i>
	Políticas de prevenção e recuperação de falhas
	Garantias do serviço
Filas e Fluxos	Nível de serviço ao cliente (elementos de serviço, tempo de ciclo do pedido, nível de serviço ótimo)
	Políticas de prioridade em filas
	Configuração das filas
	Identificação de gargalos físicos e operacionais
Sistemas de planejamento, programação e controle da produção	Balanceamento de fluxos produtivos
	Planejamento mestre de produção
	Cálculo da necessidade de materiais
	Regras de sequenciamento de atividades
Medidas de desempenho	Programação e controle de operações
	Métricas e relações entre métricas
	Frequência de mensuração
	Balanceamento do conjunto de métricas
	Dinâmica de atualização

Fonte: extraído e adaptado de Ballou (2006) e Corrêa (2012)

Dentre as informações complementares que podem ser levantadas na visita técnica ao local da obra ou de outras fontes, destacam-se:

- Histórico de chuvas da região;
- Recursos disponíveis da empresa;
- Modelo digital do terreno;
- Acidentes e obstáculos naturais e artificiais;
- Gargalos físicos que dificultem ou impeçam o deslocamento de equipes e cargas;
- Produtividades apropriadas em projetos semelhantes ou em projetos realizados na mesma região da obra etc.

Essa área também englobará as decisões relacionadas à definição do composto de atividades logísticas: quais os principais atores envolvidos e quais suas responsabilidades; quais produtos e quais dessas atividades logísticas serão produzidos com recursos próprios da empresa e quais serão terceirizados; se os componentes ou produtos usinados serão produzidos mediante pedido dos clientes (internos ou externos) ou se serão produzidos somente para estoque e, ainda, quais os tipos de estoque que serão mantidos, de que produtos, onde e em que quantidade serão armazenados; quais informações relacionadas ao fluxo de suprimentos serão geradas, com que frequência e por quem, e como serão inseridas nos relatórios gerenciais e; como os relatórios serão analisados e como as ações corretivas serão implementadas e validadas.

3.4.2 Decisões de Transporte

As obras de construção civil e, particularmente, as de construção pesada, são importantes polos geradores de tráfego (PGT), devido ao fato de que a própria obra em si, gera um volume considerável de viagens pelas movimentações dos equipamentos, mão de obra e suprimento de materiais. Portanto, as decisões de transporte são relevantes tanto no contexto do planejamento de projetos de construção quanto na previsão e mitigação dos impactos negativos à sociedade advindos de sua execução.

As decisões relacionadas a transporte englobam o estudo da demanda e da oferta de transportes, num cenário de projetos de construção civil. Com relação à demanda, deverá determinar-se o número de viagens num mês típico da obra e num mês de pico de produção, além de definir os pares de origem destino. No estudo da oferta será verificada a malha viária

disponível no local da obra e no seu entorno considerando as vias existentes, o tráfego e o nível de serviço atual e o projetado para o período de duração do empreendimento, e a capacidade da via. Essas informações servirão de base para alocação do tráfego projetado pela obra e para o cálculo da velocidade esperada e, conseqüentemente, o tempo de deslocamento, nessas vias. A comparação entre oferta e demanda permitirá decidir por roteiros e programação de viagens.

De fato, num projeto de construção pesada, as atividades de transporte de materiais, recursos (mão de obra e equipamentos) e produtos usinados, podem representar parcela significativa dos cronogramas e dos orçamentos dessas obras. Então, ao se definir a quantidade, localização, capacidade dos fornecedores de materiais, unidades de produção e dos clientes que se utilizam dos produtos usinados, pode-se estruturar a cadeia de suprimentos e, partir dela, definir os diversos fluxos logísticos que a compõe.

Esses fluxos logísticos transportam não só materiais de construção, mas também os trabalhadores envolvidos nos processos produtivos e administrativos além de dar a mobilidade necessária aos equipamentos e demais recursos produtivos. Obras de infraestrutura atraem diariamente viagens a partir de fornecedores ou de jazidas naturais (areia, brita, solo) de diferentes categorias tais como equipamentos, alimentos, materiais de construção e indivíduos.

Por outro lado, esses polos geram viagens relacionadas à saída de produtos usinados (concreto), ou pré-moldados (tubos, mourões) para as equipes de trabalho; movimentação dos indivíduos de volta as suas residências; e deposição de resíduos gerados. Esses resíduos podem ser de diversas naturezas e com destinações diferentes.

Lixo comum, entulho, sobras de material, óleos lubrificantes, entre outros são gerados diariamente e devem ter destinações apropriadas. Com o intuito de melhor entender as obras como PGT foi elaborada a Figura 3-3 com uma representação esquemática de movimentação de cargas existente na obra em que os caminhos vermelhos representam o transporte de insumos e os azuis produtos usinados.

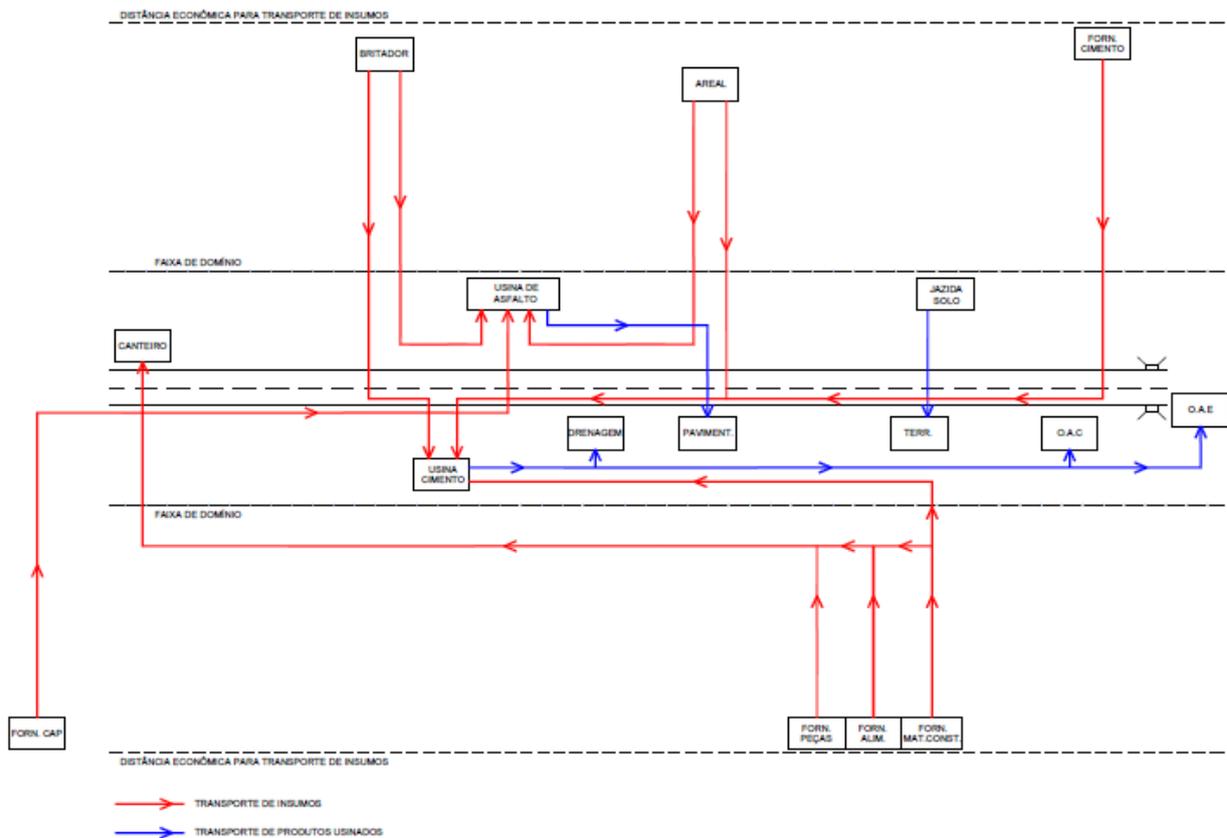


Figura 3-3 - Esquema de Viagens de uma Obra Rodoviária

3.4.3 Decisões de Instalações e Localização

As decisões relacionadas às instalações e à localização englobam a determinação da quantidade, localização e do layout (arranjo físico) dessas instalações. Como se observou no item anterior, a localização das instalações é um fator importante na tomada de decisões de transporte porque exerce influência nos custos de transporte. Dentre as instalações existentes num projeto de construção estão os canteiros de trabalho; as unidades de produção, tais como usinas de solo, concreto e asfalto; as centrais de extração de areia e de britagem; as centrais de formas e de armação; as fábricas de pré-moldados de concreto; e os depósitos finais e intermediários, dentre outros.

Arranjo físico de uma operação é a maneira segundo a qual se encontram dispostos fisicamente os recursos que ocupam espaço dentro da instalação de uma operação. O objetivo das decisões sobre o arranjo físico é apoiar a estratégia competitiva da operação, afetando os seus níveis de eficiência e eficácia (CORRÊA, 2012).

No caso da construção civil, principalmente nas obras pesadas, decisões erradas de localização são caras e difíceis de serem revertidas, tendo em vista o grande investimento feito, sendo seus efeitos bastante duradouros (CORRÊA, 2012). Agora, quando se fala das unidades produtivas e de suas locais de armazenamento, o impacto é igual, porém em uma escala menor que o da toda a obra envolvida. O mesmo autor argumenta que diversos são os fatores que afetam a localização de unidades de produção, tais como:

- Características dos produtos: como estocáveis ou não estocáveis;
- Proximidade de fontes qualificadas de suprimento (material): quando as matérias-primas são perecíveis ou de custo de transporte mais alto (mais volumosas, caras ou mais difíceis de transportar que os produtos);
- Proximidade de fontes de recursos: mão de obra qualificada ou de preço menor;
- Proximidade dos clientes: produtos perecíveis ou de custo de transporte mais alto (produtos mais volumosos, caros ou mais difíceis de transportar que os materiais);
- Considerações referentes ao ambiente físico: disponibilidade, preço, incentivos fiscais, qualidade do espaço físico, impactos ambientais, aspectos climáticos, acesso à infraestrutura de transportes, de onde será implantada a instalação;
- Considerações referentes a comunidade: impactos as condições de vida da população local (meio-ambiente, poluição sonora, lançamento de particulados, reflexos no tráfego etc.).

3.4.4 Previsão de Demanda e Capacidade

A capacidade produtiva de uma unidade de operações deve ser entendida como “o volume máximo potencial de atividade de agregação de valor que pode ser atingido por uma unidade produtiva sob condições normais de operação” (CORRÊA, 2012). Assim, as decisões relacionadas à capacidade produtiva são diferentes e dependem das inércias decisórias envolvidas, ou seja, dos tempos entre a decisão e a sua implementação.

Decisões de instalação de novas unidades produtivas ou expansão da capacidade das existentes são decisões estratégicas, que envolvem grandes investimentos e, portanto, são de longo prazo. As decisões sobre ampliação/redução dos turnos de trabalho e terceirização de parte da capacidade necessária são táticas, com tempo de implementação de semanas ou poucos meses, caracterizando o médio prazo. Já as decisões de remanejamento de recursos

disponíveis entre setores da empresa e controle de entrada e saída de fluxo por recurso são ações imediatas, de curto prazo e de controle direto dos gerentes de projeto (CORRÊA, 2012).

Os projetos de construção civil quando comparados com as indústrias, no que diz respeito ao estudo de capacidade produtiva, apresentam pelo menos três grandes diferenças que obrigam o planejador de obras a adaptar os ensinamentos da engenharia de produção sobre o assunto:

- Primeiro, os projetos de construção civil, diferentes de instalações fabris, são projetos de curta ou média duração. Assim, um edifício possui um tempo médio de construção da ordem de 18 meses enquanto um lote de 40 quilômetros de rodovia leva por volta de 36 meses para ser finalizado. Essa duração reduzida interfere sobremaneira na viabilidade econômica da decisão de construção de uma unidade de produção adicional. Afinal, o montante investido numa nova instalação deve possuir um “payback” compatível com o prazo de execução do empreendimento, sob pena de inviabilizá-lo.
- Uma característica dos projetos de construção é que alguns dos seus produtos usinados possuem restrições de aplicação limitadas a um determinado tempo (como se fossem produtos perecíveis). Por exemplo, o asfalto produzido numa usina de asfalto precisa ser lançado com uma temperatura superior a determinado limite. Se o tempo de deslocamento entre a usina e o local de aplicação causar um resfriamento excessivo da massa asfáltica ela será rejeitada pelo controle de qualidade e deverá ser descartada. Ou seja, a decisão de implantação de uma segunda usina de asfalto, em um trecho de rodovia muito extenso ou com obstáculos ao deslocamento, ou a opção de mudá-la de lugar ao longo do andamento da obra pode ser influenciada por restrições operacionais e não pela viabilidade econômica.
- Terceiro, a previsão da demanda, principal incógnita do planejador de uma indústria, apresenta maior previsibilidade quando se trata da construção civil. Uma vez iniciada, uma determinada construção apresenta a demanda definida pelos quantitativos previstos no projeto de engenharia. As variações, neste caso, estão relacionadas as atividades antecessoras ou sucessoras, mas a quantidade total está previamente definida e apresenta menor variabilidade.

3.4.5 Qualidade

Na construção civil e, particularmente na construção pesada, as atividades são executadas por recursos físicos. A economia de custo está diretamente vinculada a produtividade de

equipamentos e de equipes de trabalho. Portanto, o conceito de qualidade deve extrapolar a sua visão habitual de atendimento as especificações técnicas dos produtos, passando a se dedicar ao atendimento de metas pré-definidas, de custo e prazo. Para tanto, a qualidade deve estar relacionada, então, a disponibilidade e produtividade desses recursos físicos. É responsabilidade do gestor de operações buscar, decidir e tomar ações que evitem a ocorrência de falhas dos recursos físicos, diminuam sua probabilidade de ocorrência ou, no mínimo, minimizem suas consequências (CORRÊA, 2012).

3.4.6 Filas e Fluxos

Todas as organizações que processam fluxos (de pessoas ou materiais) e que estão submetidas a alguma restrição de capacidade de recursos enfrentam o problema das filas de espera. O gerenciamento dos sistemas de processamento de fluxo, de sua capacidade e das filas que eventualmente sejam formadas é uma parte fundamental da determinação do nível de serviço que uma unidade produtiva oferece (CORRÊA, 2012).

Um projeto de construção pesada é caracterizado por diversas atividades sequenciais e repetitivas. Então, como explicado anteriormente, convém que o efeito das filas deva ser considerado não somente no fluxo de materiais ou pessoas durante a produção, mas também no sequenciamento de atividades predecessoras e sucessoras que compõe o cronograma da obra. Desse modo, será possível verificar quanto uma atividade interfere na sua sucessora e como se propaga o atraso entre as atividades tanto do caminho crítico quanto dos demais fluxos da obra.

3.4.7 Sistemas de Planejamento, Programação e Controle da Produção

Os Sistemas de Administração da Produção (SAP) são o coração dos processos produtivos, eles têm o objetivo básico de planejar e controlar o processo de manufatura em todos seus níveis, incluindo materiais, equipamentos, pessoas, fornecedores e distribuidores.

É por meio do SAP que a empresa garante que suas decisões operacionais sobre o que, quando, quanto e com o que produzir e comprar sejam adequados às suas necessidades estratégicas, que por sua vez são ditadas por seus objetivos e seu mercado (CORRÊA & GIANESI, 2014). Informações gerenciais conduzem os planejadores a decisões inteligentes.

Dentre as atividades suportadas pelos SAP, estão:

- Planejar as necessidades futuras do processo produtivo;
- Planejar os materiais comprados (recebimento no momento certo e das quantidades certas);
- Planejar níveis apropriados de estoque;
- Programar atividades de produção (evitar dispersão de esforços);
- Saber da situação corrente (controle de pedidos e apropriação de custos e de produtividades);
- Reagir eficazmente e com oportunidade (reprogramar atividades);
- Ser capaz de prometer e cumprir prazos aos clientes.

A programação das operações consiste em alocar no tempo as atividades, respeitando as restrições levantadas. Para tanto, considera-se o agrupamento de recursos em centros de trabalho (ou unidades de produção). Por definição, centros de trabalho são áreas ou setores de um negócio no qual recursos são organizados e o trabalho é realizado por atividades agregadoras de valor. A seguir são apresentados, na ótica de Corrêa (2012), os principais fatores que afetam o sequenciamento e a programação de produção e operações:

- Em termos de ordens: as ordens de produção apresentam datas de entregas diferentes; cada ordem tem um estado diferente de realização; as ordens podem apresentar tempos de preparação (*setup*) diferentes; cada ordem pode ter vários roteiros alternativos, com produtividades e equipamentos diferentes; as ordens podem ser de clientes com importâncias diferentes;
- Em termos de recursos: máquinas podem não estar disponíveis em determinados momentos; idem para matérias-primas, ferramentas e funcionários; e
- Em termos de operações: problemas de qualidade requerem retrabalho; operações podem demandar tempo de pós-produção (cura, secagem, etc.); operações podem ter restrições para tamanhos de lote (quantidades mínimas de produção); operações podem ser feitas com recursos gargalos, demandando máxima utilização; operações podem demandar disponibilidade simultânea de vários recursos.

3.4.8 Medidas de Desempenho

Um sistema de avaliação de desempenho é um modo sistemático de avaliar entradas, saídas, eficiências e eficácias do processo de transformação de uma operação. Têm dois propósitos

principais: fornecer dados de desempenho que quando comparados a determinados padrões de referência, identificam desvios ou distorções que apoiam o processo de tomada de decisão; e influenciar comportamentos desejados nas pessoas e nas equipes de trabalho (CORRÊA, 2012).

Os padrões de referência podem se basear em padrões históricos (da própria empresa ou de outras empresas do setor), padrões de desempenhos arbitrários ou teóricos (conforme a percepção do avaliador), ou padrões absolutos (por exemplo: defeito zero, lote unitário).

Em operações de cadeia de suprimento, as medidas de desempenho devem avaliar a rede como um todo. Muitas vezes, as métricas locais e parciais tendem a levar a sub otimizações, onde elos da cadeia maximizam seu desempenho, mesmo que à custa do desempenho de outros elos (que disputam recursos entre si). O que ocorre é a redução do desempenho global devido a falta de sincronismo entre as atividades de suprimento, produção e distribuição.

As medições de desempenho não podem ser de dimensão única (financeira), mas devem representar de forma balanceada diferentes aspectos e prioridades competitivas da organização.

A Tabela 3-3 apresenta exemplos de métricas compatíveis com a indústria da construção civil, agrupadas segundo prioridades competitivas comuns as empresas desse setor.

Tabela 3-3 - Métricas de Desempenho

PRIORIDADE COMPETITIVA	MÉTRICA
CUSTO	Custos de manufatura; Produtividade da mão de obra / equipamento; Produtividade por unidade de produção; Produtividade por tipo de serviço; Produtividade total dos fatores; Taxa de despesas indiretas; Índice de refugos; Índice de retrabalho; Redução média de estoque por tipo de material; Custo relativo (%) de mão de obra / equipamentos / materiais; Redução média de tempos de preparação de equipamentos; Custos com terceirização.
QUALIDADE	Taxa de entregas perfeitas de fornecedores; Tempo médio entre falhas; Índice de disponibilidade de equipamentos / mão de obra; número de defeitos; Redução percentual de defeitos; Redução percentual de refugos; Custos dos processos de qualidade; Custo da não-qualidade; e qualidade dos fornecedores.
FLEXIBILIDADE	Frequências de entregas da operação; frequências de entregas do fornecedor; Tempo médio de preparação dos equipamentos; Tamanho médio dos lotes; nível de estoque em processo; e “lead time” dos fornecedores.
VELOCIDADE	“Lead times” internos; Tempos de ciclos de operação; Tempo médio de atravessamento de materiais; Distância percorrida pelos fluxos; e Tempos perdidos em atividades não agregadoras de valor.
CONFIABILIDADE	Acurácia de previsões de demanda; Percentual de entregas no prazo; Aderência às datas prometidas; Atraso médio; e Percentagem de redução de “lead time” nos processos de compra.

Fonte: adaptado de CORRÊA (2012)

3.5 SISTEMAS MULTIAGENTES - SMA

O sucesso de um projeto está intimamente ligado à efetivação de sua função de transferir as informações constantes nos seus expedientes: plantas, registros, detalhes, memoriais etc. E estes, logicamente, em conformidade com os anseios originários do cliente final (JACOSKI, 2003).

A declaração de Jacoski (2003) reforça a importância de se utilizar uma ferramenta capaz de transferir as informações disponíveis no projeto de engenharia às funções de planejamento logístico e de operações num ambiente de construção civil. Os Sistemas Multiagentes (SMA) são capazes de cumprir esta função.

Um SMA é caracterizado por um conjunto de agentes autônomos que cooperam, coordenam e negociam entre si (WOOLDRIDGE, 2002). Esse tipo de sistema é comumente utilizado em ambientes heterogêneos, onde a informação muda rapidamente, o que ocorre no domínio dos empreendimentos de construção civil, tanto no desenvolvimento de projetos de engenharia multidisciplinares quanto no planejamento de obras. Segundo Macal e North (2010), um SMA tipicamente possui três elementos:

- Um conjunto de agentes, seus atributos e comportamentos;
- Um conjunto de relacionamentos e métodos de interação, ou seja, uma topologia que estabelece que os agentes podem se comunicar entre si e qual a maneira desta comunicação ocorrer; e
- O ambiente dos agentes, de modo que o agente não interaja apenas com outros agentes, mas também com o ambiente em que se encontra.

Dentre os métodos de simulação atualmente empregados: métodos de eventos discretos, sistemas dinâmicos e simulação baseada em agentes, o último se destaca pela maior abrangência, variando de modelos mais detalhados, onde agentes representam objetos físicos a modelos altamente abstratos, onde agentes representam empresas ou governos concorrentes. A Figura 3-4 apresenta o nível de abstração de cada tipo de modelagem de simulação.

Ao contrário da simulação de eventos discretos e da simulação dinâmica, que são considerados como técnicas de modelagem *top-down*, a Simulação Baseada em Agentes

(SBA) é uma abordagem de modelagem *bottom-up*, na qual os elementos do modelo são construídos antes que o processo seja examinado como um todo (JABRI & ZAYED, 2017).

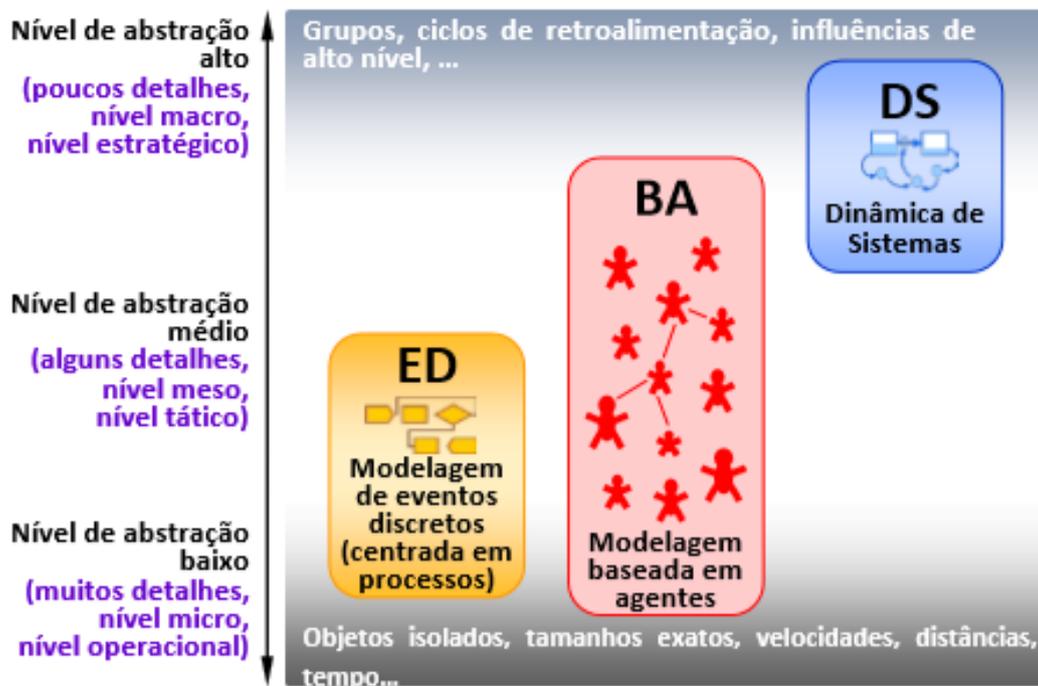


Figura 3-4 - Níveis de abstração dos métodos de simulação

Fonte: Big Book of Simulation Modeling, 2013

Os sistemas baseados em agentes são um tipo de SMA relativamente novo quando comparado com os outros dois tipos de modelagem. Esse tipo de modelagem dá ao modelador outra forma de ver o sistema:

“Você pode não saber como se comporta um sistema, ser capaz de identificar suas principais variáveis e dependências ou reconhecer um fluxo de processo, mas você pode ter noções de como os objetos do sistema se comportam. Se este for o caso, você pode começar a construir o modelo identificando os objetos (agentes) e definindo os seus comportamentos. Depois, você pode conectar os agentes criados e possibilitar que interajam entre si, ou colocá-los em um ambiente que tenha a sua própria dinâmica. O comportamento global do sistema surge de muitos (dezenas, centenas, milhares, milhões) comportamentos individuais concorrentes” (BORSHCHEY, 2013).

Agentes se comportam como entidades que têm a capacidade de controlar suas próprias ações com base em sua percepção de outros agentes e seus ambientes circundantes. Os agentes em um sistema baseado em agentes podem representar diversas coisas: veículos, peças de

equipamento, projetos, produtos, fábricas, uma ideia etc. Cada agente é designado um diagrama de estados e um conjunto de propriedades estáticas e dinâmicas (atributos e variáveis) para direcionar suas interações com o ambiente e com outros agentes. Desse modo, o comportamento dos agentes é representado pelo diagrama de estados; enquanto a comunicação fica a cargo do diagrama de mensagens.

O diagrama de estados (*statechart*) é a construção mais avançada para descrever o comportamento baseado em eventos e tempo. O diagrama é composto por estados e transições. As transições podem ser disparadas por condições definidas pelo usuário (tempos limite ou taxas, mensagens recebidas pelo gráfico de estado e condições booleanas). A execução da transição pode levar a uma mudança de estado.

Os estados no gráfico de estado podem ser hierárquicos, isto é, conter outros estados e transições. Este tipo de diagrama permite capturar visualmente uma ampla variedade de comportamentos discretos, muito mais ricos do que apenas o status ocioso / ocupado, aberto / fechado ou para cima / baixo oferecido pela maioria das ferramentas baseadas em blocos. Os diagramas de estados podem ser elaborados diretamente em alguns softwares de simulação, tal como o *Anylogic*. A Figura 3-5 apresenta um exemplo de um diagrama de estados.

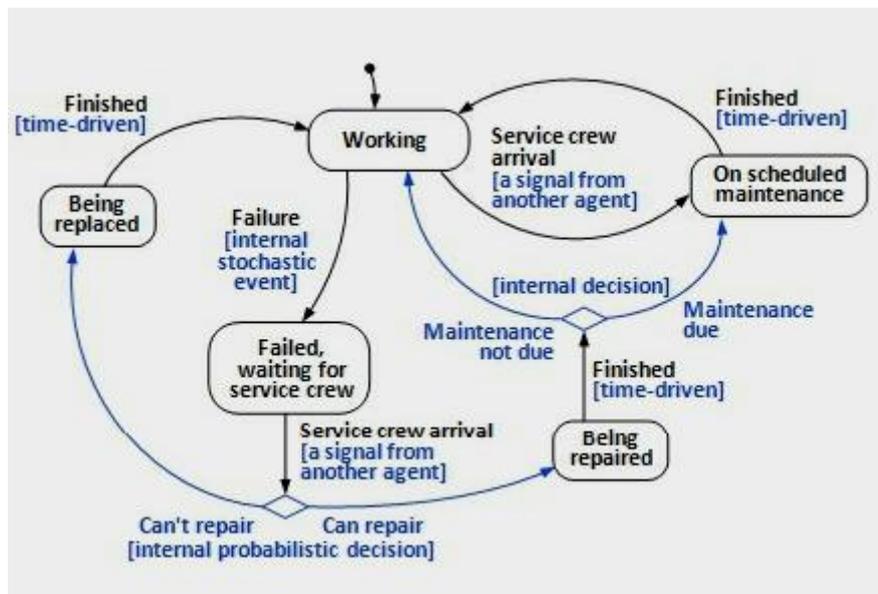


Figura 3-5 - Diagrama de Estados do Agente "Service Crew"

Fonte: Big Book of Simulation Modeling, 2013

Um diagrama de mensagem, por sua vez, é um tipo de documento informal (não faz parte dos pacotes de simulação) que auxilia o modelador a entender e a operacionalizar a comunicação

4 DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO CONCEITUAL PARA O PLANEJAMENTO LOGÍSTICO INTEGRADO

4.1 INTRODUÇÃO

A construção de uma nova metodologia de planejamento logístico e de planejamento de projetos de infraestrutura de forma integrada, objetivo principal desta pesquisa, depende da correta descrição ou representação de um objeto ou problema de decisão. Aqui, o objeto em estudo é a própria obra de infraestrutura, seus processos e fluxos; já o problema de decisão corresponde ao planejamento de sua execução, com foco na programação de suas atividades.

Por se tratar de um problema complexo, as dificuldades enfrentadas pelos planejadores (ou tomadores de decisão) podem ser resolvidas por vários cursos de ação possíveis. A avaliação dessas alternativas e a escolha do melhor curso de ação representam a essência da análise de decisão (RAGSDALE, 2009).

É comum se utilizar de uma modelagem para a tomada de decisão. Modelos são versões simplificadas do objeto ou dos problemas de decisão que representam. Porém, para serem considerados válidos, devem representar de maneira precisa as características relevantes do “objeto problema”. Também, normalmente, fornecem as informações necessárias no tempo certo, ainda na fase de planejamento, onde os custos de readequação são mais baixos (RAGSDALE, 2009). Contudo, de todas as vantagens de se utilizar um modelo, aquela que certamente mais interessa ao presente estudo é sua capacidade de gerar conhecimento e entendimento sobre o objeto ou o problema de decisão que está sendo investigado.

O próprio processo de criação de um modelo (ou caso) já permite identificar e discutir suas variáveis de entrada, seus objetos, os processamentos e as relações necessárias ao funcionamento do modelo, e suas saídas. Neste contexto, convém definir algumas premissas e condições de contorno que nortearão o presente estudo, relacionados à construção de um modelo:

- Dentre os tipos de projetos de infraestrutura existentes, serão modelados os de implantação rodoviária. Essas obras representam o subgrupo mais importante no país dentro dos projetos de infraestrutura, quer seja pela quantidade e variedade de serviços

envolvidos ou pelos montantes de recursos públicos aplicados. A própria distribuição atual da matriz de transportes brasileira corrobora essa afirmação.

- As principais disciplinas que compõem o projeto desse tipo de empreendimento (terraplenagem, drenagem, pavimentação, sinalização, obras complementares, proteção ambiental) são as mesmas dos outros tipos de obras de infraestrutura tais como ferrovias, aeroportos, saneamento, obras de terra etc. Os conhecimentos gerados no estudo desses tipos de empreendimento podem ser, portanto, facilmente extrapolados aos outros tipos de obras.
- As informações relativas ao empreendimento serão obtidas ora a partir do estudo dos projetos executivos de engenharia, aprovados por órgãos responsáveis, ora através de visita técnica de reconhecimento do local da obra.
- O modelo a ser construído terá como base uma obra rodoviária com o seu projeto de engenharia elaborado e aprovado. O projeto aprovado de engenharia já possui um cronograma de referência. Este cronograma servirá de linha de base para comparação dos resultados da modelagem.
- Serão considerados apenas aspectos relevantes ao planejamento de tempo do empreendimento. O orçamento será abordado de forma superficial, restrito à Função Objetivo para decisão de localização de instalações e seleção de fornecedores. Não faz parte do escopo da tese a orçamentação do empreendimento.
- O cronograma de referência serve para permitir a contratação de construtoras ou a licitação, no caso de obras públicas. Assim, ao assinar o contrato a construtora se compromete a cumprir com o cronograma de referência (duração da obra prevista), e ainda manter a sequência de ações (plano de ataque) previsto. É comum o órgão contratante solicitar que a construtora, ao iniciar a execução, apresente o seu cronograma detalhado de execução, adaptado às suas particularidades e expertise. Trata-se do cronograma executivo.
- O cronograma executivo será o objetivo e principal produto do modelo a ser construído e permitirá a empresa considerar outros aspectos relevantes ao planejamento do tempo, tornando viável o compromisso assumido na assinatura do contrato e buscando também vantagens financeiras a partir da otimização dos processos construtivos.
- O cronograma resultante desse planejamento deverá atender, sempre que possível, as premissas do projeto original de engenharia e, conseqüentemente do seu cronograma físico, determinando quais as atividades serão executadas, qual a sequência de execução

prevista, quais recursos serão necessários, em que momento atuará, onde serão localizados e qual a duração de cada atividade.

4.2 A ESTRUTURA ANALÍTICA DE SERVIÇOS DE OBRAS RODOVIÁRIAS

De acordo com o Manual de Custos Rodoviários do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2003) a estrutura de custo de uma obra de engenharia rodoviária se divide em oito disciplinas principais: Terraplenagem (escavação, carga e transporte de solo); Obras de Arte Corrente (bueiros e drenos profundos); Obras de Arte Especiais (pontes e viadutos); Proteção Ambiental e Contenções (enleivamento, plantio de grama, muro gabião); Pavimentação (sub-base, base e revestimento), Drenagem Superficial (valetas e sarjetas); Sinalização (horizontal e vertical) e Serviços Complementares (cercas, defensas e barreiras).

Essas disciplinas possuem uma sequência construtiva que independe da localização ou da extensão da rodovia a ser implantada, conforme indicada na Figura 4-1, a seguir. Cada uma dessas disciplinas engloba diversos serviços de engenharia. Os principais serviços de cada disciplina estão apresentados na Figura 4-2.

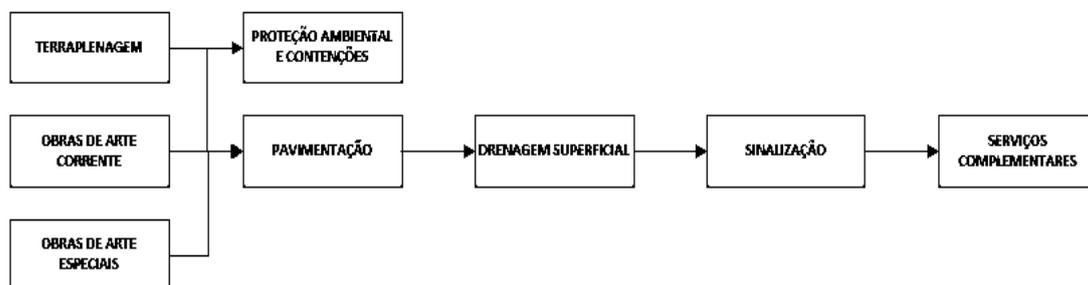


Figura 4-1 – Sequência Construtiva de Obras Rodoviárias

Uma premissa utilizada no presente trabalho foi a de que apenas as disciplinas de maior complexidade de cadeia de suprimentos e de execução seriam modeladas a fim de simplificar o entendimento do modelo, tornando-o mais flexível e sensível à mudança de cenários e extrapolações. Optou-se então, por modelar as disciplinas de Terraplenagem; Obras de Arte correntes; Pavimentação: camadas de Sub-Base e Base, Imprimação, e Revestimento Asfáltico em CBUQ (camadas de *binder*¹⁸ e capa).

¹⁸ Camada constituída por material asfáltico de granulometria mais aberta e de menor custo construtivo que serve de ligação entre a camada de base e a capa asfáltica de rolamento.

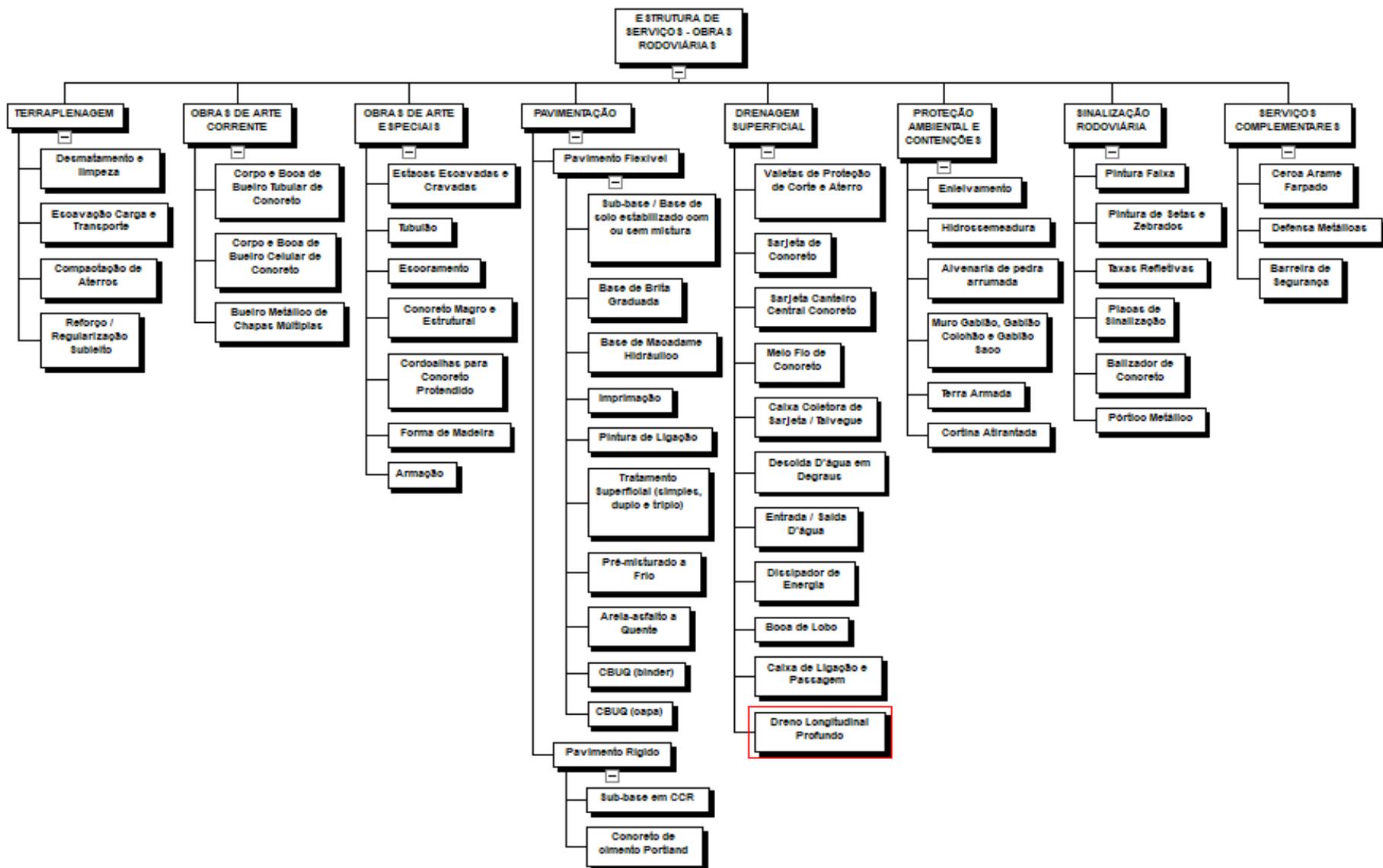


Figura 4-2 - Estrutura de Serviços – Obras Rodoviárias

4.2.1 Disciplina: Terraplenagem

A disciplina terraplenagem agrupa as operações de movimentação de terra através dos serviços principais de escavação, carregamento ou carga, transporte, descarregamento ou descarga, espalhamento e compactação de aterros. Os aterros no terraplenagem são obtidos através da compactação de solo em camadas justapostas. Esse solo não precisa ter resistência mecânica elevada já que serve apenas de fundação para as camadas mais nobres de pavimento.



Figura 4-3 – Serviços de Escavação e Carga e Compactação de Aterro
Fonte: [https:// www.altafloresta.mt.gov.br](https://www.altafloresta.mt.gov.br)

A movimentação de terra busca atingir a nova conformação da plataforma que servirá de base para a pista a ser construída. Essa nova conformação é projetada em três dimensões, mas representada no projeto em 2D através de um traçado horizontal (projeção em planta que representa as curvas horizontais do traçado) e de um eixo longitudinal (ou greide) que representa as elevações e depressões do traçado.

O que se procura no projeto de terraplenagem é a compensação entre cortes e aterros de modo a evitar a importação de material de fora da faixa de domínio da rodovia, o que encarece e atrasa a obra, além de dificultar seu licenciamento ambiental. Quando não ocorre o equilíbrio entre o volume escavado e o compactado no eixo da rodovia, há que se recorrer a importação de material oriundo de caixas de empréstimo dentro da faixa de domínio da rodovia (portanto de propriedade da União) ou em último caso, de jazidas (fontes) de solo que são áreas particulares que deverão ser indenizadas.

Essas jazidas e áreas de empréstimo são levantadas pela equipe de topografia e testadas em laboratório durante a fase de estudos geotécnicos, uma das etapas da elaboração do projeto de engenharia. Essas fontes de material são numeradas pela sua localização, seguindo o mesmo sentido da execução do terraplenagem. Assim, considerando que a execução dos aterros seja feita no sentido crescente das estacas, a Jazida 1 será aquela fonte de material, dentre as indicadas no projeto, mais próxima da estaca inicial da obra.

No caso dos serviços de terraplenagem, considerando que todas as atividades relacionadas a movimentação de terra culminam na produção de aterros compactados, é fácil notar que o fluxo do solo é o principal insumo e que nesse caso a cadeia logística se resume as etapas de suprimento e de distribuição, pois não há a necessidade de usinagem do solo sendo ele aplicado no aterro assim como é extraído, sem qualquer transformação. A Figura 4-4 ilustra as operações de suprimento (escavação em cortes, caixas de empréstimo ou jazidas e estocagem no local de extração) e distribuição do solo (transporte em caminhões basculantes até as equipes de compactação de aterro).

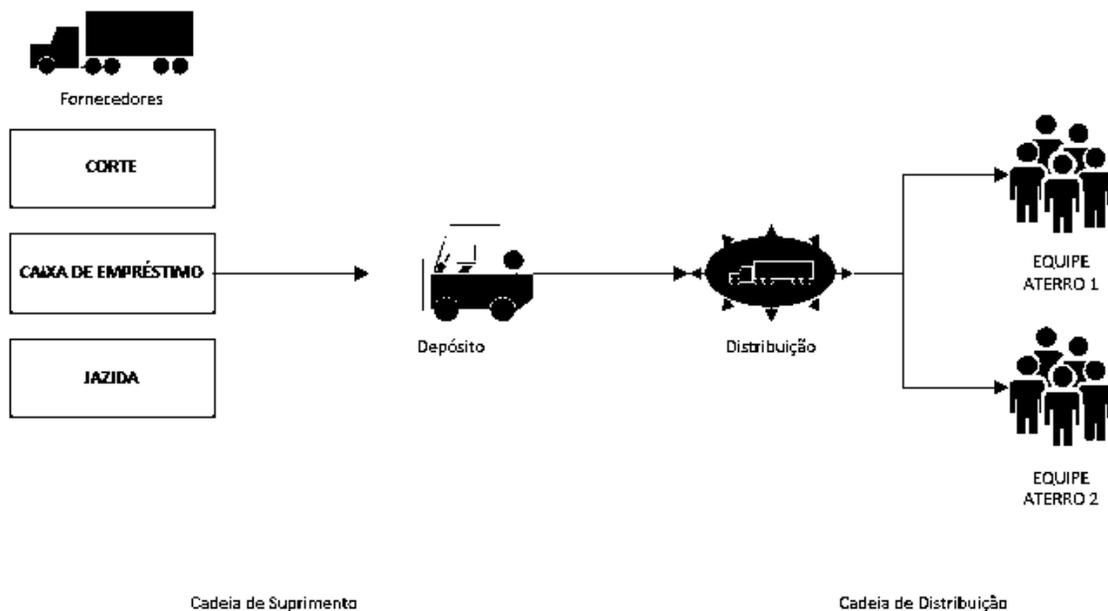


Figura 4-4 – Cadeia de Suprimentos da Terraplenagem

Convém esclarecer que o modelo adota como premissa que o volume de material previsto no projeto para ser extraído de cada fonte é compatível com a quantidade de material disponível no

local. Essa análise é realizada antes, por ocasião do projeto de terraplenagem que, dentre outras coisas, busca minimizar os deslocamentos de transporte do solo, procurando aquela fonte mais próxima ao aterro para extrair a quantidade de solo previsto. Caso uma fonte não possua a quantidade necessária de material para o aterro, esta deverá ser completada com a segunda fonte mais próxima e, assim, sucessivamente.

No caso do terraplenagem, a solução encontrada para a modelagem da produção é mais complexa que as outras disciplinas até porque busca resolver uma fragilidade da metodologia tradicional de planejamento do tempo em obras de infraestrutura, já que o cronograma pressupõe que a quantidade de escavação ou aterro é linear, distribuída por um volume médio por quilômetro. Porém, isso na prática não se valida, devido a que a produção necessária de terraplenagem difere expressivamente a cada quilômetro de rodovia projetada.

Assim, por exemplo, o primeiro quilômetro de uma rodovia pode demandar um volume de aterro 10, 15, 20 vezes superior ao segundo quilômetro, sem qualquer regra. Ou seja, o volume de escavação e de aterro necessário por quilômetro de rodovia não apresenta qualquer linearidade ou modelo de previsão. Diferente do que acontece, por exemplo, na execução da pavimentação, onde a quantidade de serviço por quilometro é facilmente calculada dependendo apenas da geometria proposta no projeto de engenharia (largura da plataforma x espessura da camada).

Na prática, ao decidir, partindo dessa premissa, por “atacar” uma determinada extensão de terraplenagem o planejador estima um tempo médio de execução a fim de liberar frente de serviço para a execução da sub-base. Se nesse trecho o volume de escavação ou aterro necessário variar muito em relação à média adotada no planejamento (o que é extremamente provável), a frente de serviço para sub-base não estará disponível no momento planejado. Considerando a característica de horizontalidade e de repetitividade comum as obras de infraestrutura, isso afetará o caminho crítico da obra, atrasando de forma drástica e muitas vezes irreversível sua conclusão¹⁹.

¹⁹ Na opinião deste autor essa é a principal razão do atraso observado em projetos de infraestrutura: o cronograma inicialmente elaborado é inexecutável, principalmente por não ter considerado a variação de volume de terraplenagem prevista no projeto de engenharia.

A Figura 4-5 demonstra esse problema. A título de esclarecimento o gráfico pode ser interpretado da seguinte maneira: uma frente de serviço de 0,30 km será liberada quando a produção de aterro atingir 1.858,74 m³. Somente quando a produção acumulada alcançar 5.935,80 m³ será liberada a terraplenagem mais 1,66 km, perfazendo uma extensão total de terraplenagem finalizada de 1,96 km, e assim sucessivamente.

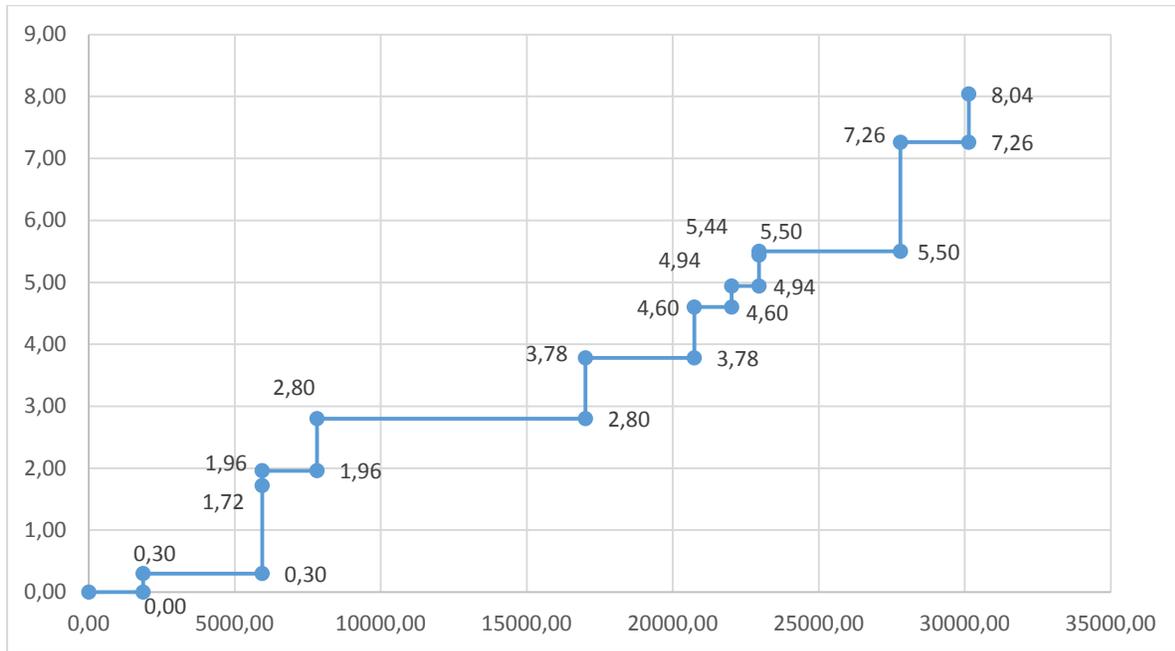


Figura 4-5 – Avanço Terraplenagem m³ x km

No modelo proposto nessa pesquisa, essa constatação foi equacionada através do emprego de uma tabela que calcula o volume de aterro necessário a cada segmento homogêneo da rodovia, e relaciona esse volume a uma extensão de frente de terraplenagem concluída, com o intuito que seja liberado a execução da sub-base. Assim, por exemplo, o primeiro segmento homogêneo estará apto a receber a equipe de sub-base quando for concluído o volume de aterro calculado na tabela.

4.2.2 Disciplina: Obras de Arte Corrente

Obras de arte correntes são dispositivos de transposição de cursos d'água denominados bueiros, instalados no fundo dos talwegues e que, atendem a cursos d'água perenes ou não. Sua função é canalizar e direcionar esses cursos d'água permitindo que atravessem a plataforma da rodovia

sem interferir no tráfego. Por razões construtivas e estruturais podem ser pré-moldados ou moldados “in loco”. São construídos em seções geometricamente definidas, na forma de círculos, retângulos ou quadrados, podendo ser executados em linhas simples, duplas ou triplas, de acordo com a vazão de projeto calculada.

As obras de arte corrente podem ser construídas em chapas metálicas (bueiros metálicos), tubos de concreto armado (bueiros tubulares) ou em células (bueiros celulares). São assentados sobre berços de concreto magro²⁰ ou ciclópico²¹ e suas extremidades são providas de extremidades (bocas) formadas por alas, testas e calçadas, também em concreto armado, constituindo-se numa peça única.



Figura 4-6 – Serviço de Construção de Bueiro Tubular e Celular
Fonte: [https:// www.altafloresta.mt.gov.br](https://www.altafloresta.mt.gov.br)

Os bueiros são executados logo após a limpeza da faixa de domínio, anteriormente ou em paralelo à terraplenagem. Tanto os bueiros quanto a terraplenagem são atividades predecessoras a execução das camadas de pavimento. Os materiais necessários a construção desses bueiros são o concreto magro de cimento Portland e os tubos pré-moldados para o corpo dos bueiros; concreto de cimento Portland, forma e armação para as extremidades (bocas). Assim, a produção de

²⁰ Concreto magro é um tipo de concreto não estrutural com pouco cimento em sua composição (por volta de 100 kg/m³) utilizado com a função de impermeabilizar e/ou nivelar o fundo do terreno natural, evitando assim o contato direto da estrutura de concreto com o solo.

²¹ Concreto ciclópico é um tipo de concreto não estrutural formado por uma argamassa de cimento e areia e pedra de mão, ao invés da brita. O volume ocupado pelas pedras de mão diminui o consumo de cimento, reduzindo o custo do concreto. Sua função é a mesma do concreto magro.

concreto da Usina de Concreto (UC) é dividida para atender a fabricação de tubos pré-moldados que compõem o corpo dos bueiros tubulares e o concreto usinado usado no berço e nas bocas dos bueiros tubulares.

No caso dos bueiros tubulares, deve ser considerado que para cada tipo ou tamanho de bueiro existe um consumo correspondente de concreto. Essa informação encontra-se disponível nos projetos de engenharia. Por simplificação, optou-se por considerar no presente trabalho apenas um tipo de bueiro – o Bueiro Simples Tubular de Concreto (BSTC) com diâmetro de 1,0 m. Os demais tipos de bueiros terão seus comprimentos transformados em comprimentos equivalentes ao de um BSTC 1,0 m. O critério de transformação escolhido foi a área da seção transversal. A Tabela 4-1 apresenta o comprimento equivalente de alguns dos tipos mais comuns de bueiros tubulares e celulares.

Tabela 4-1 – Comprimento Equivalente de Bueiros

DISCRIMINAÇÃO	ÁREA SEÇÃO TRANSVERSAL (m²)	COMPRIMENTO EQUIVALENTE
Bueiro Simples Tubular de Concreto (BSTC) - d = 1,0 m	0,79	1,0
Bueiro Duplo Tubular de Concreto (BDTC) - d = 1,0 m	1,58	2,0
Bueiro Triplo Tubular de Concreto (BTTC) - d = 1,0 m	2,37	3,0
Bueiro Simples Tubular de Concreto (BSTC) - d = 1,5 m	1,77	2,24
Bueiro Simples Celular de Concreto (BSCC) - d = 1,5 x 1,5 m	2,25	2,85
Bueiro Duplo Celular de Concreto (BDCC) - d = 3,0 x 3,0 m	18,0	22,78
Bueiro Triplo Celular de Concreto (BTCC) - d = 1,5 x 1,5 m	6,75	8,54

4.2.3 Disciplina: Pavimentação: Camadas de Sub-Base e Base

A disciplina pavimentação engloba a execução das diversas camadas que compõem a estrutura projetada para o pavimento. O serviço de pavimentação é realizado após concluída a terraplenagem. Corresponde a execução de camadas de regularização ou reforço do subleito, sub-base, base, imprimção, pintura de ligação e revestimento. Para os serviços de pavimentação destacam-se duas cadeias de suprimentos distintas: uma para as camadas de sub-base e de base de solo estabilizado com ou sem mistura e, outra para a execução do revestimento, seja ele asfáltico (pavimento flexível) ou em concreto de cimento Portland (pavimento rígido). Neste trabalho serão priorizadas a execução de sub-base e base com mistura e o revestimento asfáltico.

As camadas inferiores (reforço subleito, sub-base e base) podem ser projetadas prevendo a utilização de solo de boa qualidade ou ainda a mistura de solo-brita, solo-brita-areia ou ainda a mistura de diferentes granulometrias de brita. Essas camadas granulares têm a função estrutural de distribuir os esforços recebidos do revestimento asfáltico às camadas de terraplenagem ou ao terreno natural. A divisão do pavimento em camadas justapostas visa a economicidade, pois aumenta gradativamente a qualidade e, conseqüentemente, o custo do material utilizado. Isso se deve ao fato de que, quanto mais próximo das últimas camadas do pavimento, maior a influência das cargas móveis impostas pelo tráfego da rodovia e desse modo maior a necessidade de resistência do material empregado.



Figura 4-7 – Serviço de Compactação de Base de Brita Graduada - BGS
Fonte: [https:// www.roadexperts.com](https://www.roadexperts.com)

Acima da base é necessária a aplicação de uma camada de um tipo de asfalto diluído de cura média – o CM-30. Esse serviço, conhecido como imprimação da base oferece a essa camada tanto um ganho de resistência devido a sua impregnação na camada inferior quanto a impermeabilização da superfície. Essa impermeabilização é imprescindível para proteger as camadas inferiores (principalmente as de solo) da ação da água que escoar superficialmente na rodovia, oriunda das precipitações atmosféricas.

Já a pintura de ligação é necessária quando a camada de revestimento asfáltico é projetada para ser executada em duas etapas. A aplicação de uma emulsão asfáltica de cura rápida como o RR-2C liga as camadas de revestimento asfáltico, evitando o deslizamento entre elas. As camadas de

revestimento asfáltico ou de concreto de cimento Portland tem a função estrutural de resistir à pressão exercida pelos pneus dos veículos que trafegam na rodovia. O dimensionamento dessas camadas é função, dentre outros fatores, do volume de tráfego atual e futuro, da composição desse tráfego (percentual de veículos pesados) e da resistência (CBR) do subleito.

A cadeia de suprimentos para a execução de sub-base e de base com mistura apresenta-se completa. O fornecimento de materiais tais como areia, solo e brita, que compõem a mistura a ser compactada, é obtido a partir de fornecedores primários (extração direta em areais, jazidas de solo e pedreiras) ou de fornecedores secundários (empresas que vendem areia e brita comercial). Essas fontes de material constam na pesquisa de campo realizada durante a elaboração do projeto de engenharia.

A etapa de produção, nesse caso, consiste na usinagem, em Usinas de Solo (US), da mistura de solo, areia e brita que, em diferentes percentuais, formarão a sub-base e a base. Esses materiais são estocados usualmente nas US. A seleção do local de instalação da US deve considerar dentre outros fatores a distância de transporte dos insumos à usina e dos produtos usinados às equipes de trabalho; a facilidade de acesso e de manobra dos equipamentos e veículos de transporte; e a capacidade de estoque dos insumos e do produto usinado, se for o caso.



Figura 4-8 – Usina de Solos Móvel
Fonte: [https:// www.margui.com.br](https://www.margui.com.br)

A capacidade da US escolhida deve ser compatível com a demanda de produtos usinados de forma que possua certa capacidade ociosa. Essa folga permitirá absorver as variações de

produtividade naturais ao processo de produção. Pedidos de suprimento são emitidos à medida que se atinge um estoque mínimo.

A etapa de distribuição corresponde ao transporte do produto usinado, ou seja, da mistura solo-brita-areia aos locais de aplicação ao longo da rodovia. O que se pretende com essa cadeia de suprimentos é atingir um nível de serviço logístico satisfatório²² capaz de permitir a continuidade da execução das camadas de pavimentação. A

Figura 4-9 ilustra a cadeia de suprimentos da sub-base e base.

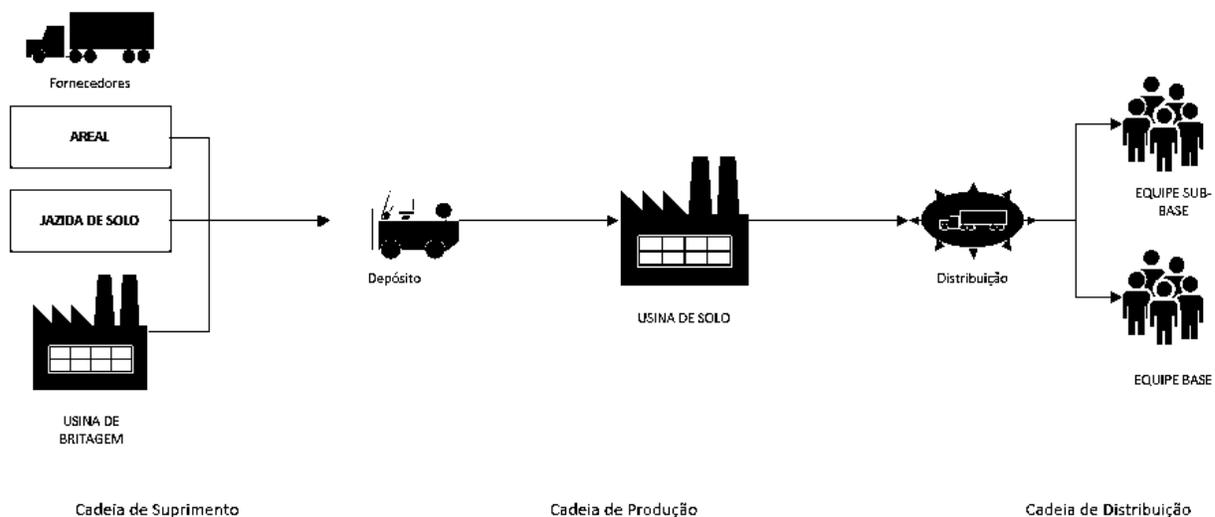


Figura 4-9 – Cadeia de Suprimentos Sub-base e Base

A produção de sub-base e base é bastante simplificada quando comparado com a de terraplenagem. Isso se deve ao fato de que a quantidade de material necessário por quilômetro de rodovia é fixa. Então se adotou como premissa que a produção das camadas de pavimentação será “puxada” pela produção de terraplenagem. A única limitação então é a capacidade de usinagem de mistura da usina considerada.

²² Nível de serviço logístico é a qualidade com que um fluxo de materiais e serviços é administrado para o atendimento das necessidades dos clientes aos menores custos possíveis. Nesse caso os clientes da cadeia logística são as equipes de trabalho que dependem do recebimento de insumos ou produtos usinados nas quantidades certas e no momento certo.

4.2.4 Disciplina: Pavimentação: Camada de Revestimento Asfáltico – CBUQ

A modelagem da camada de revestimento asfáltico em Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) apresenta a mesma estrutura das camadas de sub-base e base. O que difere são os insumos utilizados na mistura que resulta no CBUQ. Neste caso, são necessários o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), areia e brita. O módulo de produção corresponde a usinagem do CBUQ em uma usina específica, a Usina de Asfalto (UA).



Figura 4-10 – Usina de Asfalto Móvel

Fonte: [https:// www.ciber.com.br](https://www.ciber.com.br)

A aquisição do CAP é feita a partir das poucas refinarias de petróleo espalhadas pelo país, assim, o fornecimento desse insumo é feito por um único fornecedor para todo o trecho, que por geral, sempre costuma estar longe da obra que está sendo construída, isso impacta nos custos de transportes e na obra como um todo, porque tem-se que percorrer longas distâncias para transportar esse material.

Nesse aspecto é fundamental a etapa de localização e dimensionamento da usina, que além de seguir os mesmos critérios de seleção indicados para a localização das Usinas de Solos tem que alertar para a minimização dos custos de transporte considerando um adequado dimensionamento dos veículos para diminuir o número de viagens. No entanto, tem-se um problema de *trade-off* entre o tamanho dos lotes transportados pelos veículos, a capacidade de produção da usina e o desempenho das equipes de trabalho.



Figura 4-11 – Lançamento de CBUQ
Fonte: twitter.com

4.3 PLANEJAMENTO LOGÍSTICO INTEGRADO EM PROJETOS DE INFRAESTRUTURA

Como foi ressaltado nos capítulos anteriores, a indústria da construção civil apresenta o produto acabado (uma rodovia, um edifício etc.) imóvel enquanto os recursos e as unidades de produção é que se deslocam ao longo do produto; além de grande variedade e volume dos insumos de produção aliada a alta complexidade do sistema produtivo. Devido a estas especificidades, a modelagem desse tipo de problema passa obrigatoriamente pelo entendimento do fluxo de materiais de construção, desde seu fornecimento, beneficiamento em unidades fabris até a sua aplicação direta ou como um produto usinado pelas equipes de trabalho, considerando a integração das partes que compõem a cadeia logística envolvida nessas atividades.

Recriando a Figura 1-2 - Cadeia logística obras rodoviárias, nesse capítulo para subsidiar na concepção da nova modelagem, observa-se que a cadeia logística de obras rodoviárias compreende três principais etapas: a cadeia de suprimentos, a cadeia de produção e a cadeia de distribuição. Em cada uma dessas etapas é apresentado o fluxo de insumos e de materiais usinados, sejam componentes ou produtos acabados, ao longo dos agentes que compõem essa cadeia produtiva (Figura 4-12).

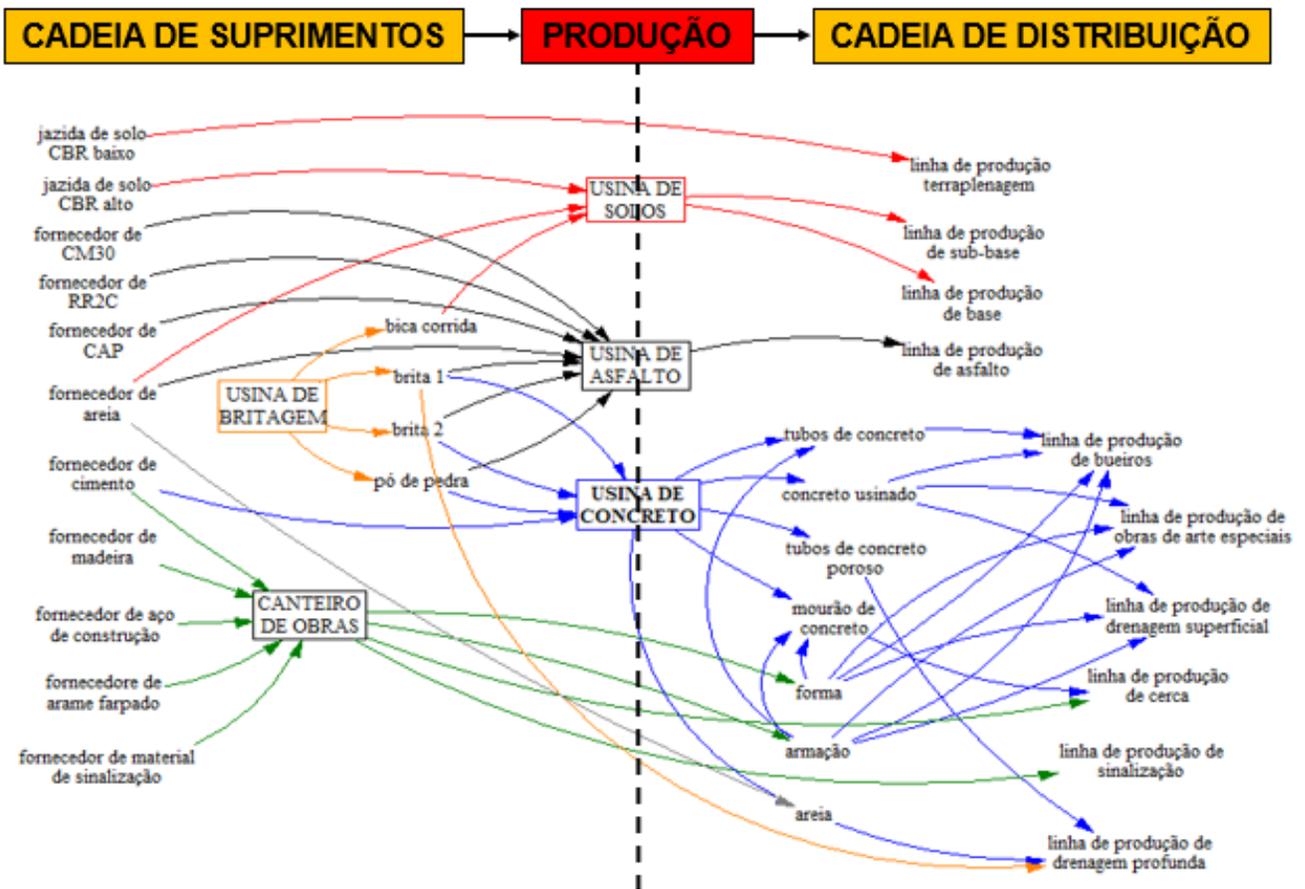


Figura 4-12 - Cadeia Logística Obras Rodoviárias

Na cadeia logística de suprimento de obras rodoviárias estão os fornecedores de insumos básicos que abastecem as unidades de produção de materiais básicos de construção (cimento, areia, solo, brita etc.) ou de produtos já manufaturados (tubos de concreto, madeira para forma, aço de construção, arame farpado e material asfáltico). Também estão discriminadas as jazidas de solo e de areia.

No desenho da cadeia logística de produção estão relacionados o canteiro de trabalho, as usinas de britagem, de concreto, de solo e de asfalto. No entanto, o canteiro de trabalho e a usina de britagem são unidades de produção intermediárias, localizadas entre o fornecimento de insumos e as unidades de produção propriamente ditas, pelas produzirem componentes e outros insumos básicos a essas unidades de produção (usinas).

Dessa forma, os canteiros de trabalho possuem dupla função logística: concentram o recebimento e armazenagem de todos os recursos produtivos (equipamentos de engenharia, mão de obra, insumos básicos etc.) e transformam insumos básicos em componentes de outros produtos. É o que acontece, por exemplo, nas centrais de produção de forma e de armação, onde peças de madeira e barras de aço são transformadas em formas e armação utilizadas na fabricação de estruturas de concreto armado e outros componentes como pré-fabricados de concreto.

As unidades de produção são as fábricas (usinas) que transformam materiais básicos de construção ou produtos manufaturados em produtos usinados tais como solo-brita (mistura de solo, brita e areia) para sub-base ou base, concreto de cimento (mistura de cimento Portland, areia e brita), concreto asfáltico (mistura de cimento asfáltico, areia e brita), artefatos de concreto (mistura de concreto de cimento fresco, aço de construção moldados em formas de madeira) etc. Em cada usina existe uma área limitada destinada ao estoque tanto de materiais básicos de construção quanto de produtos usinados. Cada usina pode produzir vários produtos diferentes.

Já as equipes de trabalho correspondem aos clientes da indústria seriada. Eles recebem tanto os produtos usinados quanto materiais básicos de construção e os aplicam diretamente no terreno a fim de produzir os serviços de engenharia necessários a construção da obra de infraestrutura.

O sincronismo e a fluidez desejada dos materiais ao longo da cadeia logística apresentada são afetados por diversos fatores. Alguns desses fatores são restrições existentes ao projeto, com as quais o planejador precisa conviver; outros dependem de decisões de longo, médio ou curto prazo do planejador. Dentre as principais variáveis que afetam o fluxo de materiais podem-se destacar:

- Fatores climáticos;
- Número de fornecedores;
- Proximidade a grandes centros;
- Quantidade e capacidade das vias de acesso;
- Quantidade de equipes alocadas;
- Capacidade e número de unidades de produção;
- Disponibilidade e grau de adestramento dos recursos humanos;
- Turno de trabalho;

- Falhas e quebras dos equipamentos de engenharia (incluindo as usinas);
- Sequenciamento obrigatório entre os serviços; e
- Frentes de trabalho disponíveis etc.

Com o intuito de simplificar a modelagem da rede logística de suprimentos de uma obra rodoviária, as unidades de produção foram consideradas como “caixas pretas” assim, como os fatores que as afetam. Isso foi com o propósito de evitar o desvio de atenção do tema principal dessa pesquisa, assim, a pesquisa não contempla o detalhamento do ciclo interno dos processos das unidades de produção, nem das equipes de trabalho.

A única exceção foi em relação às falhas dos equipamentos de engenharia. Nesse caso, considera-se que boa parte da variabilidade observada no fluxo de materiais se deve justamente a logística envolvida na aquisição e estocagem de peças de reposição e na disponibilidade de equipes de manutenção. Essa variabilidade foi identificada e descrita nos capítulos iniciais desta tese como um dos fatores determinantes da produtividade da cadeia produtiva.

4.4 MODELO CONCEITUAL PROPOSTO PARA O PLANEJAMENTO LOGÍSTICO INTEGRADO À PROGRAMAÇÃO DE PROJETOS DE INFRAESTRUTURA

Na etapa anterior apresentou-se o fluxograma geral da rede logística de suprimentos para uma obra rodoviária, descrevendo os principais nós da rede, representados pelas fontes de suprimentos, unidades de produção etc. No entanto, não foram especificadas, claramente, as entidades que compõem os arcos, que fazem que esses nós se inter-relacionem entre eles e façam fluir fluentemente os produtos físicos ao longo da cadeia logística e produtiva da construção.

Para que os produtos físicos possam fluir de forma coordenada, integrada e sincronizada ao longo da rede, além do transporte é necessária uma ótima rede de comunicação e de informação logística gerencial e operacional que harmonize as demandas com as ofertas e atenda aos requisitos dos diferentes agentes envolvidos no processo de planejamento, gerenciamento, controle e operação/construção da obra rodoviária.

Inicialmente, nesse item, apresenta-se a modelagem conceitual lógica do sistema logístico, utilizando fluxogramas e diagramas que representem esses relacionamentos entre as fases do projeto de engenharia e os processos logísticos, assim também, como as etapas de desenvolvimento da metodologia proposta. Essa modelagem conceitual e lógica é importante para estruturar o programa computacional de simulação que testará a nova metodologia de planejamento logístico integrado ao projeto de engenharia.

Assim, cada etapa da metodologia considerou-se um subsistema para simplificar e modular os requisitos de informações necessários para o bom funcionamento do sistema logístico, tal como é mostrado na Figura 4-13 e na Figura 4-14. Em cada subsistema procurou-se descrever todas as etapas e atividades possíveis de serem realizadas, priorizando as mais relevantes nesse caso, para fins didáticos quanto a concepção da modelagem. Uma vez que o modelo seja testado e validado, outras atividades poderão ser agregadas. Conforme as particularidades de cada projeto, o planejador deverá avaliar e escolher o subconjunto dessas atividades que melhor se adéquam ao empreendimento em análise.

4.4.1 Subsistema 1 – Obtenção e preparação de dados

A obtenção e preparação de dados divide-se nas atividades de coleta e processamento de dados do projeto de engenharia, da cadeia de suprimento e de dados complementares georreferenciados. Assim, o subsistema de obtenção e preparação de dados corresponde ao módulo de previsão que compõe o escopo do Planejamento Hierárquico da Produção (ver Capítulo 3). Esse módulo antecede aos módulos de Planejamento da Capacidade/Fábrica e Planejamento da Força de Trabalho existentes no nível de planejamento estratégico.

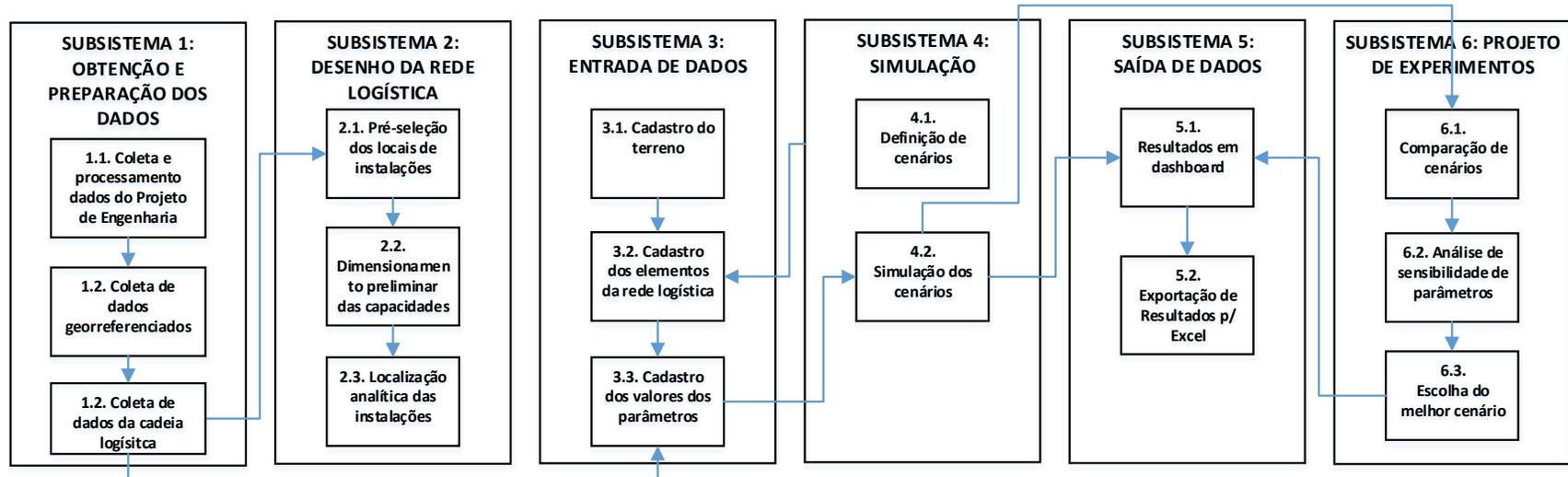


Figura 4-13 - Subsistemas e Processos

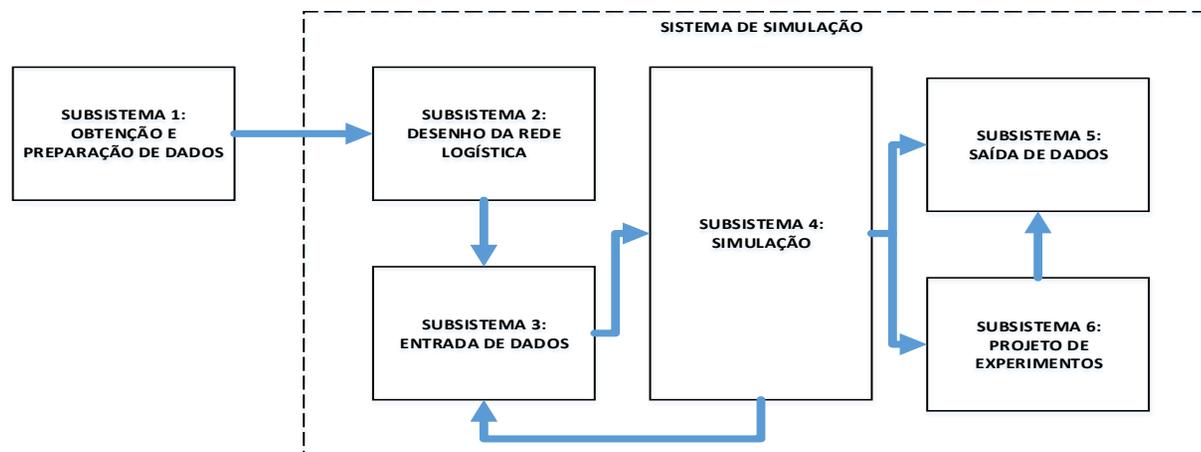


Figura 4-14 Divisão do Modelo Proposto em Subsistemas

Os dados do projeto de engenharia incluem:

- O projeto geométrico, vertical e horizontal, da rodovia projetada: pontos de inflexão horizontais e verticais e curvas horizontais e verticais;
- O projeto de terraplenagem: localização e volumes disponíveis nas fontes de material levantadas na fase de projeto, localização dos cortes e dos aterros previstos, origem-destino do material de aterro;
- Quantidade, localização e capacidades instaladas das unidades de produção (UP): usinas de solo, concreto e asfalto; as centrais de extração de areia e de britagem; as centrais de formas e de armação; as fábricas de pré-moldados de concreto;
- Localização e dimensão do canteiro de obras previsto;
- Localização e capacidade dos depósitos intermediários e finais;
- Quantidade e localização dos principais dispositivos a serem construídos (pontes, viadutos, bueiros, elementos de drenagem superficial, elementos de sinalização etc.); e
- Elementos relevantes do projeto ambiental (áreas de proteção permanente, áreas indígenas; reservas legais, buffers etc.).

Os dados da cadeia de suprimento incluem:

- Localização, quantidade e capacidade dos fornecedores;
- Matriz OD dos materiais de construção (cadeia de abastecimento) e dos produtos usinados (cadeia de distribuição);
- Número de viagens por OD e por tipo de material;
- Mapeamento de processos produtivos e das atividades logísticas das UP;
- Mapeamento do fluxo de entidades no sistema;
- Esquema logístico; e
- Número e localização dos canais de atendimento às filas.

Os dados complementares georreferenciados incluem:

- Modelo digital do terreno: representação em 3D das feições do terreno na região em estudo;
- Malha viária disponível no local da obra e no seu entorno: incluindo informações relevantes ao estudo da capacidade das vias tais como largura das vias, número de faixas de rolamento, rampas, raios de curva horizontal, número de acessos, dispositivos de sinalização (semáforos, lombadas eletrônicas, redutores de velocidade etc.);

- Tráfego (volume médio diário – VMD) por faixa de rolamento e o nível de serviço atual da malha viária;
- Composição do tráfego (percentual de veículos pesados, número de eixos);
- Taxas de crescimento do tráfego para o período da obra;
- Velocidades médias reais por trecho de via e por sentido de deslocamento: esta informação poderá ser calculada indiretamente aplicando-se coeficientes de redução a velocidade diretriz (relacionados a geometria da via e aos obstáculos existentes);
- Identificação de gargalos físicos (portões, cruzamentos, semáforos, obstáculos aos deslocamentos de recursos produtivos etc.);
- Informações climáticas tais como o histórico de precipitação da região, temperaturas médias etc.

Essas informações geográficas serão organizadas em *layers* ou camadas temáticas e serão apresentadas sobre o modelo digital do terreno. Cada elemento representado graficamente (entidade) carregará acoplado a si atributos com as informações textuais. Assim, elas estarão disponíveis para consulta, bastando um click do usuário, de forma a não poluir a imagem.

O subsistema fornecerá informações tanto para o desenho da rede logística (localização das usinas, canteiros e depósitos; cadastro de fornecedores, dimensionamento preliminar das capacidades etc.) quanto para a entrada de dados (valores dos parâmetros tais como as produtividades das equipes de trabalho e das usinas etc.). As informações existentes no projeto de engenharia espelham o cenário imaginado para a elaboração do orçamento e do cronograma da obra. Esse cenário representa a linha-base a partir do qual a simulação será feita.

Como produtos do processamento e preparação das informações coletadas sugerem-se:

- Detalhamento da EAP do empreendimento, considerando os segmentos homogêneos propostos, até a lista de principais atividades operacionais e logísticas;
- Lista de quantidades de serviços por segmento homogêneo da rodovia;
- Necessidade de materiais (MRP) de insumos e de produtos usinados;
- Cronograma de necessidade de produtos agregados por mês; e
- Programação e regra de sequenciamento de atividades.

Os segmentos homogêneos podem ser divididos segundo critérios geográficos ou técnicos. Obstáculos tais como interseções, travessias de áreas urbanas, e obras de arte especiais podem caracterizar o primeiro tipo de critério; enquanto o volume de tráfego, tipo de pavimento existente ou projetado, mudança da característica do relevo, e concentração de serviços de engenharia (cortes, aterros, obras de arte correntes ou dispositivos de drenagem superficial) podem caracterizar o outro critério.

Segundo Chase, Aquilano e Jacobs (2006), o objetivo da programação é cumprir as datas de entrega; minimizar o “lead times”; minimizar o tempo de setup ou custo; minimizar o estoque em processo; e maximizar a utilização da máquina ou mão de obra. Para atingir esses objetivos é necessário definir as regras de prioridade ou sequenciamento²³. Essas regras definem qual tarefa começa primeiro em cada máquina ou centro de trabalho.

4.4.2 Subsistema 2 – Desenho da Rede Logística

Esse subsistema recebe os dados do projeto, da cadeia logística e do terreno e define a melhor combinação de quantidades, capacidades e localizações dos elementos que compõem a rede logística. No Planejamento Hierárquico da Produção, corresponde aos módulos de Planejamento da Capacidade/Fábrica, Planejamento da Força de Trabalho que compõem o módulo de Planejamento Agregado, todos do nível estratégico.

A seleção de fornecedores e a localização das unidades de produção são feitas a partir do emprego da Programação Linear Inteira Mista²⁴, cuja Função Objetivo (FO) possui a modelagem matemática apresentada a seguir:

$$\text{Minimizar } f(x_{11} + x_{12} + \dots + x_{nm} + x_{nl}) = C_n + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} * x_{ij} * d_{ij} + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l c_{jk} * x_{jk} * d_{jk} \quad (4.1)$$

Onde:

$m =$ fornecedores internos e externos

$n =$ unidade de produção

$l =$ ponto de aplicação (centro de gravidade do segmento homogêneo)

²³ Para maiores detalhes sobre as regras de sequenciamento sugere-se leitura, dentre outros, o livro Administração da Produção para a Vantagem Competitiva, de Chase, Jacobs e Aquilano.

²⁴ Modelo de programação linear no qual algumas das variáveis do problema pertencem ao conjunto dos números inteiros.

C_n = custo fixo de instalação da unidade de produção n

x_{ij} = quantidade transportada da origem i para o destino j

c_{ij} = custo para transportar de i para j

d_{ij} = distância entre i e j

Neste caso a FO procura minimizar o custo total de transporte dos insumos (fornecedores às unidades de produção), dos produtos acabados (unidades de produção para as equipes de trabalho) e do custo de implantação da unidade de produção. O custo de transporte é obtido pelo produto entre o momento de transporte²⁵ e a tarifa de transporte para o tipo de rodovia considerada.

O sistema modelado é submetido a 4 tipos de restrições, a saber:

Restrição 1: Todos os produtos que saem das fontes de materiais não podem ultrapassar a quantidade disponível de cada produto (a_i);

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq a_i \quad (4.2)$$

Restrição 2: As quantidades transportadas das diversas origens ao destino j devem satisfazer a demanda requerida nesse destino (b_j);

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j \quad (4.3)$$

Restrição 3: A quantidade de insumos que entra é igual a quantidade de produto usinado que sai da unidade de produção.

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = \sum_{k=1}^l x_{jk} \quad (4.4)$$

Restrição 4: Restrição de não negatividade, as quantidades não podem ser negativas.

$$x_{ij} \geq 0 \quad (4.5)$$

Nesse subsistema são realizadas as seguintes atividades:

- Dimensionamento preliminar da capacidade das unidades de produção e das equipes de trabalho, nos moldes do que é feito na metodologia tradicional de programação de projetos de engenharia;

²⁵ Momento de transporte é o produto entre a distância média de transporte e o volume ou peso transportado.

- Seleção dos locais das instalações e de fornecedores através da técnica de programação linear (PL)²⁶;
- Definição da capacidade e localização das unidades de produção usando PL;
- Locação dos elementos da cadeia logística sobre o mapa tridimensional da obra;
- Identificação do sistema viário existente; e
- Avaliação da necessidade de acréscimos de capacidade (escala e momento).

4.4.3 Subsistema 3 – Entrada de Dados:

O subsistema 3 compreende a entrada dos dados da obra no sistema desenvolvido para a validação da metodologia, ou diretamente ou via planilha do Excel. Os dados serão inseridos no sistema em três etapas:

- Cadastro do mapa com o terreno na região da obra: poderá ser feito como uma figura ou ortofoto; como um arquivo *shapefile* (desejável) ou diretamente da ferramenta de simulação;
- Cadastro, via planilha do Excel, dos elementos da rede logística selecionada na fase anterior: localização e quantidade das jazidas e fontes de matéria-prima, das unidades de produção, das unidades de armazenagem; e quantidade das equipes de trabalho;
- Cadastro, via planilha do Excel, das quantidades de serviços previstas no projeto e dos valores escolhidos para os demais parâmetros de entrada da simulação.

4.4.4 Subsistema 4 – Simulação

O Subsistema 4 constrói o modelo de simulação, desenvolvido para o teste da metodologia, define os cenários a serem simulados e, a partir dos dados cadastrados do subsistema de entrada de dados, roda o modelo, transferindo os resultados para o subsistema de saída de dados. Esses resultados poderão ser transformados em novos parâmetros de entrada para uma nova rodada do modelo.

O primeiro cenário a ser testado deverá ser aquele contido no projeto de engenharia da obra em estudo. Esse cenário formará a linha-base para comparação da simulação. Nele, a cadeia

²⁶ A PL poderá ser feita através de uma função programada na linguagem Java diretamente no sistema desenvolvido para validação da metodologia ou através do solver do Excel.

logística deverá refletir as fontes de matéria-prima, os fornecedores, a localização e as capacidades das unidades de produção e força de trabalho que subsidiaram a elaboração do orçamento e cronograma da obra. Além da cadeia logística, este cenário-base deverá replicar as decisões de longo, médio e curto prazo utilizadas no planejamento do projeto de engenharia.

A escolha de um cenário envolve as seguintes decisões:

- **Estratégia de produção:** puxada (demanda sob encomenda fornecida pela capacidade de produção e pelas frentes de trabalho disponíveis); empurrada (fornecimento de insumos e produção de produtos usinados para estoque, respeitando a capacidade de estoque) ou mista;
- **Decisão fazer ou comprar:** terceirização de serviços ou aquisição direta de componentes (serviço terceirizado pode ser considerado de capacidade infinita²⁷ pois é contratado para determinada quantidade de entregas por período fixo, sendo o dimensionamento das equipes responsabilidade do contratado);
- **Regime de trabalho:** número de turnos trabalhados (turno noturno significa acréscimo de apenas 50% a 70% na produção);
- **Níveis de qualificação da mão de obra:** simular retrabalho e curva de aprendizado;
- **Política de prioridades em filas:** quais atividades ou pedidos de produção tem precedência (simular priorização do caminho crítico);
- **Balanceamento de fluxos produtivos:** acréscimos de capacidade automáticos (identificação de gargalos logísticos);
- **Política de estoque:** tempo de pedido, lead time, tamanho do lote;
- **Definição de WIP/quotas de produção:** cálculo dos estoques de segurança e demais parâmetros CONWIP;
- **Regras de programação e sequenciamento:** FIFO (*first in, first out*); FISFO (*first in on system, first out*); na primeira data de início (PDI) ou na última data de término (UDT).

A decisão de definição de WIP e de cotas de produção apresenta correlação direta com o módulo de **Definição de WIP/quotas** previsto na estrutura do Planejamento Hierárquico da Produção. O módulo é útil para transformar o plano agregado em parâmetros de controle para

²⁷ Respeitando-se, obviamente, as limitações físicas e do processo produtivo

um sistema de produção puxada (HOOP e SPEARMAN, 2013). Num sistema puxado, os controles mais importantes são os níveis de trabalho executado na linha de produção (ou simplesmente no recurso gargalo) e, para fazer a associação com as datas de entrega dos clientes, as quotas de produção, ou seja, a demanda a atender durante determinado período.

A decisão sobre as regras de programação e sequenciamento entre as atividades se alinha ao módulo **Programação e Sequenciamento do Planejamento Hierárquico da Produção**. O objetivo é fornecer uma programação que dirige os tempos dos trabalhos e requisições de materiais, e facilita a movimentação pela fábrica (HOOP e SPEARMAN, 2013). Ambos os módulos de definição do WIP/cotas e programação e sequenciamento compõem o nível tático do planejamento hierárquico, ou seja, representam decisões de médio prazo.

O Subsistema de Simulação, por sua vez, analisado segundo preceitos da simulação por agentes a partir do qual o sistema informatizado foi desenvolvido, dividem-se em outros três subsistemas menores: Fornecimento, Produção e Distribuição. Transversais a esses subsistemas menores operam dois agentes: o agente Transportes que conduz os insumos às usinas e os produtos usinados às equipes de trabalho; e Controle de Pedidos, responsável pela comunicação e o acionamento entre os agentes envolvidos. A Figura 4-15 apresenta essa divisão.

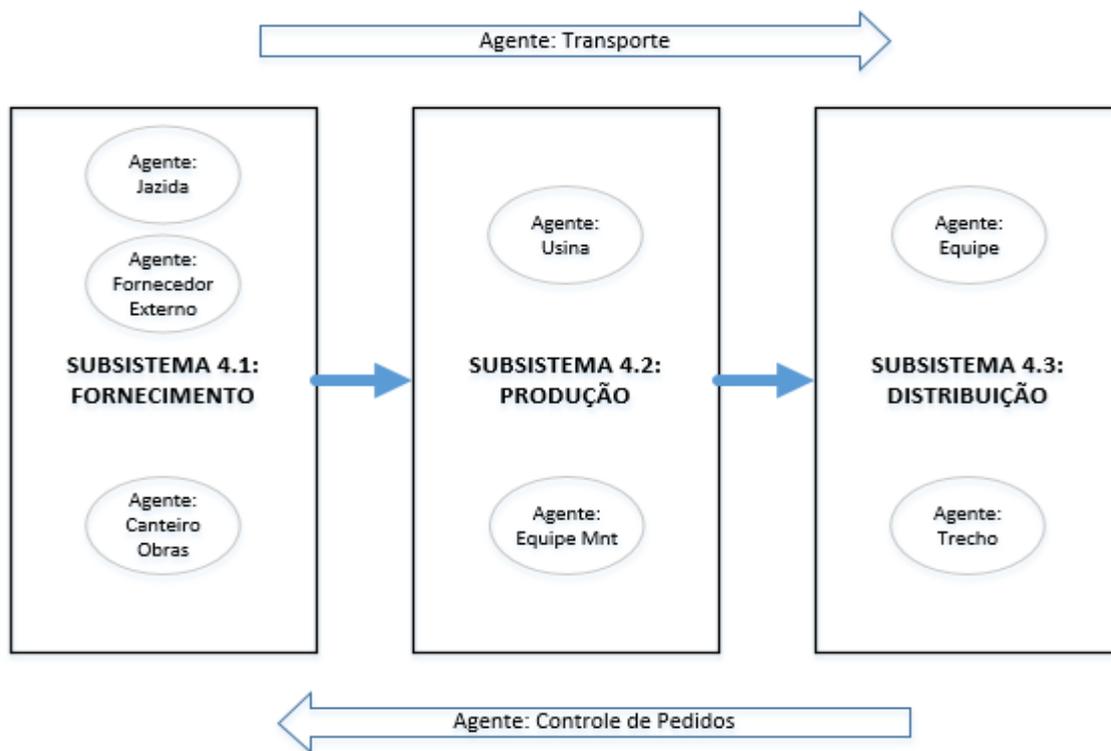


Figura 4-15 Divisão do Subsistema Simulação

O Subsistema de fornecimento cuida da entrada no sistema dos insumos necessários à execução dos serviços rodoviários. Esses insumos podem ter como origem o comércio local (tais como cimento, aço de construção, madeira, insumos asfálticos etc.) ou ainda serem produzidos a partir da exploração de jazidas de solo, areia ou material pétreo previstos no projeto de engenharia. O subsistema engloba três tipos de agentes: Jazida, Fornecedor Externo e Canteiro de Obras.

O Subsistema de produção engloba as atividades fabris desenvolvidas pelos agentes Usina, que podem assumir o papel dos diferentes tipos de unidades de produção previstos na cadeia logística anteriormente detalhada. Outro agente deste Subsistema é a Equipe de Manutenção, responsável pela recuperação dos equipamentos de engenharia alocados nos agentes Usinas e Equipes de Trabalho que apresentarem falha durante a operação.

Já o Subsistema distribuição é responsável pela entrega dos produtos acabados, componentes e insumos necessários à execução dos serviços de terraplenagem, OAC, pavimentação etc. em cada um dos segmentos homogêneos da obra de infraestrutura. Possui em seu escopo os agentes Equipe de Trabalho e Trecho. O primeiro executa os serviços de engenharia com produtividade definida pelos equipamentos alocados e pela expertise da equipe; o outro representa os segmentos homogêneos que somados compõem o escopo da obra. Cada agente Trecho possui como atributos a quantidade de cada serviço de engenharia calculado, a partir do projeto de engenharia, na fase de preparação de dados.

4.4.5 Subsistema 5 – Saída de Dados

Os resultados serão apresentados em *dashboards* temáticos como vistas do software *Anylogic*. Os resultados poderão ser exportados para planilhas de Excel ou ainda copiados para servir de parâmetros de entrada em novas rodadas de simulação. O software *Anylogic* dispõe de recursos que permitem a construção de animações para facilitar a visualização do modelo de simulação. Este recurso não faz parte do escopo do presente trabalho, porém foi incluído neste subsistema o preenchimento automático de um diagrama de barras vinculado a cada segmento homogêneo da obra para indicar o avanço de cada uma das equipes de trabalho.

4.4.6 Subsistema 6 – Projeto de Experimentos

Os projetos de experimentos são os que estão disponíveis no próprio *Anylogic* (versão “Professional”). Serão pré-formatados dois tipos de experimentos: a comparação de cenários e a análise de sensibilidade. A comparação de cenários será feita através de gráficos de indicadores de desempenho do cenário simulado tais como: a duração total do projeto; e a taxa de utilização dos recursos. A análise de sensibilidade permitirá ao usuário a utilização de botões de “range” para variação dos valores dos principais parâmetros a fim de testar a reação do cenário à mudança instantânea do parâmetro.

Esse subsistema pode ser utilizado com diferentes objetivos e em diferentes fases do projeto; tanto na busca de otimização dos processos quanto na busca de uma maior aderência do cronograma projetado à realidade da construção da obra de infraestrutura. De fato, ela permite a construção de ferramenta efetiva para a otimização de processos e de fluxos produtivos mais equilibrados, em busca de redução dos custos logísticos e de redução de prazos de execução dos serviços previstos no projeto. Essa otimização pode ser utilizada tanto na fase de planejamento anterior a obra, quanto durante a obra, no replanejamento contínuo, ou em ondas sucessivas, que caracterizam os projetos em geral.

Dentro deste enfoque, em muito se assemelha aos módulos de **Controles do Chão da Fábrica**, de **Simulações em Tempo Real** e de **Controle da Produção** previstos na etapa de planejamento operacional, ou de curto prazo, do Planejamento Hierárquico de Produção. Os resultados obtidos serão encaminhados ao Subsistema de saída de dados, seguindo o mesmo protocolo de apresentação.

5 CRIAÇÃO DE UM MODELO DE SIMULAÇÃO A PARTIR DA SIMULAÇÃO BASEADA EM AGENTES

5.1 INTRODUÇÃO

O Capítulo anterior, ao descrever o modelo proposto para a programação de atividades em projetos de infraestrutura, evidenciou a diferença abissal da nova modelagem com o formato tradicional de elaboração de cronogramas de obras. Essa grande diferença criou um obstáculo a continuação desta tese: as ferramentas usualmente empregadas não comportam a quantidade de variáveis e a abordagem pretendida.

A bibliografia consultada mostrou que o uso de modelagens computacionais tem contribuído para aperfeiçoar os processos de projetos da construção civil, especialmente com o uso de modelos e simulações que têm promovido, dentre outros benefícios, a antecipação na identificação de problemas (LEE et al., 2012). Segundo Andrade (2012), os modelos de simulação procuram oferecer uma representação do mundo real com o objetivo de permitir a geração e análise de alternativas, antes de sua implementação. Assim, houve a necessidade de se recorrer a criação de um modelo computacional baseado em simulação, e dentre os tipos de simulação, a simulação baseada em agentes. Os motivos que justificaram a escolha desse tipo de modelo de simulação já foram abordados no Capítulo 3.

O software *AnyLogic* foi escolhido como plataforma para se implementar o modelo de simulação pois é a única ferramenta profissional disponível atualmente que permite a Simulação Baseada em Agente. Ele suporta diagramas de estados e gráficos de ação, orientação a objetos e Java, e tem a capacidade de usar dinâmicas de sistema e fluxogramas de processo dentro e fora de agentes para permitir a construção de modelos mais robustos (BORSHCHEV, 2013).

O software possui 03 tipos de versões: *Personal Learning Edition* (PLE) para iniciantes e estudantes; a versão *University Researcher* voltada para pesquisas acadêmicas em universidades e a versão *Professional* adequada a empresas e órgãos governamentais. No desenvolvimento desta tese foi utilizada a versão PLE, pois é a única sem custos para instalação.

A versão PLE têm algumas limitações relacionadas ao tamanho do modelo; à disponibilidade de elementos da biblioteca de objetos; à visualização e, no que repercutiu mais drasticamente no desenvolvimento deste trabalho, à disponibilidade de projetos de experimentos (apenas modelos de otimização são permitidos, com algumas restrições). As versões pagas apresentam outros tipos de experimentos tais como simulação de Monte Carlo, análise de sensibilidade e calibração de parâmetros.

A versão PLE apresenta as seguintes limitações relacionadas ao tamanho do modelo:

- Número de tipos de agentes em um único modelo: 10;
- Número de agentes/blocos incorporados em um único agente: 200;
- Número de variáveis de sistemas dinâmicos em um agente: 200; e
- Número de agentes criados dinamicamente: 50.000.

5.2 A SIMULAÇÃO BASEADA EM AGENTES

A Simulação Baseada em Agentes (SBA – *Agent-Based Simulation*) é realizada por meio da construção de um modelo baseado em uma coleção de entidades de decisão autônoma, denominadas **agentes**, que são capazes de interagir tanto com o ambiente no qual se insere quanto entre si (CHWIF & MEDINA, 2006). Segundo Bonabeau (2002), este tipo de abordagem viabiliza a simulação de fenômenos oriundos da iteração entre agentes e ainda uma descrição mais natural quando o sistema é formado por entidades que possuem comportamento heterogêneo.

Como abordado no detalhamento do Subsistema de Simulação, este foi estruturado em três subsistemas menores, cada qual composto por agentes. No caso da rodovia em estudo, e que pode facilmente ser extrapolado para a maioria das obras de infraestrutura, o subsistema de fornecimento engloba três tipos de agentes: Jazida, Fornecedor Externo e Canteiro de Obras. O subsistema de produção engloba as atividades desenvolvidas pelos agentes Usina, Equipe de Manutenção, e Equipe de Trabalho (atuando como unidade de produção). Já o Subsistema distribuição possui em seu escopo os agentes Equipe de Trabalho (atuando como cliente) e Trecho. De forma transversal aos subsistemas, atuam os agentes Transporte e Controle de Pedidos.

Os agentes normalmente serão descritos por meio de um diagrama de estados e pela sua comunicação. O diagrama de estados é uma representação do estado ou situação em que um objeto pode se encontrar no decorrer da execução dos processos de um sistema e, ainda, dos eventos, internos e externos ao sistema, que provocam a transição entre os estados. A comunicação é descrita pela sequência de mensagens trocadas com outros agentes. No caso do modelo proposto, essa comunicação é que permite a mudança dos estados e executa os pedidos de fornecimento e de produção.

O diagrama de estados permite a compreensão das paradas de produção. Essas paradas podem ser induzidas pelo calendário de trabalho adotado para a execução da obra (feriados, folgas, chuvas) e ainda por período de manutenções (programadas ou eventuais). O diagrama de estado possibilita ainda que se incorporem ao modelo variáveis de difícil avaliação tais como a frequência de quebras dos equipamentos e o tempo médio chegada das peças, além de permitir um dimensionamento da quantidade de equipes de manutenção necessárias ao trabalho.

O controle de pedidos foca no processo de produção do agente. Detalha o processo de pedido de insumos e do estoque de material produzido. Os pedidos são os elos que unem os diversos agentes e os subsistemas do modelo.

Por exemplo, quando um agente Equipe de Trabalho de asfalto se defronta com uma nova frente de trabalho (novo segmento homogêneo componente do agente Trecho) emite, por meio do agente Controle de Pedidos, uma **ordem de produção** de uma determinada quantidade de concreto asfáltico. Essa ordem de produção é endereçada à fila de pedidos do agente Usina de Concreto que, ao recebê-la, consulta o traço de produtos usinados para identificar e calcular as quantidades dos insumos necessários a produção da quantidade solicitada de concreto asfáltico, e em contrapartida, emite um pedido de fornecimento de cimento granel, areia, e brita aos agentes Fornecedor Externo (cimento), Jazida (areia) e Usina de Britagem (brita), respectivamente.

Cada material possui um *leadtime* especificado (que pode ser determinístico ou estocástico) e, quando disponível, o insumo será transportado ao solicitante através do agente Transporte. Convém notar que a atuação dos agentes Controle de Pedidos e Transporte de fato são transversais aos subsistemas e opostos entre si, conforme consta na Figura 4-8.

5.3 DESCRIÇÃO DOS AGENTES

5.3.1 Agente Jazida

Cada agente “Jazida” é identificado pelos parâmetros “tipo” (areia, solo de CBR alto e solo de CBR baixo) e pelo “número de identificação” haja vista a possibilidade de o modelo considerar diversas jazidas de cada tipo (por ex: jazida de areia A1, A2 e A3).

Com relação ao diagrama de estados, o agente Jazida foi modelado para operar em quatro estados básicos: “Ocioso”, “Produzindo”, “Em Manutenção” e “Parado” além de outros estados intermediários que permitem a comunicação com o agente Equipe de Manutenção, tais como “Aguardando Equipe Manutenção”, “Aguardando Equipe Manutenção Programada”, “Em diagnóstico”, “Aguardando Peças” e “Em Substituição”.

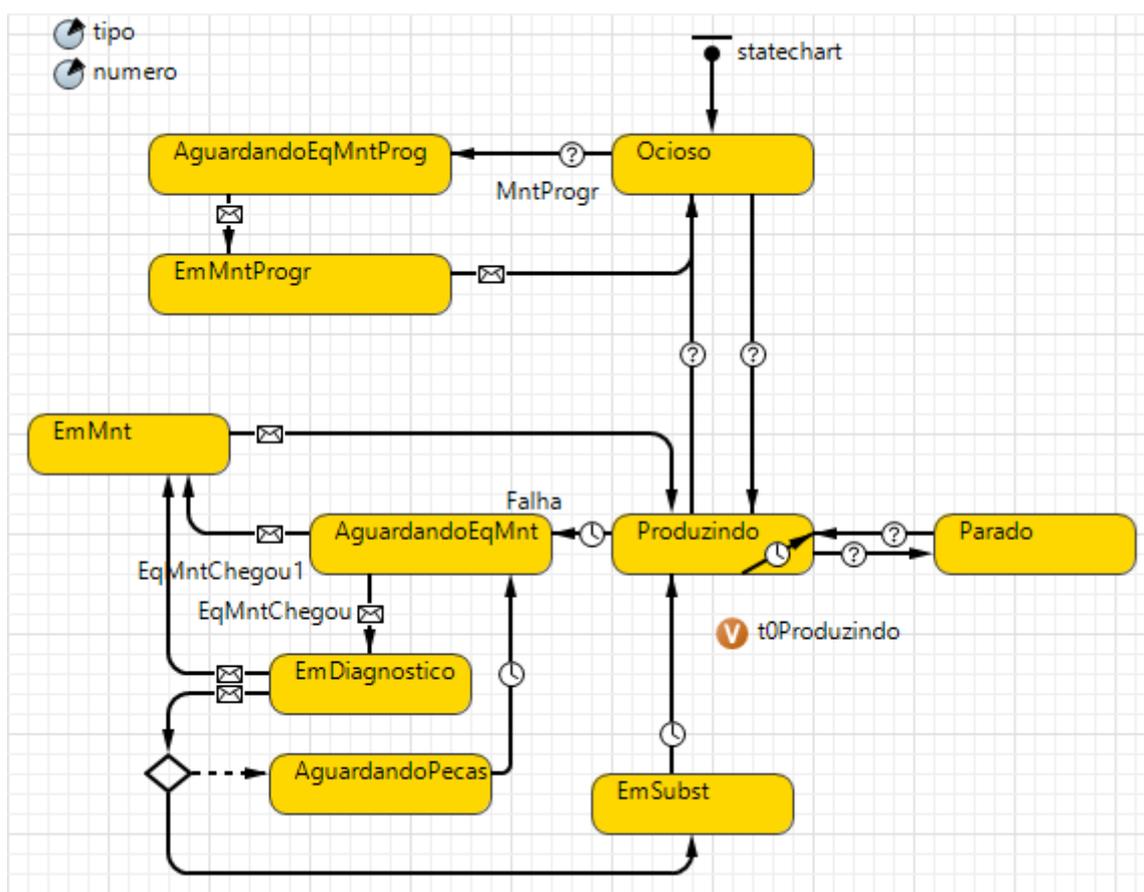


Figura 5-1 - Diagrama de Estados do Agente Jazida

O gatilho que altera o estado de “Ocioso” para “Produzindo” é uma condição “pedidoEmProducao != null”. Assim, sempre que a variável “pedidoEmProducao” tiver um

pedido de produção em fila, ou seja, possuir valor não nulo, a jazida passa a produzir. O estado “Produzindo” alterna com o estado “Parado” em função do calendário de trabalho pré-determinado. No calendário são definidos o turno de trabalho diário e os dias sem produção (dias de chuva, feriados, ou descanso semanal). Assim o sistema sorteia os dias em que não haverá trabalho e diariamente o agente consulta o calendário para identificar um dia sem produção.

Quando no estado “Produzindo” pode ocorrer uma falha mecânica em um dos equipamentos (escavadeiras hidráulicas) que compõem a força de trabalho do agente Jazida. Essa falha é definida por meio da planilha de dados de entrada²⁸ por uma função probabilística que tem como argumento o inverso da variável MTBF (Tempo Médio Entre Falhas).

Ao ocorrer a falha, o agente Jazida muda de estado para “Aguardando Equipe de Manutenção” e envia um pedido de manutenção ao agente Equipe de Manutenção. Este agente, por sua vez, passa a se deslocar ao local da equipe solicitante do pedido de manutenção.

Ao chegar ao local do equipamento quebrado o agente Equipe de Manutenção envia mensagem “Equipe Manutenção Chegou” e inicia o diagnóstico da falha. Nesse momento, o agente Jazida passa ao estado “Em Diagnóstico”. Na prática, durante o tempo de diagnóstico, o sistema sorteia se a peça estará ou não disponível (conforme a probabilidade informada da peça estar em estoque).

Caso a peça esteja em estoque o agente Jazida passa ao estado “Em Manutenção” e a própria Equipe de Manutenção que elaborou o diagnóstico se encarrega da manutenção; caso contrário, a Equipe de Manutenção é liberada e retorna ao canteiro de trabalho, é sorteado um tempo de chegada da peça (variável “tChegadaPeca”) e o agente decide entre os estados “Aguardando peças” ou “Em Substituição”.

A decisão depende da existência de um equipamento similar reserva no canteiro de trabalho e ainda da comparação entre o tempo de substituição do equipamento e o tempo de chegada da peça (condição para substituição: $\text{tempoSubstituicaoEquipamento}() < \text{tempoChegadaPeca}()$).

²⁸ A entrada de dados no sistema de simulação criado é feita a partir de uma planilha de Excel. Para detalhes ver Capítulo 6 – Validação do Modelo Proposto Através de um Estudo de Caso.

Qualquer que seja o resultado da decisão, com a chegada da peça, é acionado uma nova Equipe de Manutenção e o equipamento quebrado é colocado em manutenção e retorna ou para o canteiro como equipamento reserva ou para o próprio agente Jazida.

O agente Jazida muda então de estado de “Em Manutenção” para “Produzindo” tão logo a Equipe de Manutenção informe que concluiu o serviço. O MTTR (tempo de manutenção de Falha) também é um dado de entrada e varia para cada tipo de equipamento conforme a distribuição de probabilidade escolhida.

De forma similar ao que acontece nos automóveis utilizados no dia a dia, os equipamentos que compõem o agente Jazida também podem sofrer manutenções programadas. Neste caso, a variável tempoManutenção (parâmetro de entrada do modelo que corresponde ao número de dias trabalhados necessários a execução de uma manutenção programada) é comparada continuamente com o tempo acumulado de trabalho do agente Jazida.

Assim que o tempoManutenção superar o trabalho acumulado é criado um pedido de manutenção. Esse pedido é enviado para o agente Equipe de Manutenção e, como não há urgência, a manutenção programada ocorre quando o agente Jazida estiver no estado “Ocioso”. Neste caso, não há necessidade de se aguardar peças ou de equipamentos reservas haja visto que devido a previsibilidade tanto da manutenção quanto do conjunto de peças que será utilizado a manutenção fica condicionada a existência de peças.

Com relação ao controle de pedidos, o agente Jazida pode ser descrito por meio do diagrama de processos apresentado na Figura 5-2. No diagrama estão representadas tanto as ações executadas pelo agente quanto as funções que as traduzem no modelo.

A função “verificaPedidoInsumo” é acionada por um evento com tempo de recorrência de 1 hora. Verifica a fila de pedidos e remove o primeiro pedido da fila. O pedido de produção é criado. A função “recebePedido” agrupa os pedidos de produção que estão na fila de produção. A função “stepProdução” verifica se a produção já foi completada, caso não, produz o volume necessário baseado na produtividade informada.

A função “geraPedidoTransporte” percorre a lista de pedidos e verifica se o pedido possui carga disponível para transporte, caso positivo, verifica a disponibilidade de caminhão

compatível com o material a ser transportado, gera o pedido e adiciona-o a lista de pedido de transporte.

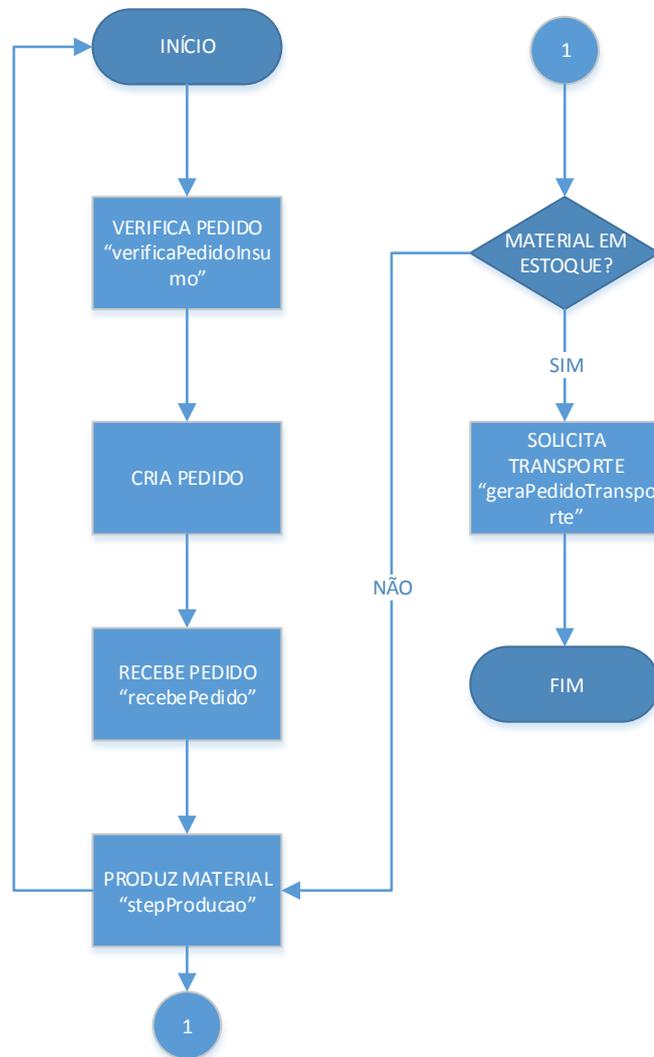


Figura 5-2 -Diagrama de Processos

O agente Jazida apresenta a mesma modelagem de estados e de controle de pedidos dos agentes Canteiro de Obras e Usina, diferindo apenas nos tipos de produtos produzidos.

5.3.2 Agente Canteiro de Obra

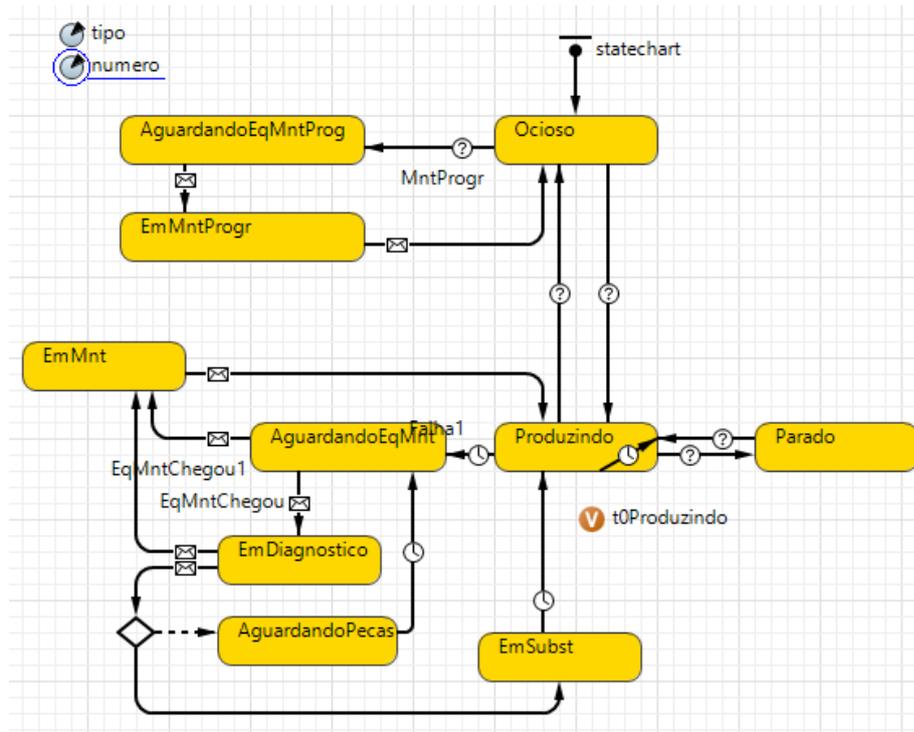


Figura 5-3 - Agente Canteiro de Obras

5.3.3 Agente Usina

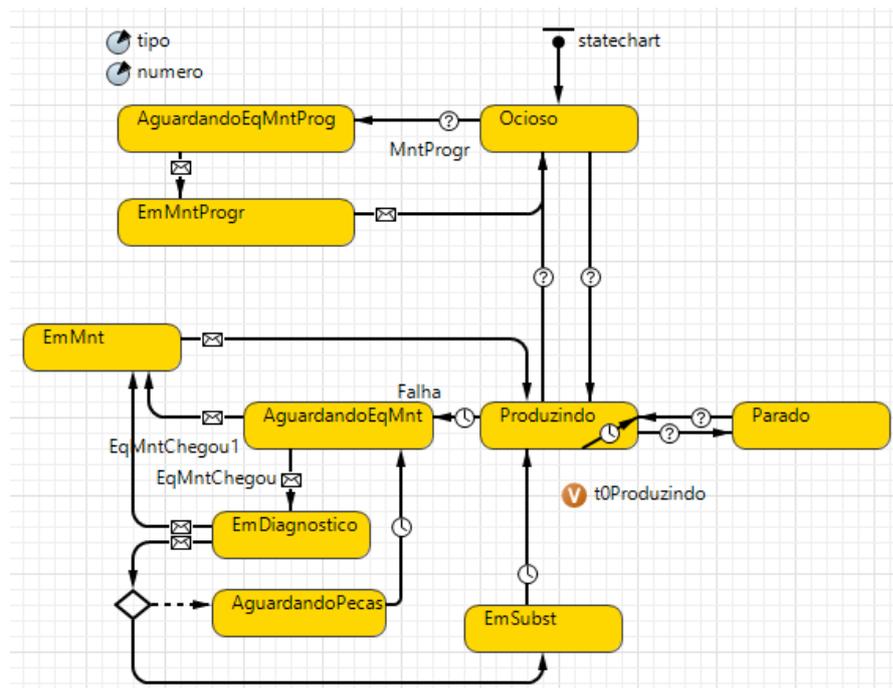


Figura 5-4 - Agente Usina

5.3.4 Agente Equipe de Manutenção

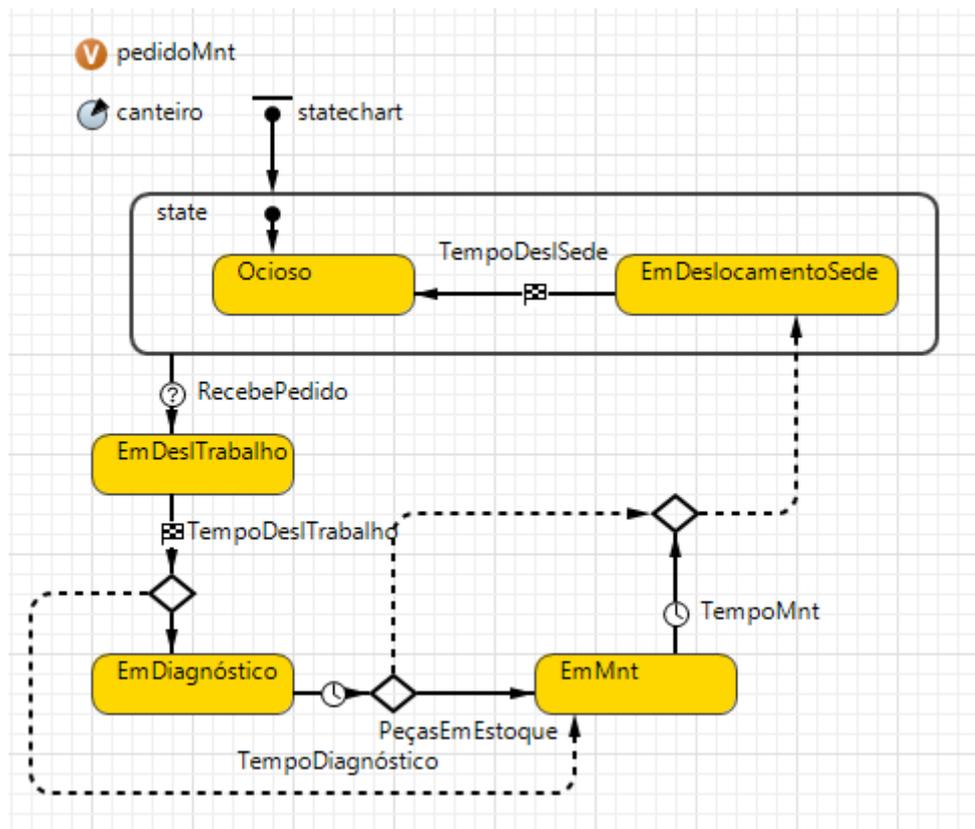


Figura 5-5 - Agente Equipe de Manutenção

Cada agente “Equipe de Manutenção” é identificado apenas pelo parâmetro “canteiro” pois estão alocados diretamente a esse agente. No modelo é prevista a possibilidade de determinar a quantidade de equipes de manutenção disponível por canteiro de obra.

Com relação ao diagrama de estados, o agente Equipe de Manutenção também foi modelado para operar em 04 estados básicos: “Ocioso – Em Deslocamento”, “Em Deslocamento para Trabalho”, “Em Diagnóstico” e “Em Manutenção”.

O agente permanece no estado “Ocioso” até que a condição “pedidoMnt != null != null” seja verdadeira, ou seja, a variável “pedidoMnt” possuir um valor não nulo, o que significa que há pelo menos um pedido de manutenção em fila. Com a condição do gatilho satisfeita, é acionada a ação “moveToInTime((Agent)pedidoMnt.solicitante, 1*hour())”, ou seja, a equipe se desloca ao solicitante do pedido de manutenção em um tempo calculado a partir da distância entre origem e destino. O estado é alterado para “Em Deslocamento para Trabalho”.

Ao chegar ao local da manutenção, testa para verificar se o diagnóstico já foi feito (essa informação está reservada na variável “pedidoMnt”); caso sim vai direto ao estado “Em Manutenção”; caso não executa o diagnóstico.

Se houver necessidade do diagnóstico segue o mesmo protocolo descrito no agente Jazida: testa a existência de peça em estoque; se houver executa a manutenção; caso contrário envia um pedido de fornecimento se desloca ao canteiro de obra. Caso contrário, permanece no estado “Em Manutenção” até o tempo sorteado para a manutenção termine e informa a variável “pedidoMnt.solicitante” que a manutenção foi concluída e move-se de volta ao canteiro de obra.

5.3.5 Agente Equipe de Trabalho

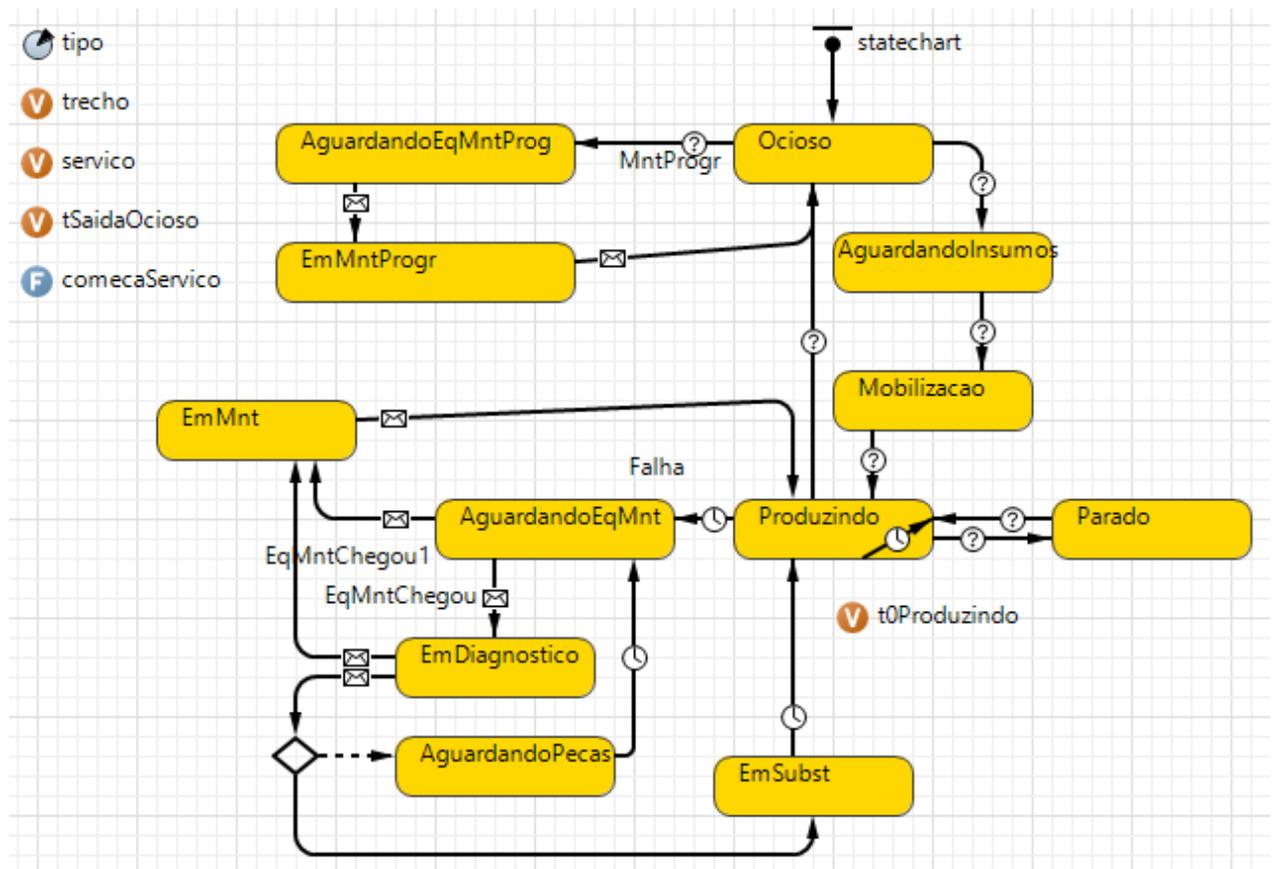


Figura 5-6 - Agente Equipe de Trabalho

Como pode ser facilmente observado, o agente Equipe de Trabalho é uma variação do agente Jazida. A diferença são os estados “Aguardando Insumo” e “Mobilização” que alteram a regra

de mudança de estado entre “Ocioso” e “Produzindo”. Neste agente, além da chegada de um pedido de produção há necessidade de verificar se há insumos e/ou produtos usinados disponíveis em quantidade suficiente para mobilizar a equipe e iniciar a execução do serviço.

Inicialmente a equipe de trabalho verifica se há pedido de serviço pendente e, caso haja, emite um pedido de insumos e altera o estado para “Aguardando Insumo”. A função “comecaServico ()” executa essa verificação, conforme código a seguir:

```
if ( main.filaPedidosServicos.isEmpty() )
    return false;

for ( String s : main.mapaEquipeServico.get( tipo ) ) {
    try{
    } catch (Exception e) {}
    if ( main.filaPedidosServicos.containsKey( s ) &&
!main.filaPedidosServicos.get( s ).isEmpty() ) {
        servico = s;
        return true;
    }
}

return false;
```

Caso exista pedido de serviço na fila da equipe de trabalho é retirado o primeiro pedido da fila para execução. A equipe se desloca ao local de trabalho (segmento homogêneo - agente Trecho) e emite pedidos de insumos e de produtos usinados em quantidades calculadas a partir dos traços informados desses materiais. O estado é alterado para “Aguardando Insumo”.

O agente aciona a função “verificaPedidoInsumo” responsável por verificar a produção possível, com o estoque de insumos existentes, para o produto do pedido. Se a produção for suficiente para, com a produtividade da usina, suprir o mínimo de dias de produção ou para completar o pedido, a produção é iniciada.

Caso contrário o agente aciona a função “pedidoEmProdução” que elabora os pedidos de fornecimento ou de produção para a quantidade remanescente de produto. A seguir é apresentada, a título de exemplo, a programação da função “verificaPedidoInsumo”.

```
if ( pedidoEmProducao != null ) return;

pedidosParaProducao.sort( (a,b) -> (int)( 100000* ( a.tInicio - b.tInicio ) ) );
```

```

pedidosParaProducao.sort( (a,b) -> (int)( 100000* ( b.prioridade - a.prioridade )
) );

for ( Pedido p : pedidosParaProducao ) {

//Verifica a produção possível, com o estoque de insumos existentes, para o
produto do pedido
    boolean produz = true;
    for ( String insumo : main.tracos.get( p.material ).keySet() ) {
        double producaoPossivelComEstoque = getEstoqueProducao(insumo) /
main.tracos.get( p.material ).get( insumo );
        if ( controlesPedidos.containsKey( insumo ) && controlesPedidos.get(
insumo ).tipoDeControle != 1 ) {
            if ( producaoPossivelComEstoque < ( p.quantidade - p.produzido
) * 0.9999 && producaoPossivelComEstoque >= capacidadeProducao.get( p.material ) *
main.horasTrabalhadas * main.servicoEstoqueMinimoParaMobilizacao.get( servico ) )
            {
                produz = false;
            }
        } else {
            if ( producaoPossivelComEstoque < ( p.quantidade - p.produzido
) * 0.9999 && producaoPossivelComEstoque >= capacidadeProducao.get( p.material ) *
main.horasTrabalhadas ) {
                produz = false;
            }
        }
    }
}

//Se a produção for suficiente para, com a produtividade da usina, suprir o mínimo
de dias de produção ou para completar o pedido, a produção é iniciada.
    if ( produz ) {
        main.stat.add("Tempo médio em fila na " + tipo + " para materiais " +
p.material + " para produção", time() - p.tInicio);
        //Define a prioridade como infinita, ou seja, em produção
        pedidoEmProducao = p;
        pedidosParaProducao.remove(p);
        //inicia a produção
        onChange();
        return;
    }
}

```

Quando a condição mínima de mobilização é satisfeita o estado passa a “Mobilização” e após um tempo de deslocamento para ao estado “Produzindo”.

5.3.6 Agente Transporte

Cada agente “Jazida” é identificado pelos parâmetros “tipo” de veículo de transporte, “origem”, “tempoCarregamento” e “tempoDescarregamento”.

Com relação ao diagrama de estados, o agente Jazida foi modelado para operar em quatro estados básicos: “Ocioso”, “Em Trânsito”, “Carga” e “Descarga”, sendo que o estado “Em

Trânsito se subdivide em três tipos de trajeto: para a origem do pedido de transporte, da origem para o destino do transporte e retornando a origem.

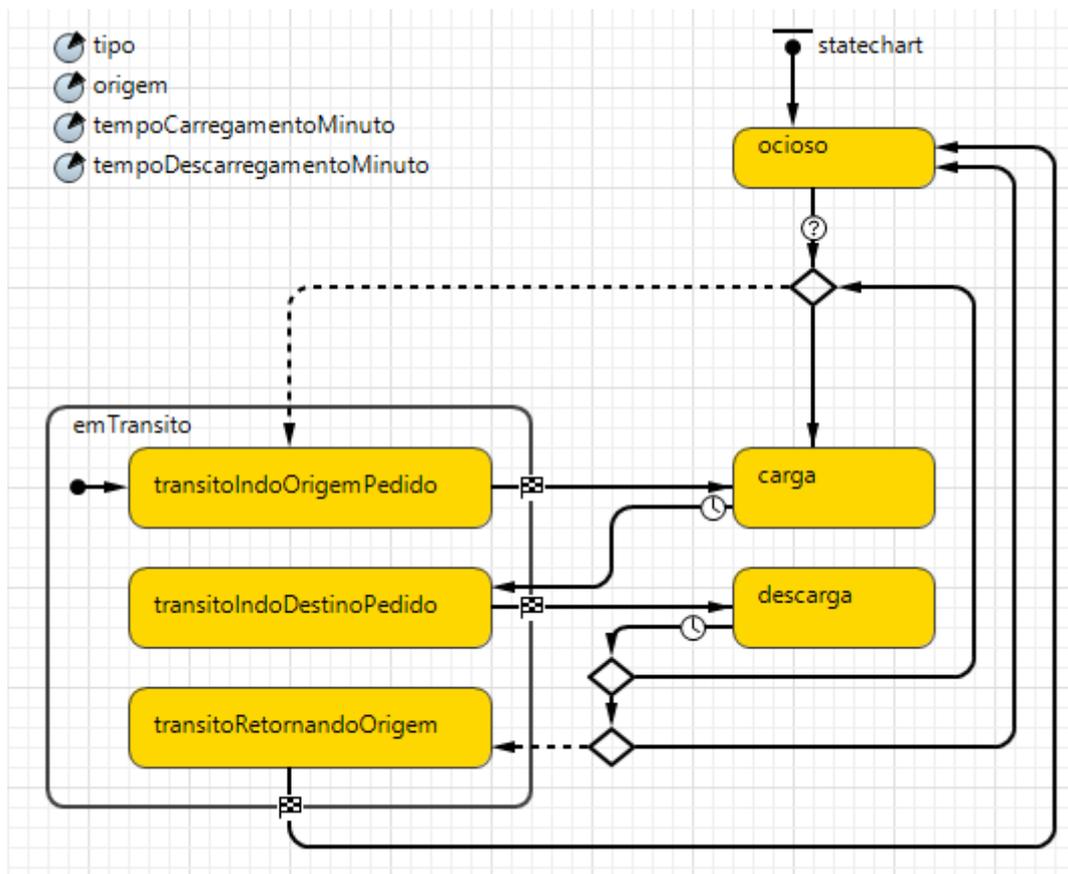


Figura 5-7 - Agente Transporte

A saída do estado “Ociosos” depende de satisfeitas as condições “pedidos!= null && !pedidos.isEmpty ()”. Na sequência é testada a condição “ultimoPonto.equals (pedidos.getFirst().origem)”. Se a origem da operação de transporte e a posição atual do veículo de transporte coincidem, então é feito o carregamento; caso contrário altera seu estado para “Em Trânsito”.

Após a carga realizada (nesse caso o gatilho é um timeout – intervalo de tempo) o veículo se desloca ao destino informado no pedido de transporte (altera seu estado para “Em Trânsito”). Quando chega ao destino, o veículo altera seu estado para “Descarga”. Após o tempo de descarga, o modelo testa se todo o volume de material do pedido já foi transportado através da condição “!pedidos.isEmpty ()”. Essa condição define se o veículo retorna a origem para novo carregamento do mesmo pedido ou se altera seu estado para “Ociosos”.

5.3.7 Agentes Controle de Pedido e Trecho

Os agentes Controle de Pedidos e Trecho diferem dos demais pois não possuem comportamento a ser modelado através de um diagrama de estados. Na verdade, trata-se de uma coleção de objetos diferenciados apenas por parâmetros. As Figuras 5-8 e 5-9 apresentam os parâmetros do Agente Controle de Pedidos e Trecho, respectivamente.

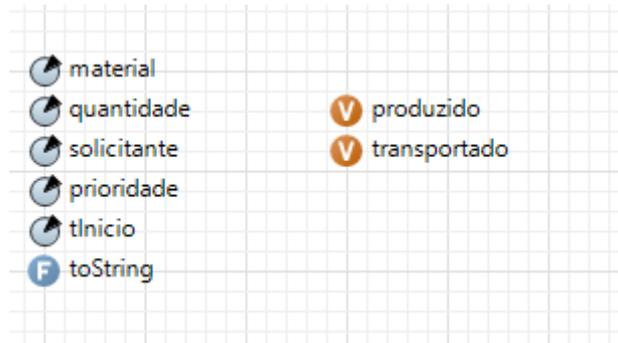


Figura 5-8 -: Agente Controle de Pedido

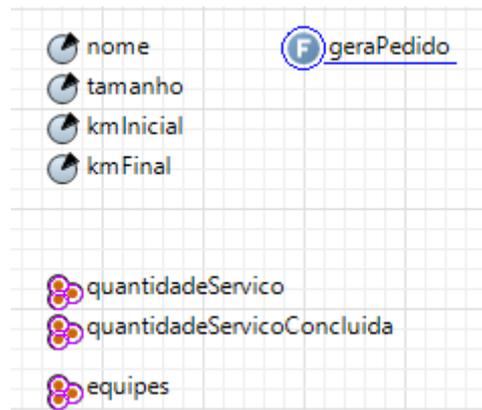


Figura 5-9 -: Agente Trecho

6 APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO ATRAVÉS DE UM ESTUDO DE CASO

6.1 INTRODUÇÃO

Este Capítulo tem a finalidade de verificar e validar a metodologia proposta. Freitas Filho (2008) define esta etapa da modelagem de sistemas como a confirmação de que o modelo opera de acordo com a intenção do analista, ou seja, sem erros de sintaxe e lógica, e que os resultados por ele fornecidos são dignos de crédito e representativos do modelo real. Espera-se atingir este objetivo através da tradução do modelo em uma linguagem de simulação apropriada e da sua aplicação em um estudo de caso real.

A escolha do estudo de caso como ferramenta de validação se justifica, pois, segundo Yin (2015), essa é uma das diversas maneiras de realizar uma pesquisa científica²⁹. O autor esclarece que esse é o método preferencial em situações nas quais: as principais questões das pesquisas são “como?” ou “por que?”; um pesquisador tem pouco ou nenhum controle sobre os eventos; e o foco do estudo é um fenômeno contemporâneo, atual.

De fato, observa-se que o estudo de caso se aplica ao planejamento de obras de infraestrutura, pois o que se pretende é definir quais e como os serviços serão executados, qual a relação de precedência entre esses serviços e porque algumas atividades merecem tratamento preferencial a fim de otimizar a duração e o custo da obra.

6.2 ESTUDO DE CASO: A RODOVIA BR-163/PA

Para o estudo de caso foi selecionado um dos últimos trechos ainda não pavimentados da BR-163/PA, um lote de 65 km, entre os km 354,9 e km 419,9, que correspondem aos municípios de Novo Progresso e Igarapé do Lauro, respectivamente. Trata-se de um importante eixo rodoviário que permite o escoamento de parte da produção do Centro-Oeste pelo Porto Fluvial de Miritituba/PA e pelo Porto Marítimo de São Luís/MA (ver Figura 6-1).

O segmento selecionado já foi objeto de duas contratações anteriores por parte do Governo Federal. O DNIT nessas duas tentativas de concluir o trecho contratou, em momentos distintos, duas empresas. Essas empresas ou foram retiradas ou desistiram da execução da obra. Alguns pequenos segmentos chegaram a ser concluídos totalizando 15,22 km de pista

²⁹ Outras maneiras são experimentos, levantamentos, modelagem econômica ou estatística.

asfaltada. O trecho de rodovia remanescente, denominado Lote 1.4, possui projeto de engenharia, detalhado no nível de projeto executivo, aprovado em março de 2017 pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

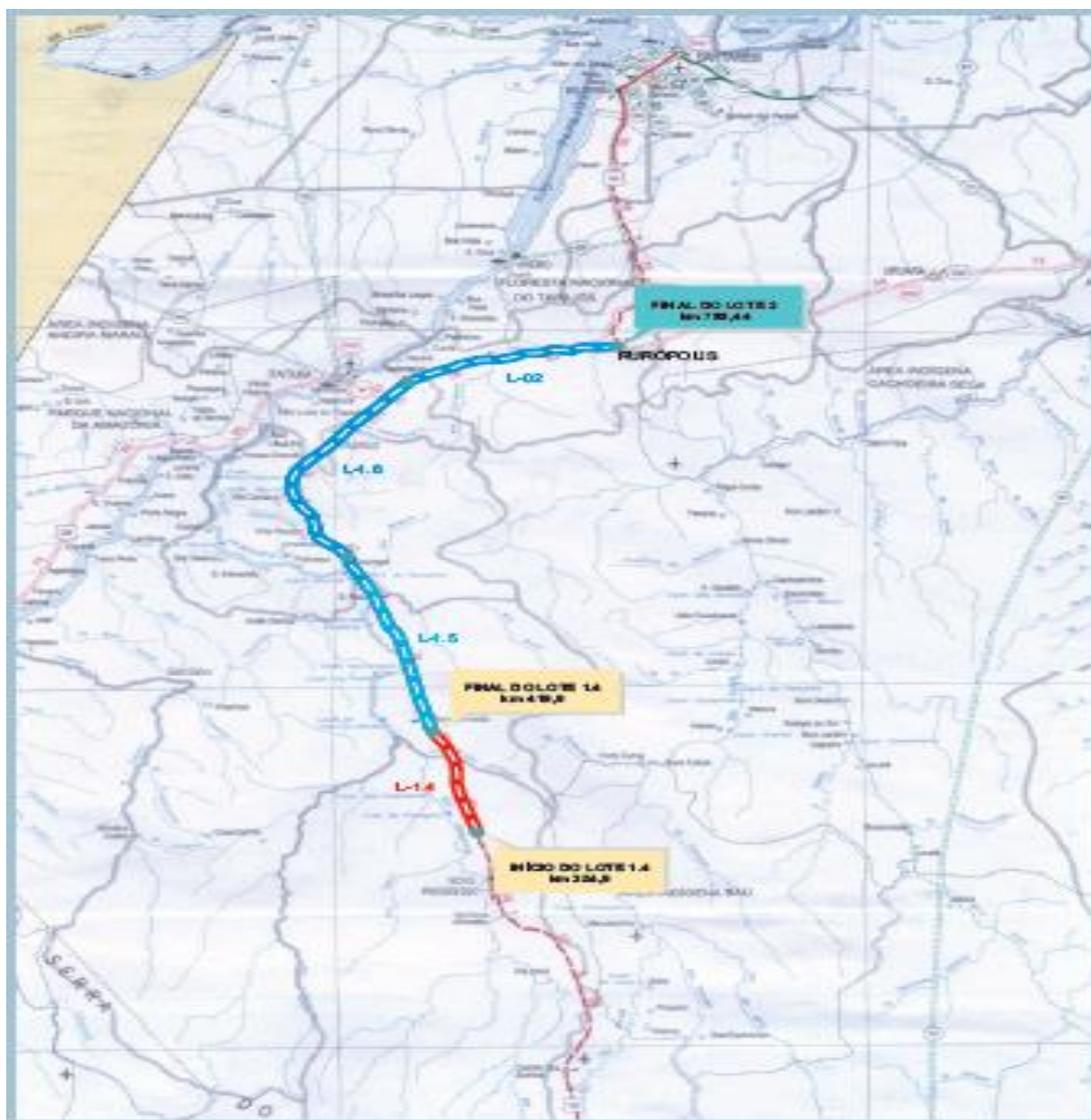


Figura 6-1 – Localização do Lote 1.4 da BR-163/PA

O projeto desse lote seguiu as normas técnicas do DNIT tanto no que se refere a definição do traçado e a geometria quanto a elaboração do plano de execução, ou seja, o cronograma e o orçamento. A obra foi orçada em R\$ 121.022.964,02 (ref: jul/16) e o prazo de execução estimado em trinta meses (incluindo dois períodos chuvosos de cinco meses cada). A escolha dessa obra para o estudo de caso procurou atender às premissas definidas no Capítulo 1 desta tese, quais sejam: obra de infraestrutura em fase de realização, com projeto executivo aprovado, com cronograma elaborado pela metodologia tradicional.

O Lote 1.4 possui 65 km de extensão total, porém os quatro segmentos remanescentes somados têm uma extensão total de 49,78 km. A seguir é apresentado um diagrama linear da obra, com a divisão dos quatro segmentos a construir propostos no Projeto Executivo e os segmentos já concluídos (destacados). Como se observa, os segmentos hachurados na Figura 6-2 entre as estacas³⁰ 23.412 e 23.794, 24.386 e 24.496, 24.551 e 24.762, e entre as estacas 26.203 e 26.266 já se encontram pavimentados e não serão tratados nesse trabalho.



Figura 6-2 – Localização dos Segmentos

O segmento 1 (S1) tem extensão de 8,02 km sendo compreendido entre as estacas 23.011 e 23.412. O segmento 2 (S2) tem extensão de 11,84 km sendo compreendido entre as estacas 23.794 e 24.386. Já o segmento 3 (S3), cuja extensão é de apenas 1,1 km entre as estacas 24.496 a 24.551, corresponde a um remanescente da intervenção anterior na rodovia numa região onde foi construída posteriormente uma ponte e seus encontros. O segmento 4 (S4) é o maior em extensão contínua com 28,82 km entre as estacas 24.762 e 26.203.

Atualmente os quatro segmentos encontram-se ou em leito natural ou com parte do terraplenagem executado, mas sem qualquer camada de pavimentação. Em todos esses segmentos o projeto de pavimentação prevê a execução de quatro camadas sobrepostas: a primeira, em ordem de execução, ou seja, de baixo para cima, é a de “sub-base estabilizada granulometricamente com mistura”, com 20 cm de espessura, composta por 55% de solo natural de baixa capacidade de suporte, 25% de brita e 20% de areia.

A segunda camada, “base estabilizada granulometricamente com mistura”, possui 20 cm de espessura e composição de 20% de solo de jazida, 70% de brita e 10% de areia. As duas últimas camadas de execução são de revestimento asfáltico, com espessura total de 12,5 cm de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) executado em duas camadas com 6,5 cm (“CBUQ – binder” na pista de rolamento e no acostamento) e de 6,0 cm (“CBUQ – capa de rolamento” na pista de rolamento).

³⁰ Em obras de infraestrutura é usual a identificação do eixo longitudinal da obra a partir de estacas espaçadas a cada 20 m. A estaca 23.412, por exemplo, corresponde ao km 468,24 da rodovia.

A estrutura do pavimento foi dimensionada para um Volume Médio Diário (VMD) de tráfego para o ano de 2011 de 1.462 veículos composto por uma expressiva parcela de 82% de ônibus e caminhões e com Nível de Serviço “C”. Para a avaliação do nível de Serviço a rodovia foram considerados um horizonte de planejamento 25 anos e uma taxa de crescimento³¹ estimada em 4,5% aa.

A seção transversal de pavimentação projetada para a BR-163/PA, apresentada na Figura 6-3 segue as normas técnicas do DNIT para rodovias de Classe I, sendo composta por duas pistas de rolamento de 3,5 m de largura, seguida de acostamentos com 2,5 m e de dispositivos de drenagem. A Tabela 6-1 apresenta a representatividade no orçamento da obra de cada uma das disciplinas previstas do projeto de engenharia.

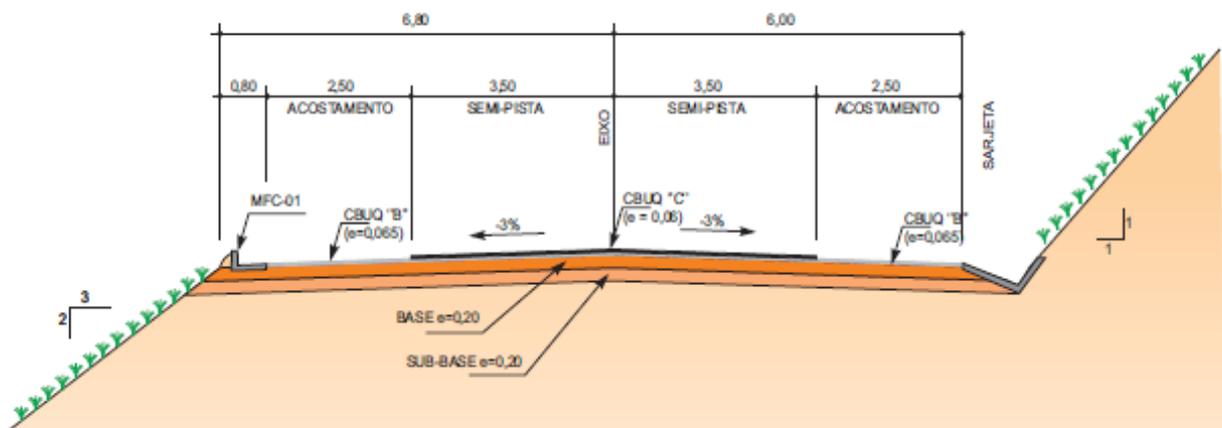


Figura 6-3 – Seção Transversal de Pavimentação

Da referida tabela observa-se que os relacionados a movimentação de terras e conformação do traçado da rodovia (terraplenagem), captação e escoamento de águas profundas e superficiais (drenagem e obras de arte corrente), e execução das camadas de pavimento (pavimentação, aquisição e transporte de materiais betuminosos) representam aproximadamente R\$ 110 milhões, ou seja, mais de 90% do montante do orçamento.

Além disso, é consenso no meio rodoviário que dentro dessas disciplinas existem serviços que são comuns ao caminho crítico de grande parte das obras lineares tais como rodovias e ferrovias. Esses serviços formam a espinha dorsal dos cronogramas e apresentam um

³¹ A taxa de crescimento foi determinada no estudo de tráfego da BR-163/PA através de análises que levaram em consideração o comportamento de crescimento da população e do PIB das cidades atravessadas.

sequenciamento lógico que está relacionado ao próprio processo construtivo tradicional. A Tabela 6-2 apresenta o quantitativo previsto desses serviços para a pavimentação da BR-163/PA, para os quatro segmentos considerados no projeto executivo desse trecho de rodovia.

Tabela 6-1 – Custo de Implantação por Disciplina

ITEM	DISCRIMINAÇÃO	CUSTO DOS SERVIÇOS (R\$)
1.0	Terraplenagem	6.863.614,80
2.0	Drenagem	12.622.997,27
3.0	Obras de arte corrente	1.136.472,24
4.0	Pavimentação	50.840.888,88
5.0	Aquisição de materiais betuminosos	29.205.787,73
6.0	Transporte de materiais betuminosos	8.872.328,97
7.0	Obras complementares	1.780.847,50
8.0	Sinalização	2.405.985,89
9.0	Proteção ambiental	2.093.410,47
10.0	Instalação e manutenção de canteiro	4.737.029,83
11.0	Mobilização e desmobilização	463.600,45
	Total Geral	121.022.964,02

Fonte: Projeto Executivo BR-163 - DNIT

Tabela 6-2 – Quantidade Aproximada dos Principais Serviços por Segmento

DISCRIMINAÇÃO	UND	SEGMENTO				
		S1	S2	S3	S4	TOTAL
Escavação de material de 1ª e 2ª categorias	m3	40.000	86.000	5.060	142.000	273.060
Compactação de aterro 100% Proctor Normal	m3	26.500	63.000	3.900	99.000	192.400
Obra de Arte Corrente (OAC) - Bueiro Tubular/Celular em Concreto (*)	m	105	130	0	219	454
Sub-base estabilizada granulometricamente com mistura	m3	22.300	32.431	3.013	78.491	136.235
Base estabilizada granulometricamente com mistura	m3	21.300	31.030	2.883	75.531	130.744
Imprimação	m2	106.500	155.150	14.415	377.655	653.720
CBUQ “Binder”	ton	15.240	22.380	2.080	54.476	94.176
CBUQ “Capa”	ton	8.350	12.235	1.137	29.782	51.504
Dreno profundo – DPS 08	m	7.125	13.020	560	19.905	40610
Valeta VPA 03	m	2.460	1.920	1.120	560	6.060
Valeta VPC 03	m	1.120	2.180	0	2.700	6.100
Meio-fio – MFC01	m	4.040	8.082	1.602	12.255	25.980
Sarjeta – STC 03	m	4.850	9.540	1.020	19.780	35.190
Cerca	m	7.190	6.560	700	9.470	23.920
Sinalização horizontal	km	8,02	11,84	1,1	28,82	49,78

(*) Soma de bueiros tubulares e celulares de diferentes seções transversais

6.3 APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

A partir desses serviços mais relevantes e de suas quantidades projetadas, passou-se a aplicar o modelo de simulação por agentes desenvolvido nessa tese e apresentado anteriormente. Para fins didáticos, o estudo de caso será simulado por disciplinas do projeto de engenharia, na sequência de execução em campo, sendo cada disciplina representada pelo(s) serviço(s) mais relevante(s) à elaboração do cronograma físico da obra.

6.3.1 Obtenção e preparação de dados

A seguir serão apresentados os produtos indicados, no Capítulo 4, para esse subsistema e que se adequam ao estudo de caso proposto e ao escopo do trabalho.

6.3.1.1 Detalhamento da EAP do empreendimento, considerando os segmentos homogêneos propostos:

A Figura 6-4 apresenta a Estrutura Analítica de Projeto elaborada para o planejamento da obra da BR-163/PA. A EAP é o instrumento capaz de expressar por meio de uma imagem as entregas previstas no projeto. Representa a decomposição hierárquica do(s) produto(s) do projeto orientada à definição dos entregáveis. A EAP considerou os mesmos segmentos homogêneos previstos no Projeto Executivo. Esses segmentos foram definidos a partir do estado parcial de execução dos serviços, considerando as intervenções anteriores.

A EAP contém tanto as atividades operacionais quanto as atividades logísticas e/ou administrativas. Isso, por si só, já representa avanço significativo na metodologia atual, que considera apenas as atividades oriundas da planilha de quantidade de serviços do projeto. Essa falha de procedimento induz o planejador ao erro, pois induz a que as atividades predecessoras à execução dos serviços de engenharia sejam ou esquecidas, ou relegadas ao segundo plano.

A consequência natural é uma falta de coordenação e foco entre os diversos setores da empresa. Estima-se que um cronograma que desconsidere as atividades logísticas e administrativas possua menos de 50% do total de tarefas necessária a conclusão do objeto. Essa percepção pode ser facilmente avaliada na EAP sugerida para a execução da BR-163/PA. Na EAP proposta, as atividades operacionais foram desmembradas até o nível dos pacotes de trabalho. Neste caso, optou-se por considerar como pacotes de trabalho as equipes

de trabalho que deverão ser alocadas para a execução da obra. Esse procedimento é recomendado como forma de evitar o número excessivo de atividades no cronograma, o que dificulta o seu entendimento e utilização no canteiro de trabalho como ferramenta de acompanhamento da obra.

Outro benefício dessa prática é permitir, juntamente com o desmembramento do empreendimento em segmentos homogêneos, a inclusão da dimensão espacial (locacional) nos cronogramas. Isso decorre da possibilidade de se acompanhar a movimentação interna das equipes de trabalho por sobre as entregas parciais da obra. Como exemplo na construção de um edifício, seria possível inferir em que laje e até em que parede estará a equipe de alvenaria atuando em determinada data. Parece uma questão óbvia, mas os cronogramas atuais se apresentam de forma tão agregada que dificultam essa visualização.

6.3.1.2 Lista de quantidades de serviços por segmento homogêneo da rodovia:

As informações necessárias para a simulação da disciplina terraplenagem foram obtidas no Projeto de Terraplenagem, pertencente ao Volume 2 do Projeto Executivo da BR-163/PA – Lote 1.4. Os volumes de escavação e de compactação de aterro, por segmento homogêneo, constam da Tabela 6-2.

As informações necessárias para a simulação da disciplina Obras de Arte Corrente foram obtidas no quadro de Quantidades Unitárias de Bueiros, que compõe o Projeto de Drenagem e Obras de Arte Corrente, pertencente ao Volume 2 do Projeto Executivo da BR-163/PA – Lote 1.4. Neste quadro, resumido e adaptado à Tabela 6-3, constam 16 bueiros de diferentes tipos, divididos por Segmento, que deverão ser construídos para permitir o escoamento das águas existentes nos talwegues que cruzam o leito estradal.

Houve necessidade de uniformizar os diferentes tipos de bueiros adotando-se o BSTC 1,0 m como padrão da simulação. Para tanto, foram calculados comprimentos equivalentes ao BSTC dos outros tipos de bueiros a partir do volume de concreto por metro linear de bueiro. Para o cálculo da contribuição das bocas dos bueiros foram consideradas 02 bocas diluídas em um bueiro médio com 15 m de extensão. A Tabela 6-4 apresenta os fatores de equivalência utilizados para esse cálculo. Da mesma forma que na terraplenagem, há a intenção de só

liberar um trecho de rodovia quando todo o comprimento de bueiro previsto naquele trecho estiver concluído.

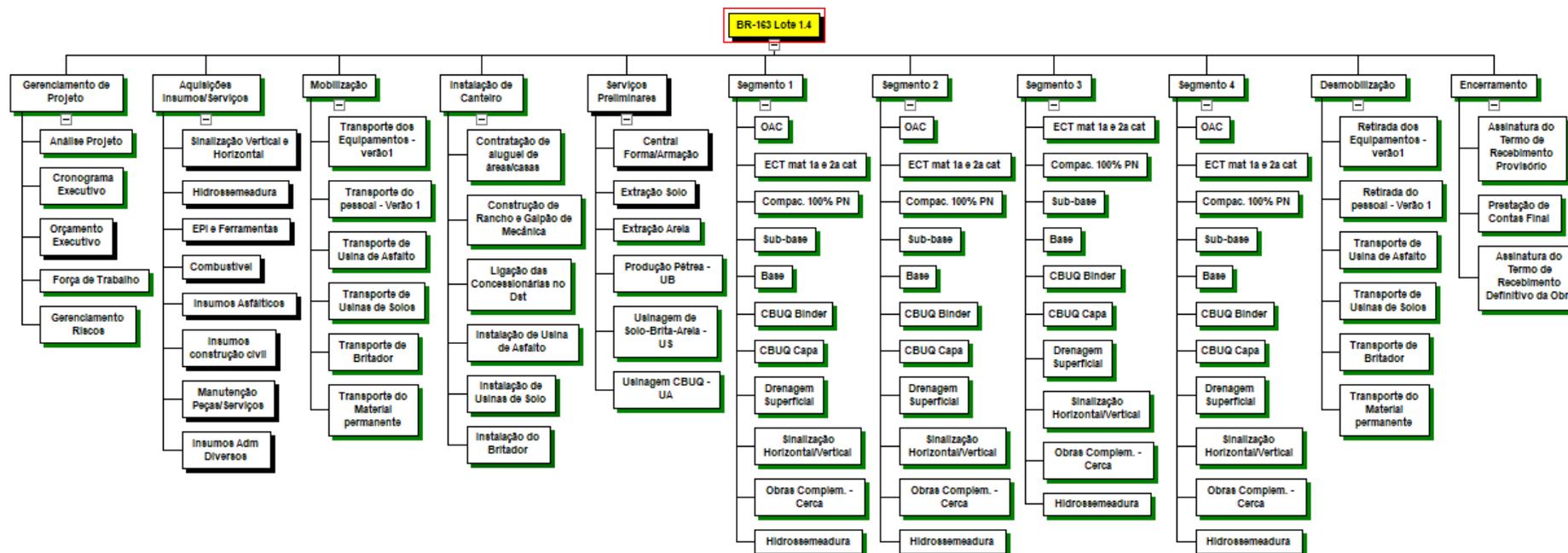


Figura 6-4 – EAP BR-163

Tabela 6-3 – Quadro de Quantidades Unitárias de Bueiros

SEGMENTO	ESTACA	KM	TIPO	COMPRIMENTO (m)	COMPRIMENTO EQUIVALENTE (m)
1	23.030 + 4,30	0,38	BDCC 3,0x3,0	30,00	187,67
	23.139 + 0,00	2,56	BSTC 1,0	24,00	24,00
	23.286 + 9,50	5,51	BSTC 1,0	23,00	23,00
	23.336 + 11,00	6,51	BDTC 1,0	28,00	55,99
SUBTOTAL					290,66
2	23.440 + 2,00	8,58	BDTC 1,0	19,00	37,99
	23.687 + 10,00	13,53	BDTC 1,0	25,00	49,99
	23.805 + 0,00	15,88	BSTC 1,0	59,00	59,00
	23.837 + 0,00	16,52	BSTC 1,0	27,00	27,00
SUBTOTAL					173,99
4	24.104 + 0,00	21,86	BTTC 1,0	35,00	92,13
	24.147 + 0,00	22,72	BDTC 1,0	19,00	37,99
	24.901 + 6,00	37,81	BTTC 1,0	22,00	57,91
	25.003 + 16,00	39,86	BTCC 1,5x1,5	21,00	65,29
	25.067 + 0,00	41,12	BDTC 1,0	25,00	49,99
	25.090 + 12,50	41,58	BTCC 1,5x1,5	41,00	127,47
	25.516 + 6,55	50,11	BDTC 1,0	24,00	47,99
	25.877 + 0,00	57,32	BSTC 1,0	32,00	32,00
SUBTOTAL					510,77
TOTAL					975,42

Tabela 6-4 – Fatores de Equivalência para Bueiros

TIPO	TUBO	CORPO	BOCAS	VOLUME CONCRETO (m3/m)	FATOR EQUIVALÊNCIA
BSTC 1,0	0,4222	0,57	0,48	1,468	1,00
BDTC 1,0	0,8444	1,41	0,68	2,935	2,00
BTTC 1,0	1,2666	1,71	0,89	3,864	2,63
BSTC 1,2	0,5432	0,79	0,73	2,062	1,41
BDTC 1,2	1,0864	1,57	1,05	3,708	2,53
BTTC 1,2	1,6296	2,36	1,37	5,354	3,65
BSCC 1,5x1,5		1,21	1,01	2,223	1,51
BDCC 1,5x1,5		2,17	1,09	3,255	2,22
BTCC 1,5x1,5		3,11	1,45	4,563	3,11
BSCC 2,0x2,0		1,57	1,61	3,181	2,17
BDCC 2,0x2,0		2,80	1,82	4,620	3,15
BTCC 2,0x2,0		4,01	2,34	6,350	4,33
BSCC 2,5x2,5		2,53	2,20	4,733	3,22
BDCC 2,5x2,5		3,52	2,65	6,173	4,21
BTCC 2,5x2,5		5,09	3,26	8,354	5,69
BSCC 3,0x3,0		3,68	3,21	6,885	4,69
BDCC 3,0x3,0		5,31	3,87	9,182	6,26
BTCC 3,0x3,0		7,65	4,73	12,375	8,43

No caso da execução das camadas de sub-base e base as informações necessárias para a simulação foram obtidas no Projeto de Pavimentação (localização de fontes de materiais, definição de espessuras e componentes da mistura) constantes do Projeto Executivo da BR-163/PA – Lote 1.4. A Tabela 6-5 apresenta as localizações das fontes de material de construção utilizadas para a mistura da Sub-base e da Base.

Tabela 6-5 – Localização Elementos Cadeia Suprimentos

ELEMENTO	ESTACA	Km
Pedreira - P1	23.700	474,0
Areia - A1	24.567	491,3
Jazida - J1	22.856	457,1
Jazida - J2	24.255	485,1
Jazida - J3	24.472	489,4

Na disciplina de Pavimentação existe uma distribuição uniforme do volume necessário de sub-base ou base ao longo da extensão da rodovia. A consequência é que o avanço depende exclusivamente da frente de serviço disponível de terraplenagem e OAC, o que simplifica a entrada de dados, não havendo a necessidade de preparação prévia de dados.

No caso da execução da camada de CBUQ as informações necessárias para a simulação também foram obtidas no Projeto de Pavimentação do Projeto Executivo da BR-163/PA – Lote 1.4. Por simplificação, a camada de revestimento em CBUQ foi considerada com espessura e largura constantes. Assim o avanço desta disciplina depende exclusivamente da frente de serviço disponível de base, o que também simplifica a modelagem.

As informações necessárias para a simulação da disciplina Drenagem Superficial também constam de quadros de quantidades para cada tipo de dispositivo no Volume 2 do Projeto Executivo da BR-163/PA – Lote 1.4. A Tabela 6-6 e a Tabela 6-7 apresentam os dispositivos de drenagem superficial previstos no projeto da rodovia.

Esses dispositivos foram divididos nos 04 segmentos homogêneos. Devido a variedade de dispositivos foi necessário calcular comprimentos equivalentes, tendo como referência a Valeta de Proteção de Corte – VPC03. Assim como na OAC, o cálculo do fator de equivalência considerou o volume de concreto previsto do projeto-tipo de cada dispositivo, conforme previsto no projeto de engenharia.

Tabela 6-6 – Comprimento Equivalente Drenagem 01

SEGMENTO	TIPO	COMPRIMENTO (m)	COMPRIMENTO EQUIVALENTE (m)
S1	VPA-03	2460,00	5086,22
	VPC-03	1220,00	1220,00
	DAD-02	159,54	178,94
	DAR-03	394,38	365,07
	SUBTOTAL		
S2	VPA-03	1920,00	3969,73
	VPC-03	2180,00	2180,00
	DAD-02	199,42	223,67
	DAR-03	492,98	456,34
	SUBTOTAL		
S3	VPA-03	1120,00	2315,68
	VPC-03	0,00	0,00
	DAD-02	39,88	44,73
	DAR-03	98,60	91,27
	SUBTOTAL		
S4	VPA-03	560,00	1157,84
	VPC-03	2700,00	2700,00
	DAD-02	398,84	447,35
	DAR-03	985,96	912,68
	SUBTOTAL		
		TOTAL	21349,51

Tabela 6-7 – Comprimento Equivalente Drenagem 02

SEGMENTO	TIPO	COMPRIMENTO (m)	COMPRIMENTO EQUIVALENTE (m)
S1	MFC-01	4040,00	4040,00
	STC-02	4850,00	4190,78
	SUBTOTAL		
S2	MFC-01	8082,78	8082,78
	STC-02	9540,00	8243,30
	SUBTOTAL		
S3	MFC-01	1602,08	1602,08
	STC-02	1020,00	881,36
	SUBTOTAL		
S4	MFC-01	12255,22	12255,22
	STC-02	19780,00	17091,46
	SUBTOTAL		
		TOTAL	56386,97

A Tabela 6-8 e a Tabela 6-9 apresentam os fatores de equivalência para os dispositivos de drenagem superficial.

Tabela 6-8 – Fatores de Equivalência Drenagem 01

TIPO	VOLUME CONCR. (m3/m)	FATOR EQUIVALÊNCIA
VPC-03	0,148	1,00
VPA-03	0,306	2,07
DAD-02	0,166	1,12
DAR-03	0,137	0,93

Tabela 6-9 – Fatores de Equivalência Drenagem 02

TIPO	VOLUME CONCR. (m3/m)	FATOR EQUIVALÊNCIA
MFC-01	0,103	1,00
STC-02	0,089	0,86

6.3.1.3 Necessidade de materiais (MRP³²) de insumos e de produtos usinados:

O gráfico do MRP divide cada disciplina em produtos acabados, componentes e estes em insumos básicos. A Figura 6-5 apresenta a composição de materiais necessários à fabricação de cada produto usinado. Essa decomposição facilita o entendimento sobre os fluxos de produção necessários a execução dos serviços previstos na rodovia.

6.3.1.4 Sequenciamento de atividades:

Dentre os problemas clássicos de programação de operações em sistemas de capacidade infinita destaca-se a programação de n tarefas em m máquinas com padrão de fluxo *flowshop*. O fluxo *flowshop* indica que cada tarefa passa por uma sequência fixa de máquinas. A Heurística NEH foi escolhida, pois soluciona esse problema através da regra de sequenciamento das atividades LPT (maior tempo de processamento) a fim de minimizar o *makespan*, ou seja, o tempo total para concluir as tarefas.

Por analogia, optou-se por utilizar essa heurística na definição de qual sequenciamento entre os segmentos homogêneos leva a menor duração total do projeto. No caso em estudo, cada segmento homogêneo é uma tarefa e cada tarefa passa por uma sequência fixa de máquinas/equipes de trabalho. O problema consiste então em programar quatro segmentos homogêneos (tarefas) em uma sequência fixa de nove serviços de engenharia (máquinas).

³² MRP – Material Resources Planning ou Planejamento de Recursos de Manufatura é um sistema de programação da produção de componentes e de produtos acabados

A Heurística NEH consiste na aplicação do seguinte algoritmo:

- Passo 1: ordene as tarefas em ordem decrescente pela regra LPT (considerando a soma dos tempos de processamento em todas as máquinas);
- Passo 2: com as duas primeiras tarefas da ordenação obtida, encontre a sequência (entre as duas possíveis) com menor makespan;
- Passo 3: sem alterar a posição relativa das tarefas já alocadas, insira a próxima tarefa da sequência obtida no passo 1 em todas as posições possíveis da subsequência atual e considere a que fornece menor makespan;
- Passo 4: repita o passo 3 até que todas as tarefas estejam programadas.

Observa-se que a duração total encontrada é de 541 dias e indica a sequência S3 – S2 – S4 – S1. Se por acaso, a decisão fosse executar a obra na sequência crescente do estaqueamento (solução mais comum), ou seja, S1 – S2 – S3 – S4, o prazo da obra seria de 600 dias, um acréscimo significativo de 59 dias ou 10,91 %. Isso demonstra a pertinência de se utilizar essa heurística como critério preliminar de programação.

O prazo de 600 dias é muito próximo ao prazo do projeto de engenharia, que prevê a conclusão da obra em 570 dias (19 meses) de efetivos trabalhos (descontados 10 meses de chuva e 01 mês de mobilização).

A Tabela 6-10 apresenta a “macro” desenvolvida no Excel para o cálculo automático da heurística sugerida. Nela os dados de entrada são as durações calculadas de cada uma das equipes de trabalho. A Tabela 6-11 corresponde ao resultado indicado pela heurística. As Tabelas 6-12 e 6-13 apresentam os resultados das simulações realizadas para diferentes sequências de execução entre os segmentos homogêneos.

6.3.2 Desenho da Rede Logística

Esse subsistema é o responsável pelo dimensionamento e a localização dos elementos que compõem a rede logística. No caso em estudo, o problema de localização de facilidades pode ser aplicado à localização das unidades de produção e à seleção de fornecedores e de suas áreas de abastecimento. A localização das unidades de produção é tão complexa quanto a quantidade de fontes de materiais e quanto às restrições de transporte e estocagem existentes.

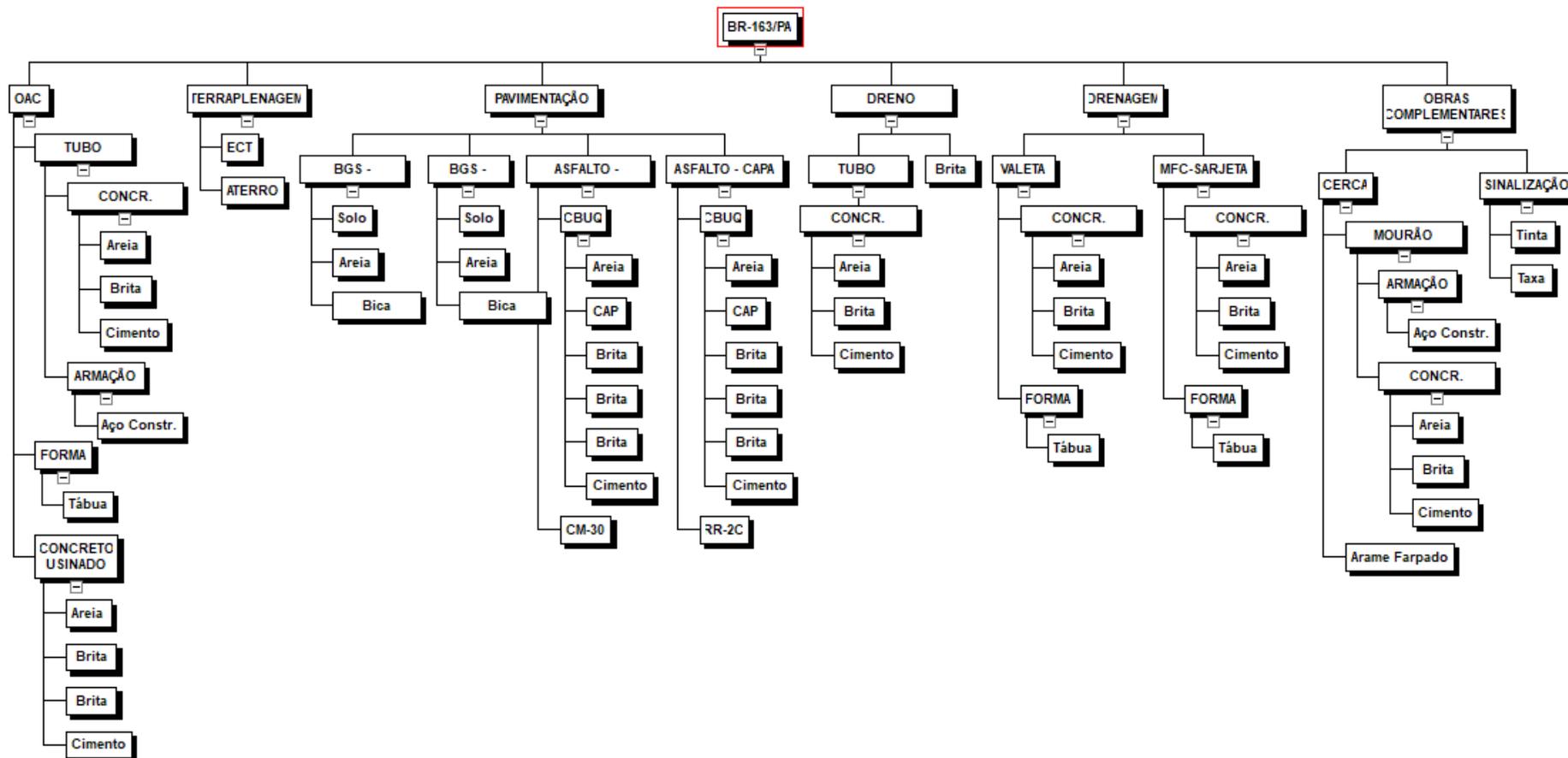


Figura 6-5 – MRP BR-163

Tabela 6-10 – Macro Heurística - NEH

RODAR MACRO		PROBLEMA: PROGRAMAR n TAREFAS EM m MÁQUINAS COM PADRÃO DE FLUXO FLOWSHOP E FUNÇÃO OBJETIVO DE MINIMIZAR O MAKESPLAN (DURAÇÃO TOTAL)														
		SEG HOM	KM INICIAL	KM FINAL	EX T.	EQUIPE TERRAP	EQUIPE SUBBASE	EQUIPE BASE	EQUIPE ASF. - BINDER	EQUIPE ASF. - CAPA	EQUIPE OAC	EQUIPE DREN. PROF.	EQUIPE VALETA	EQUIPE MFC E SARJETA	EQUIPE CERCA	EQUIPE SINAL. HOR.
		S1	460,22	468,24	8,02	40.000,00	22.300,00	21.300,00	15.240,00	8.350,00	790,90	7.125,00	3.680,00	12.640,00	7.190,00	8,02
		S2	475,88	487,72	11,84	86.000,00	32.431,00	31.030,00	22.380,00	12.235,00	174,00	13.020,00	4.100,00	29.330,00	6.560,00	11,84
		S3	489,92	491,02	1,10	5.060,00	3.013,00	2.883,00	2.080,00	1.137,00	-	560,00	1.120,00	1.680,00	700,00	1,10
		S4	495,24	524,06	28,82	142.000,00	78.491,00	75.531,00	54.476,00	29.782,00	482,55	19.905,00	3.260,00	31.875,00	9.470,00	28,82
UND					km	m3	m3	m3	t	t	m	m	m	m	m	km

Tabela 6-11 – Resultado Sequenciamento BR-163/PA

S	OAC		TERRA		DREN PROF		SUBBASE		BASE		BINDER		CAPA		MFC		SIN HOR	
S3	0	0	0	4	4	6	6	9	9	12	12	16	16	18	18	25	25	27
S2	0	11	11	64	64	90	90	115	115	139	139	177	177	198	198	251	251	263
S4	11	42	64	152	152	191	191	250	250	307	307	398	398	448	448	503	503	532
S1	42	92	152	177	191	205	250	267	307	323	398	424	448	462	503	532	532	541

Tabela 6-12 – Cenário: Sequência Crescente Estaqueamento

S	OAC		TERRA		DREN PROF		SUBBASE		BASE		BINDER		CAPA		MFC		SIN HOR	
S1	0	50	50	75	75	89	89	106	106	122	122	148	148	162	162	191	191	200
S2	50	61	75	128	128	154	154	179	179	203	203	241	241	262	262	315	315	327
S3	61	61	128	132	154	156	179	182	203	206	241	245	262	264	315	322	327	329
S4	61	92	132	220	220	259	259	318	318	375	375	466	466	516	516	571	571	600

Tabela 6-13 – Cenário: Sequência Decrescente Estaqueamento

S	OAC		TERRA		DREN PROF		SUBBASE		BASE		BINDER		CAPA		MFC		SIN HOR	
S4	0	31	31	119	119	158	158	217	217	274	274	365	365	415	415	470	470	499
S3	31	31	119	123	158	160	217	220	274	277	365	369	415	417	470	477	499	501
S2	31	42	123	176	176	202	220	245	277	301	369	407	417	438	477	530	530	542
S1	42	92	176	201	202	216	245	262	301	317	407	433	438	452	530	559	559	568

No caso da BR-163/PA, o problema de localização das Usinas de Concreto (UC) e da Usina de Asfalto (UA) é de fácil solução, pois só existe uma fonte possível de areia, de brita e de cimento Portland e asfáltico. Nesse caso, a decisão de localização, com critério de minimização do custo de transporte, se resume à localização de cada uma das fontes. Isso ocorre, pois, o objetivo é zerar uma das distâncias de transporte. Então é fácil deduzir que a escolha se dará pelo maior volume a ser transportado. Tanto no caso das UC e UA, o maior volume previsto no traço é o de brita. Assim ambas as usinas deverão ser alocadas, o mais próximo possível da pedreira de projeto.

Com relação a Usina de Solo (US), o problema de localização pode ser descrito da seguinte forma: são três jazidas de solo (J1, J2 e J3); uma jazida de areia (A1) e uma jazida de pedra (P1) previstas no projeto de engenharia e que fornecerão materiais básicos para a produção de sub-base e de base. A US possui capacidade limitada de produção e pode ser localizada em cinco locais pré-selecionados. Cada local possui um custo de instalação da usina.

O produto usinado será transportado para depósitos intermediários ao longo do trecho de rodovia a ser construído. Os depósitos serão localizados no centro geométrico de cada segmento homogêneo proposto. Cada depósito possui uma demanda definida pelo volume de material necessário no segmento, conforme o projeto de engenharia. O objetivo (Função Objetivo – FO) é localizar a US a fim de minimizar o custo total composto pela soma do custo de transporte de insumos básicos para a usina, do custo de transporte do material usinado para os depósitos e o custo de instalação da usina.

A definição das áreas de abastecimento de cada jazida de solo segue a mesma lógica aplicada na localização da US. O objetivo é definir de onde deve vir o solo para cada segmento homogêneo, considerando o menor custo de total de transporte.

O atendimento da Função Objetivo deve ainda considerar:

- Capacidade de fornecimento de insumos das jazidas;
- Custos de extração do solo em cada jazida de projeto;
- Distâncias reais de transporte e velocidades médias em rodovias pavimentadas ou não pavimentadas;
- Custo de instalação da usina em cada local (incluindo aluguel da área);

- Possibilidade de instalar 1, 2 ou 3 usinas para emprego simultâneo;
- Traços reais da sub-base e da base previstos no projeto; e
- Demandas de sub-base e de base previstas no projeto para cada segmento.

Como explicado anteriormente, o problema é resolvido pelo emprego de Programação Linear, com emprego da ferramenta “Solver”, disponível no Excel.

6.3.2.1 Dimensionamento preliminar da capacidade (metodologia tradicional):

A Tabela 6-4 demonstra o cálculo tradicional de duração de atividades por equipe de trabalho. As quantidades de serviços são extraídas das planilhas de quantidades dos projetos, enquanto as produções diárias são obtidas pelo produto entre a produtividade indicada nas fichas de composição dos serviços de engenharia pela quantidade estimada de horas de trabalho por dia.

6.3.2.2 Seleção da localização dos fornecedores e das instalações através da Programação Linear:

Conforme apresentado anteriormente³³, utilizou-se a PL para localização e dimensionamento da capacidade (número de usinas) e definição da área de abrangência de cada jazida de solo. Cada elemento da cadeia logística foi identificado por um número (fornecedores de 1 a 5; localizações possíveis para a usinas de solo, de 6 a 8; e depósitos intermediários de 9 a 12) e sua localização, pelo estaqueamento previsto no projeto de engenharia (uma estaca igual a 20 m).

As distâncias de transporte foram calculadas em duas planilhas, uma para o transporte de insumos e outra para o transporte do produto usinado (mistura de para sub-base e para base), onde a par linha x coluna representa a origem x destino (OxD) do trajeto calculado. Nessas planilhas constam ainda as capacidades tanto das fontes de materiais quanto das US. As capacidades das jazidas foram obtidas do projeto de engenharia; já a capacidade máxima de produção da US foi calculada em 330.000 m³ considerando a produção estimada para um turno de trabalho de 8 h/dia, 22 dias/mês durante os 15 meses de produção (tempo seco) previstos no projeto para conclusão da obra.

³³ Ver Capítulo 4 para detalhes da formulação matemática proposta.

Tabela 6-14 – Planilha de Cálculo de Duração de Atividades

DESCRIÇÃO DA ATIVIDADE	UND	QUANT	PRODUÇÃO POR EQUIPE (DIÁRIA)	NR EQUIPES	DURAÇÃO (dias)	
					CALCULADA	ADOTADA
SEGMENTO HOMOGÊNEO - S1						
BUEIRO TUBULAR BSTC 1,0 m	m	290,66	8,00	1	36,33	37,0
TERRAPLENAGEM (40%)	m3	40.000,00	1.136,80	1	35,19	36,0
DRENO PROFUNDO - DPS	m	7.125,00	120,00	2	29,69	30,0
SUB-BASE	m3	22.300,00	940,80	1	23,70	24,0
BASE BGS	m3	21.300,00	940,80	1	22,64	23,0
CBUQ	t	23.590,00	420,00	1	56,17	57,0
DRENAGEM SUPERFICIAL _ MFC	m	8.230,78	80,00	3	34,29	35,0
DRENAGEM SUPERFICIAL _ VALETA	m	6.850,23	120,00	1	57,09	58,0
SINALIZAÇÃO	km	8,02	0,33	1	24,06	25,0
CERCA	m	7.190,00	160,00	2	22,47	23,0
SEGMENTO HOMOGÊNEO - S2						
BUEIRO TUBULAR BSTC 1,0 m	m	173,99	8,00	1	21,75	22,0
TERRAPLENAGEM (40%)	m3	86.000,00	1.136,80	2	37,83	38,0
DRENO PROFUNDO - DPS	m	13.020,00	120,00	2	54,25	55,0
SUB-BASE	m3	32.431,00	940,80	1	34,47	35,0
BASE BGS	m3	31.030,00	940,80	1	32,98	33,0
CBUQ	t	34.615,00	420,00	1	82,42	83,0
DRENAGEM SUPERFICIAL _ MFC	m	16.326,08	80,00	3	68,03	69,0
DRENAGEM SUPERFICIAL _ VALETA	m	6.829,74	120,00	1	56,91	57,0
SINALIZAÇÃO	km	11,84	0,33	1	35,52	36,0
CERCA	m	6.560,00	160,00	2	20,50	21,0
SEGMENTO HOMOGÊNEO - S3						
BUEIRO TUBULAR BSTC 1,0 m	m	-	8,00	1	0,00	0,0
TERRAPLENAGEM (40%)	m3	5.060,00	1.136,80	1	4,45	5,0
DRENO PROFUNDO - DPS	m	560,00	120,00	1	4,67	5,0
SUB-BASE	m3	3.013,00	940,80	1	3,20	4,0
BASE BGS	m3	2.883,00	940,80	1	3,06	4,0
CBUQ	t	3.217,00	420,00	1	7,66	8,0
DRENAGEM SUPERFICIAL _ MFC	m	2.483,44	80,00	1	31,04	32,0
DRENAGEM SUPERFICIAL _ VALETA	m	2.451,68	120,00	1	20,43	21,0
SINALIZAÇÃO	km	1,10	0,33	1	3,30	4,0
CERCA	m	700,00	160,00	1	4,38	5,0
SEGMENTO HOMOGÊNEO - S4						
BUEIRO TUBULAR BSTC 1,0 m	m	510,77	8,00	1	63,85	64,0
TERRAPLENAGEM (40%)	m3	142.000,00	1.136,80	2	62,46	63,0
DRENO PROFUNDO - DPS	m	19.905,00	120,00	2	82,94	83,0
SUB-BASE	m3	78.491,00	940,80	1	83,43	84,0
BASE BGS	m3	75.531,00	940,80	1	80,28	81,0
CBUQ	t	84.258,00	420,00	2	100,31	101,0
DRENAGEM SUPERFICIAL _ MFC	m	29.346,68	80,00	3	122,28	123,0

DESCRIÇÃO DA ATIVIDADE	UND	QUANT	PRODUÇÃO POR EQUIPE (DIÁRIA)	NR EQUIPES	DURAÇÃO (dias)	
					CALCULADA	ADOTADA
DRENAGEM SUPERFICIAL _ VALETA	m	5.217,86	120,00	1	43,48	44,0
SINALIZAÇÃO	km	28,82	0,33	1	86,46	87,0
CERCA	m	9.470,00	160,00	2	29,59	30,0

Da mesma forma existem duas planilhas para os custos de transporte para cada par OxD. Os custos foram calculados a partir do produto entre a distância de transporte e a tarifa (em R\$/m³ por km). As tarifas, por sua vez, foram calculadas a partir dos custos de transporte divulgados no site do DNIT (R\$/t por km) divididas pela densidade de cada material a fim de obter o custo por m³. As quantidades de cada material foram calculadas pelo produto entre a soma das quantidades de SB e Base pelo percentual previsto no traço, em volume. Por simplificação foi calculado o percentual médio entre SB e Base.

O custo fixo de instalação das usinas foi calculado para três cenários: p=1, p=2 e p=3 usinas simultâneas. O custo considerou a soma de três parcelas: o valor depreciado da usina (produto entre o número de horas trabalhadas e o custo horário de depreciação – R\$ 50,00/h); o custo fixo de implantação da usina (estimado em R\$ 50.000,00 por usina) e o custo de aluguel da área (estimado em R\$ 8.000,00/mês por usina). Para o cálculo do custo de aluguel foi considerado o período total da obra – 30 meses.

O resultado encontrado, que atendeu a todas as restrições impostas, indicou a necessidade de utilização de apenas uma US, na posição 7 (US2 - estaca 24.472). A Tabela 6-15 apresenta os resultados dos diversos cenários simulados. Convém observar que as diferenças são significativas, mesmo dentro da opção de uma única usina, ainda mais se for considerada a relevância dos custos de transporte no orçamento da obra.

As Tabelas 6-16 e 6-17 apresentam os cálculos dos parâmetros de entrada e a planilha-base para estruturação do problema. A Figura 6-6 apresenta a tabela de entrada das restrições no Solver.

6.3.3 Entrada de Dados

Definida a segmentação da rodovia em estudos, as quantidades de serviços por segmento, e a quantidade e localização dos elementos da cadeia logística, resta o cadastro desses elementos

em uma planilha de Excel elaborada para permitir que o sistema desenvolvido no *Anylogic* colete os parâmetros para executar a simulação. A escolha desta forma de entrada de dados, via Excel, teve por objetivo diminuir a carga de programação e simplificar o processo de coleta de dados.

Tabela 6-15 – Custo Total Instalação e Transporte - Usina de Solo BR-163/PA

NR US (p)	POSIÇÃO	CUSTO TOTAL (R\$)	DIFERENÇA (%)
1	Y ₆	2.635.656,32	0,09%
	Y ₇	2.633.221,13	–
	Y ₈	2.999.872,96	13,92%
2	Y ₆ - Y ₇	3.030.032,84	15,07%
	Y ₆ - Y ₈	2.936.856,91	11,53%
	Y ₇ - Y ₈	2.889.699,87	9,74%
3	Y ₆ - Y ₇ - Y ₈	2.963.047,11	12,53%

Definir Objetivo: ↑

Para: Máx. Mín. Valor de:

Alterando Células Variáveis: ↑

Sujeito às Restrições:

Tornar Variáveis Irrestritas Não Negativas

Selecionar um Método de Solução: ↓

Método de Solução

Selecione o mecanismo GRG Não Linear para Problemas do Solver suaves e não lineares.
 Selecione o mecanismo LP Simplex para Problemas do Solver lineares. Selecione o mecanismo Evolutionary para problemas do Solver não suaves.

Figura 6-6 – Restrições no Solver

Tabela 6-16 – Dados de Entrada para Programação Linear

DISTÂNCIAS DE TRANSPORTE - km					CUSTO DE TRANSPORTE - R\$/m3									
FORNECEDORES	USINA SOLO			SUPRIM. DISP.	ELM	ESTACA	FORN.	USINA SOLO			CUSTO DE TRANSPORTE - R\$/m3			
	US1 (6)	US2 (7)	US3 (8)					US1 (6)	US2 (7)	US3 (8)	DEP1 (9)	DEP2 (10)	DEP3 (11)	DEP4 (12)
P1 (1)	11,10	15,44	21,24	138.137,51	P1	23700	P1 (1)	3,44	4,79	6,58				
A1 (2)	6,24	1,90	3,90	50.000,00	A1	24567	A1 (2)	2,58	0,79	1,61				
J1 (3)	27,98	32,32	38,12	56.250,00	J1	22856	J1 (3)	9,64	11,13	13,13				
J2 (4)	0,00	4,34	10,14	36.608,00	J2	24255	J2 (4)	0,00	1,49	3,49				
J3 (5)	4,34	0,00	5,80	44.226,00	J3	24472	J3 (5)	1,49	0,00	2,00				
TOTAL SB	136.235,00	130.744,00		325.221,51	US1	24255								
DISTÂNCIAS DE TRANSPORTE - km					US2	24472								
USINA SOLO	DEPÓSITOS				CAP. US	US3	24762	CUSTO DE TRANSPORTE - R\$/m3						
	DEP1 (9)	DEP2 (10)	DEP3 (11)	DEP4 (12)		USINA SOLO	DEPÓSITOS							
US1 (6)	20,87	3,30	8,03	24,55	330.000,00	DEP1	23211,5	US1 (6)	6,99	1,11	2,69	8,23		
US2 (7)	25,21	7,64	3,69	20,21	330.000,00	DEP2	24090	US2 (7)	8,45	2,56	1,24	6,77		
US3 (8)	31,01	13,44	2,11	14,41	330.000,00	DEP3	24656,5	US3 (8)	10,39	4,50	0,71	4,83		
DEM. NEC.	43.600,00	63.461,00	5.896,00	154.022,00		DEP4	25482,5							
EXTENSÃO	49.800,00	m												
Q _{BRITA}	125.579,55	m3												
Q _{SOLO}	101.078,05	m3												
Q _{AREIA}	40.321,40	m3												
Total	266.979,00	m3												
TARIFA	R\$/m3*km	TRAÇO SBASE	%	CUSTO FIXO	R\$									
AREIA	0,41	AREIA	0,15	US1 (6)	396.791,60	343.395,80	325.597,20							
SOLO	0,34	SOLO	0,38	US2 (7)	396.791,60	343.395,80	325.597,20							
PEDRA	0,31	PEDRA	0,47	US3 (8)	396.791,60	343.395,80	325.597,20							
SBASE	0,34				p=1	p=2	p=3							

Tabela 6-17 – Planilha de Entrada para Programação Linear

VARIÁVEL	Y ₆	Y ₇	Y ₈	X ₁₆	X ₁₇	X ₁₈	X ₂₆	X ₂₇	X ₂₈	X ₃₆	X ₃₇	X ₃₈	X ₄₆	X ₄₇	X ₄₈	X ₅₆	X ₅₇
FO (MIN)	343.395,80		343.395,80	918.674,74		1.757.896,53	688.592,24		430.370,15	2.573.024,94		3.505.493,60	-		932.468,65	399.103,94	
R1	1		1														
R2				1		1											
R3							1		1								
R4										1		1	1		1	1	
R5										1		1					
R6													1		1		
R7																1	
R8																	
R9																	
R10																	
R11																	
R12				1			1			1			1			1	
R13						1			1			1			1		
R14				0,16			-0,45										
	2,00	-	-	0,21	-	0,26	-	-	0,15	0,08	-	-	0,14	-	-	-	-

X ₅₈	X ₆₉	X ₆₁₀	X ₆₁₁	X ₆₁₂	X ₇₉	X ₇₁₀	X ₇₁₁	X ₇₁₂	X ₈₉	X ₈₁₀	X ₈₁₁	X ₈₁₂	TOTAL	SINAL	b
533.364,71	1.867.323,28	295.264,34	718.476,57	2.196.587,76					2.774.590,08	1.202.531,14	188.790,23	1.289.320,96	2.820.571,84		
													2,00	=	2,00
													0,47	=	0,45
													0,15	=	0,16
1													0,38	=	0,39
													0,08	≤	0,21
													0,14	≤	0,13
1													0,17	≤	0,16
	1								1				0,16	=	0,16
		1								1			0,24	=	0,24
			1								1		0,02	=	0,02
				1								1	0,58	=	0,58
	-1	-1	-1	-1									0,00	=	0,00
1									-1	-1	-1	-1	-	=	0,00
													0,03	=	0,00
0,17	0,16	0,24	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	0,58			

Durante a apresentação da planilha de entrada de dados, serão descritas as principais abas que compõem a planilha e em cada uma delas, detalhadas as variáveis que permitem a metodologia proposta ganhar significativos em relação a comumente utilizada no planejamento de obras de infraestrutura. A Figura 6-7 apresenta a sequência de entrada de dados sugerida. Entre parêntesis as abas que deverão ser acessadas em cada fase.

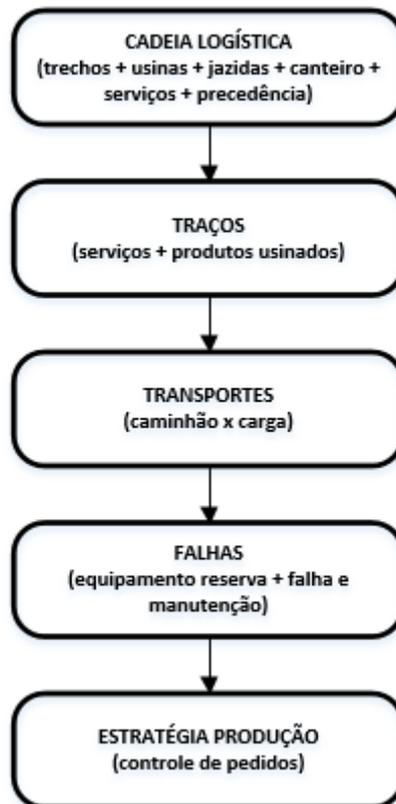


Figura 6-7 – Sequência de Entrada de Dados

As abas são descritas a seguir e apresentadas no Anexo H a este Relatório:

- **Na aba “trechos”**: o cadastro dos segmentos, de seus km inicial e final e a quantidade de serviços (ver Tabela H-1);
- **Na aba “usinas”**: o cadastro das usinas e a localização das usinas; a frota de caminhões alocados e dedicados a cada usina; capacidade de produção horária, nas unidades indicadas, de cada produto usinado. Optou-se por concentrar os veículos de transporte nas usinas. Esses veículos são responsáveis por transportar tanto os produtos usinados às frentes de trabalho quanto os insumos que abastecem as próprias usinas (ver Tabela H-2);

- Na aba **“jazidas”**: o cadastro e a localização das jazidas; o tempo de setup (início de operação diária); e a capacidade de produção/extração diária (ver Tabela H-3);
- Na aba **“canteiro”**: o canteiro funciona como uma usina. A planilha permite o cadastro e a localização dos canteiros; a frota de caminhões alocados e dedicados a cada canteiro; capacidade de produção horária, nas unidades indicadas, de cada produto usinado (ver Tabela H-4);
- Na aba **“serviços”**: cadastro das equipes de trabalho; o estoque mínimo, em dias de produção da equipe, necessário para mobilizar a equipe; cálculo da produtividade diária considerando o grau de adestramento da equipe³⁴ (ver Tabela H-5);
- Na aba **“traço serviços”**: descrição e a quantidade (traço) dos insumos e produtos usinados necessários a execução de cada serviço (ver Tabela H-6);
- Na aba **“traço produto usinado”**: descrição e a quantidade (traço) dos insumos necessários a produção de cada produto usinado (ver Tabela H-7);
- Na aba **“caminhão x carga”**: capacidade de carga de cada tipo de veículo de transporte em unidades específicas de cada insumo ou produto usinado (ver Tabela H-8);
- Na aba **“equipamento reserva”**: tipo, quantidade e tempo de reparação de falhas - MTTR – “main time to repair” ou tempo médio de reparo (ver Tabela H-9);
- Na aba **“falha e manutenção”**: parâmetros relacionados ao módulo de falhas programado nos agentes usinas e equipes de trabalho, conforme detalhado no capítulo anterior. Os parâmetros referem-se a manutenção corretiva (MTBF – tempo médio entre falha e MTTR); a manutenção preventiva (intervalo de manutenção programada e tempo de manutenção programada) e a atuação das equipes de manutenção (tempo de diagnóstico, probabilidade da peça em estoque e tempo de chegada da peça) (ver Tabela H-10);
- Na aba **“precedência”**: ordem de precedência entre as equipes de trabalho. Por exemplo, na linha da equipe de sub-base observa-se que a mesma tem como predecessoras as equipes de OAC, Dreno Profundo e Terraplenagem - indicadas pelo número 1 (ver Tabela H-11);
- Na aba **“controle de pedidos empurrado”**: define o tipo de controle de pedidos³⁵ entre 0 (sem controle, ou seja, produção puramente empurrada limitada apenas a

³⁴ O grau de adestramento pode ser utilizado tanto para simular a curva de aprendizagem durante a obra quanto para aplicar um fator de redução da produtividade teórica das fichas de composição do DNIT.

capacidade de estoque nas usinas); 1 (controle básico – utilizado para produtos perecíveis); 2 (controle avançado - método do ponto de pedido com demanda incerta); 3 (controle avançado - método de revisão periódica com demanda incerta). A escolha do tipo de controle de pedidos depende tanto da característica dos insumos ou produtos usinados quanto da estratégia de estoque adotada (ver Tabela H-12).

6.3.4 Simulação

Esta etapa roda o modelo de simulação por agentes, construído conforme explicado no Capítulo 5 e com os parâmetros inseridos via Excel, nas abas apresentadas na sessão anterior.

Porém, para se aproveitar a facilidade advinda de um sistema informatizado, é importante construir cenários a fim de se estressar o modelo e permitir uma análise de sensibilidade. A imprecisão inerente ao processo de programação de atividades numa obra de construção pesada, independente da complexidade do modelo adotado, nos leva a refletir sobre o que é mais importante na fase de planejamento: a estimativa de uma data de conclusão para a obra ou a análise de sensibilidade deste prazo a determinados parâmetros e premissas adotadas. A resposta passa obrigatoriamente pela seleção de variáveis de controle e pela consequente definição de cenários de simulação.

No caso da BR-163/PA, optou-se por adotar os seguintes cenários;

- **Cenário 1:** linha-base de planejamento. Parâmetros copiados do projeto de engenharia (quantidade e localização das jazidas, fornecedores, canteiro de trabalho, usinas e equipes de produção). Sequenciamento contínuo de produção puramente empurrada. Não considera módulo de falhas;
- **Cenário 2:** utilização do módulo de falhas para variação do MTBF, demais parâmetros do cenário 1;
- **Cenário 3:** variação do tipo de estratégia de produção para produção puramente puxada, demais parâmetros do cenário 1;
- **Cenário 4:** cenário otimizado em função dos resultados dos cenários anteriores e incluindo módulo de falhas.

³⁵ Para a definição, características e formulação de cada tipo de controle sugere-se a consulta ao Livro Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/Logística Empresarial, de Ronalld H. Ballou, capítulo 9 – Decisões sobre política de estoques.

Para a comparação com o cenário-base do projeto executivo foi necessário calcular a quantidade de equipes alocadas de forma indireta, pois a informação não estava disponível no projeto. Assim foram calculadas as durações das atividades, conforme Tabela 6-18. Essas durações, quando inseridas na “macro” desenvolvida para a utilização da heurística NEH levaram a uma duração total de 600 dias úteis.

Já o projeto da rodovia previu a conclusão dos trabalhos em 30 meses, sendo 19 meses de trabalhos efetivos e 11 sem atividades (10 de período chuvoso e 1 de mobilização). Assim 19 meses representam 570 dias. A diferença inferior a 10% é considerada normal e deve-se basicamente a superposição entre atividades na montagem do Gráfico de Gantt.

Tabela 6-18 – Planilha de Cálculo de Duração de Atividades

DESCRIÇÃO DA ATIVIDADE	UND	QUANT	PRODUÇÃO POR EQUIPE (DIÁRIA)	NR EQUIPES	DURAÇÃO (DIAS)	
					CALCULADA	ADOTADA
BUEIRO TUBULAR BSTC 1,0 m	m	975,42	8,00	2	60,96	61,0
TERRAPLENAGEM (40%)	m3	273.060,00	1.624,00	2	84,07	85,0
DRENO PROFUNDO - DPS	m	40.610,00	171,43	3	78,96	79,0
SUB-BASE	m3	136.235,00	1.344,00	1	101,37	102,0
BASE BGS	m3	130.744,00	1.344,00	1	97,28	98,0
CBUQ	t	145.680,00	600,00	1	242,80	243,0
DRENAGEM SUPERFICIAL _ MFC	m	56.386,97	240,00	3	78,32	79,0
DRENAGEM SUPERFICIAL _ VALETA	m	21.349,51	120,00	3	59,30	60,0
SINALIZAÇÃO	km	49,78	1,00	1	49,78	50,0
CERCA	m	23.920,00	400,00	1	59,80	60,0

6.3.5 Saída de Dados e Projeto de Experimentos

Por conveniência, optou-se por reunir esses dois subsistemas. O projeto de experimentos trata da justamente da análise de sensibilidade que foi incorporada ao modelo de simulação através dos diversos cenários propostos. Na Tabela 6-19 são apresentados de forma tabulada alguns dos resultados obtidos para os quatro cenários propostos na etapa de simulação.

Dos quatro cenários simulados, algumas conclusões merecem destaque:

- a) O cenário-base, que procurou simular os mesmos parâmetros de entrada do projeto de engenharia, apresentou uma duração muito superior ao previsto pelo projeto de engenharia (1304 x 570 dias). Isso demonstra que, mesmo sem considerar falhas e contando com estoque inicial de todos os insumos e produtos usinados, a simplificação da metodologia tradicional falha ao pressupor uma capacidade infinita de produção e de fornecimento de insumos e de materiais usinados, ou seja, como se todo insumo e produto usinado necessário às equipes de trabalho estivessem disponíveis na quantidade e no local desejado; como se o único limitante do processo produtivo fosse a capacidade operacional das equipes de trabalho, sem considerar os processos envolvidos na cadeia logística existente na construção civil;
- b) O cenário 2 demonstrou que, como era esperado, o modelo é sensível a falhas de seus equipamentos de produção. Um MTBF igual a 20 dias, que corresponde na prática a uma falha a cada mês de trabalho, indica um acréscimo de 4% na duração da obra. Também se observa que para um MTBF igual a 50 dias cessa esse parâmetro deixa de ser relevante. Isso pode ser usado pelo planejador como meta de eficácia para as equipes de manutenção da obra (ver Figura 6-8);
- c) O cenário 3, ao variar apenas a estratégia de produção passando de puramente empurrada (produção para estoque) para puramente puxada (produção sob encomenda) demonstra que ocorre um desequilíbrio no fluxo de produção, com aumento significativo da duração da obra. Isso demonstra que os *leadtimes* considerados entre o pedido e o recebimento do material provocam um atraso significativo, pois, sem estoques junto aos equipamentos, as taxas de utilização das unidades de produção despencam, reduzindo a produção das equipes. Esse cenário provoca a reflexão sobre a conveniência de se testar uma estratégia mista de produção, capaz de, por um lado, diminuir os estoques e, por outro, evitar a falta de insumos na linha de produção. Isso se consegue controlando o WIP nas atividades gargalo e;

- d) O cenário 4 implementa melhorias no sistema relacionadas a sequência de execução e ao equilíbrio do fluxo de produção a partir do controle do WIP. O resultado representa uma redução significativa, por volta de 12% em relação ao cenário com MTBF de 20 dias.

Tabela 6-19 – Duração dos Cenários Simulados

CENÁRIO	DESCRIÇÃO	DURAÇÃO (dias corridos)
1	Nome: Linha-base de planejamento	1.304,0
	Origem parâmetros: Projeto BR-163/PA	
	Principais parâmetros:	
	. Fontes materiais: 03 jazidas solo, 01 Pedreira e 01 Areal (localização de projeto)	
	. Unidades de produção: 01 Canteiro, 01 US (em J2), 01 UB (em P1), 01 UC	
	. Equipes de trabalho: 02 OAC, 02 Terra, 03 DPS, 01 SB, 01 Base, 01 CBUQ, 06 Dren, 01 SinHoz, 01 Cerca	
	. Sequência de execução: S1 - S2 - S3 - S4	
	. Estratégia de produção: produção empurrada	
. Considera falhas: não		
2	Nome: Sensibilidade falhas	MTBF = 5 - 1.504,0 MTBF = 10 - 1.402,0 MTBF = 15 - 1.372,0 MTBF = 20 - 1.351,0 MTBF = 30 - 1.338,0 MTBF = 50 - 1.322,0 MTBF = 100 - 1.313,0
	Origem parâmetros: Projeto BR-163/PA	
	Principais parâmetros:	
	. Fontes materiais: 03 jazidas solo, 01 Pedreira e 01 Areal (localização de projeto)	
	. Unidades de produção: 01 Canteiro, 01 US (em J2), 01 UB (em P1), 01 UC	
	. Equipes de trabalho: 02 OAC, 02 Terra, 03 DPS, 01 SB, 01 Base, 01 CBUQ, 06 Dren, 01 SinHoz, 01 Cerca	
	. Sequência de execução: S1 - S2 - S3 - S4	
	. Estratégia de produção: produção empurrada	
	. Considera falhas: sim	
3	Nome: Mudança estratégia de produção	3.661,0
	Origem parâmetros: Projeto BR-163/PA	
	Principais parâmetros:	
	. Fontes materiais: 03 jazidas solo, 01 Pedreira e 01 Areal (localização de projeto)	
	. Unidades de produção: 01 Canteiro, 01 US (em J2), 01 UB (em P1), 01 UC	
	. Equipes de trabalho: 02 OAC, 02 Terra, 03 DPS, 01 SB, 01 Base, 01 CBUQ, 06 Dren, 01 SinHoz, 01 Cerca	
	. Sequência de execução: S1 - S2 - S3 - S4	
	. Estratégia de produção: produção puxada	
. Considera falhas: não		
4	Nome: Cenário otimizado	1.206,0

CENÁRIO	DESCRIÇÃO	DURAÇÃO (dias corridos)
	Origem parâmetros: Projeto BR-163/PA e Simulação	
	Principais parâmetros:	
	. Fontes materiais: 03 jazidas solo, 01 Pedreira e 01 Areal (localização de projeto)	
	. Unidades de produção: 01 Canteiro, 01 US (em J2), 02 UB (em P1), 01 UC	
	. Equipes de trabalho: 02 OAC, 02 Terra, 03 DPS, 01 SB, 01 Base, 01 CBUQ, 06 Dren, 01 SinHoz, 01 Cerca	
	. Sequência de execução: S3 - S2 - S4 - S1	
	. Estratégia de produção: produção mista (concreto cimento e CBUQ puxados - restante empurrado limitado a estoque máximo)	
	. Considera falhas: sim	

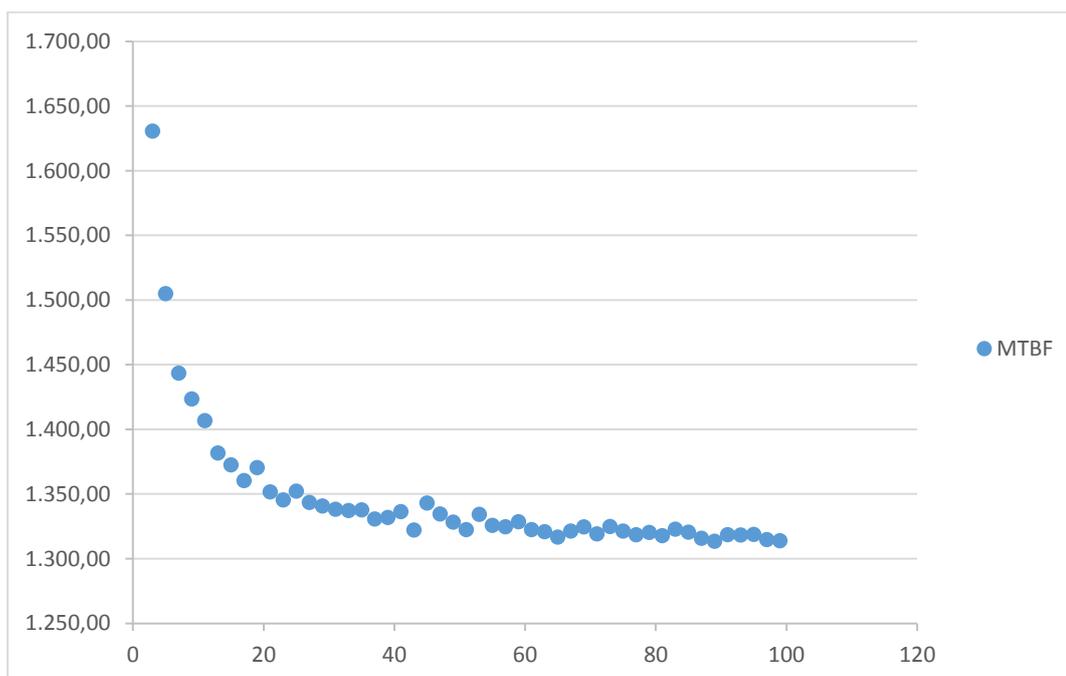


Figura 6-8 – Gráfico MTBF x Duração

7 CONCLUSÕES

7.1 CONCLUSÕES

O desenvolvimento do presente trabalho demonstrou que é possível, sob a visão sistêmica da Logística conjugada com outras ciências do conhecimento tais como a Pesquisa Operacional e a Simulação Multiagentes, desenvolver uma nova metodologia de planejamento logístico integrado para projetos de infraestrutura de transportes que permita obter o sucesso nesses projetos. Lembrando que, no caso de planejamento de projetos de construção civil, sucesso na programação das atividades significa obter um cronograma próximo à realidade do canteiro de trabalho, que apresente uma estimativa de duração com margem de erro aceitável e que seja flexível o suficiente para não ser abandonado pela equipe de execução no primeiro revés.

Considera-se que o tanto os objetivos inicialmente estipulados para o presente trabalho foram integralmente atingidos.

Objetivo geral: elaborar, implementar e testar uma metodologia para o planejamento logístico de projetos de infraestrutura de transportes integrada ao plano de execução da obra, capaz de alcançar uma maior assertividade e segurança na tomada de decisão.

De fato, uma nova metodologia de programação de atividades em obras de infraestrutura foi desenvolvida. Essa metodologia inovou ao trazer para o centro do processo de planejamento do tempo a cadeia logística, desde o suprimento até a distribuição de produtos finais e de componentes aos clientes, passando ela desejada integração os processos produtivos e logísticos.

Por meio do trabalho desenvolvido, foi elaborada, implementada e testada em uma obra real (no caso a implantação do lote 1.4 da BR-163/PA), uma metodologia para o planejamento logístico de projetos de infraestrutura de transportes integrada ao plano de execução da obra, capaz de alcançar uma maior assertividade e segurança na tomada de decisão.

Objetivo Específico 01: modelar a rede logística de forma dinâmica, no tempo e no espaço em função da localização dos canteiros, usinas, fontes de abastecimento e dimensionamento do projeto e integrada à rede logística externa.

A metodologia desenvolvida utilizou a Pesquisa Operacional, através do emprego da Programação Linear Inteira, para a definição do tipo, quantidade, localização e capacidade dos elementos que compõem a cadeia logística.

O exemplo apresentado para a localização e dimensionamento das usinas misturadoras de solos (US) podem ser extrapolados para se definir individualmente tanto as demais unidades de produção (usinas de britagem, de concreto e de asfalto) quanto o canteiro de trabalho e a seleção de fornecedores. A função objetivo escolhida no modelo privilegiou a integração entre logística e produção.

Objetivo Específico 02: elaborar um modelo de simulação para o planejamento de obras.

A escolha da simulação baseada em agentes e do software Anylogic tornou possível desenvolver um modelo de simulação capaz de elaborar um cronograma de uma obra de infraestrutura. Para tanto, foram criados objetos característicos de obras de infraestrutura tais como fornecedores de insumos, unidade de produção e equipes de trabalho. O comportamento e a relação desses objetos entre si e com meio externo a obra foi simulado através de um diagrama de estados e de comunicação.

Objetivo Específico 03: testar o modelo proposto por meio de um estudo de caso.

O modelo de simulação permitiu estimar a duração da obra de implantação do lote 1.4 da BR-163/PA para diferentes cenários propostos. O primeiro cenário simulado procurou replicar as mesmas condições de contorno previstas no projeto de engenharia. Os demais cenários foram propostos para permitir uma análise de sensibilidade do modelo às falhas dos equipamentos, à política de controle de estoques, ao sequenciamento das atividades e à localização das instalações.

A análise aos resultados de cada um dos cenários propostos permite algumas reflexões:

A metodologia tradicional falha ao não identificar os gargalos logísticos:

A comparação entre a duração da obra estimada no projeto de engenharia e o calculado através do modelo demonstrou que os fluxos logísticos são os verdadeiros gargalos do sistema produtivo e que esses gargalos não estão visíveis à metodologia tradicional de planejamento

de obras. Como consequência, a metodologia tradicional apresenta resultados imprecisos, de baixa aderência aos prazos reais dessas obras.

O cálculo da duração da obra deve considerar as falhas mecânicas dos equipamentos de engenharia:

O prazo da obra de infraestrutura é muito sensível às falhas operacionais dos equipamentos de engenharia que compõem as equipes de trabalho. Essas falhas levam a ociosidade das equipes e a necessidade de constante remanejamento.

A análise da sensibilidade do modelo de simulação a variáveis como o tempo médio entre falhas (MTBF) e ao tempo de recuperação dos equipamentos (MTTR) expõem a necessidade de uma cadeia logística de peças de reposição eficiente além do correto dimensionamento das equipes de manutenção. Essas variáveis normalmente não são consideradas no planejamento operacional das obras de construção civil.

Tão importante quanto a constatação do impacto das falhas ao cronograma da obra é a percepção de que existe um limite economicamente viável ao investimento na redução de quebras mecânicas (custo da qualidade). A partir de certo ponto, o aumento do MBTF não mais resulta em atraso do prazo da obra.

A política de estoque mais eficiente deve considerar a produção puxada, porém com estoques máximos (buffers) intermediários:

A política de estoque tradicionalmente utilizada nesse tipo de empreendimento, baseada na produção para estoque (ou empurrada), mesmo mais cômoda e de fácil aplicação não é a mais eficiente. O estudo demonstrou que, da mesma forma, a produção puxada pura também não é eficiente quando se deseja a redução dos prazos.

A alternativa mais eficiente consiste em um processo intermediário, adequada a característica de cada tipo de produto, onde a produção é puxada mas regulada por pequenos estoques de segurança intermediários. Apenas alguns produtos “perceíveis” tais como concreto de cimento fresco ou CBUQ são compatíveis com a produção puramente puxada.

O prazo da obra é sensível ao tipo de sequenciamento adotado:

A divisão do escopo em entregas mais facilmente gerenciáveis, ou seja, em segmentos homogêneos, mostrou-se útil ao planejamento do tempo e permitiu a escolha de um algoritmo

capaz de definir o plano de ataque (sequenciamento) de menor duração total. A aplicação do algoritmo NEH reduziu a ociosidade entre as equipes de trabalho.

A localização das instalações industriais deve ser feita a partir de critérios objetivos:

As ferramentas utilizadas tradicionalmente em logística para a localização de instalações industriais (baseadas em Pesquisa Operacional) podem ser facilmente adaptadas na definição e quantificação dos elementos da cadeia logística das obras de infraestrutura. Na metodologia desenvolvida utilizou-se a Programação Linear Inteira com uma função objetivo que considera o custo de instalação e que se baseia na minimização do custo total de transporte de insumos e de produtos usinados para se selecionar a melhor localização, entre locais pré-selecionados, para as unidades de produção.

7.2 RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

A pesquisa desenvolvida poderá ser aprofundada por novos trabalhos acadêmicos que tenham por objetivo:

- Aprofundar o estudo do equilíbrio dos fluxos de produção através da identificação automática dos gargalos logísticos, a fim de definir o WIP apropriado de forma contínua;
- Automatizar o procedimento de decisão da localização das unidades de produção através do emprego de projetos de experimentos disponíveis nas versões pagas do Anylogic ou ainda através de programação baseada em Java;
- Incluir o custo de armazenagem na função objetivo para decisão de localização de instalações;
- Desenvolver uma animação para o modelo de simulação;
- Melhorar a saída de dados a fim de permitir maior compreensão do modelo e facilitar a tomada de decisão;
- Aproveitar a característica do software Anylogic que permite a simulação multi-método e modelar, por eventos discretos, a produção interna das unidades de produção, incorporando assim novas variáveis ao modelo;
- Da mesma forma, aplicar a simulação dinâmica para modelar tanto a curva de aprendizagem das equipes, quanto os ciclos de pressão por resultados;
- Criar, na barra de ferramentas do Anylogic, uma paleta de objetos específicos para o planejamento de obras de infraestrutura;

- Incorporar ao modelo os conceitos de modelagem da informação da construção (BIM – Building Information Modeling) com o objetivo de estruturar a entrada de dados de forma gráfica no modelo em substituição a planilha de Excel utilizada; e
- Aplicar a metodologia em outras obras rodoviárias e em outros tipos de obras de infraestrutura tais como ferrovias, aeroportos etc.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRAMA, Fatma Abd El-Mohye (2011). Linear projects scheduling using spreadsheets features. Alexandria Engineering Journal, v. 50, n. 2, p. 179-185.

AHUJA, H. N.; DOZZI, S. P.; ABOURIZK, S. M. (1994) *Project Management: Techniques in Planning and Controlling Construction Projects*. John Wiley & Sons.

ALVES, T. C. L.; TOMMELEIN, I. D. (2007) *Cadeias de Suprimentos na Construção Civil: Análise e Simulação Computacional*. Ambiente Construído, v. 7, n. 2, p. 31-44.

AMMAR, M. A.; ELBELTAGI, E. (2001) *Algorithm for determining controlling path considering resource continuity*. Journal of Computing in Civil Engineering, v. 15, n. 4, p. 292-298.

ANDRADE, Eduardo Leopoldino. Introdução à pesquisa operacional: métodos e modelos para a análise de decisão. 4. Ed. Rio de Janeiro: LCT, 2012.

ARDITI, D. (1983) *Diffusion of network planning in construction*. Journal of Construction Engineering and Management, v. 109, n. 1, p. 1-12.

ARDITI, D; ALBULAK, M. Z. (1986) *Line-of-balance scheduling in pavement construction*. Journal of Construction Engineering and Management, v. 112, n. 3, p. 411-424.

ASSAF, S. A.; AL-HEJJI, S. (2006) *Causes of delay in large construction projects*. International journal of project management, v. 24, n. 4, p. 349-357.

AZIZ, R. F.; HAFEZ, S. M.; ABUEL-MAGD, Y. R. (2014) *Smart optimization for mega construction projects using artificial intelligence*. Alexandria Engineering Journal, v. 53, n. 3, p. 591-606.

BALLOU, R.H. (2006) *Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: planejamento, organização e Logística Empresarial*. Bookman, Porto Alegre, RS, 616 p.

BADIRU, A. B. et al.. (1993) *Practitioner's Guide to Quality and Process Improvement*. Chapman & Hall.

BARNES, N. M. L. (1977) *Cost Modeling - An Integrated Approach to Planning and Cost Control*. Engineering and Process Economic, Elsevier Scientific Publication Company, New York, N.Y.

BERTAGLIA, P. R. (2009) *Logística e Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos*. Saraiva, São Paulo, SP, 546 p.

BIRRELL, G. S. (1980) *Construction Planning - Beyond the Critical Path*. Journal of the Construction Division, v. 106, n. 3, p. 389-407.

BNDES (2012) Banco Nacional de Desenvolvimento. *Situação atual e perspectivas da infraestrutura de transportes e da logística no Brasil*. Departamento de Transportes e Logística da Área de Infraestrutura – Biblioteca Digital. Brasília, DF.

- BONABEAU, Eric. *Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems*. Proceedings of the national academy of sciences, v. 99, n. suppl 3, p. 7280-7287, 2002.
- BORSHCHEV, Andrei. *The big book of simulation modeling: multimethod modeling with AnyLogic 6*. Chicago: AnyLogic North America, 2013.
- BOWERSOX, D. J. et al. (1996) *Logistical management*. McGraw-Hill, New York, USA.
- CHASE, Richard B.; AQUILANO, Nicholas J.; JACOBS, F. Robert. *Administração da Produção para a Vantagem Competitiva*. Bookman, 2006.
- CHWIF, Leonardo; MEDINA, Afonso Celso. *Modelagem e simulação de eventos discretos*. Afonso C. Medina, 2006.
- CORREA, H. L. (2012) *Administração de Produção e Operações: Manufatura e Serviços: Uma abordagem estratégica*. 3 ed. Atlas, São Paulo, SP.
- CORRÊA, H. L.; GIANESI, I. G. N. (2014) *Just in Time, MRPII e OPT: Um Enfoque Estratégico* 2 ed. - 19 Reimpr. Atlas, São Paulo, SP.
- CLOUGH, R. H.; SEARS, G. A.; SEARS, S. K. (2000) *Construction project management*. John Wiley & Sons. , 2008. 400 p.
- DE LA TORRE UGARTE, M. C. et al. (2011) *Revisão sistemática: noções gerais*. Revista da Escola de Enfermagem da USP, v. 45, n. 5, p. 1260-1266.
- DNIT - Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria Geral. *Manual de custos rodoviários*. 3. ed. - Rio de Janeiro, 2003. 7 v. em 13.
- EPL. *Plano Nacional de Logística: PNL 2025. Relatório Executivo*. Brasília: EPL, 2018. Disponível em: <<https://www.epl.gov.br/plano-nacional-de-logistica-pnl>>.
- FERNANDES, Flavio Cesar Faria; GODINHO FILHO, Moacir. *Planejamento e controle da produção: dos fundamentos ao essencial*. 2010.
- FORMOSO, C. T. et al. (1996) *Perdas na construção civil: conceitos, classificações e indicadores de controle*. Revista Techne, São Paulo, SP.
- FRIMPONG, Y. et al. (2003) *Causes of Delay and Cost Overruns in Construction of Groundwater Projects in a Developing Countries: Ghana as a Case Study*. International Journal of Project Management, v. 21, n. 5, p. 321-326.
- FROMM, G. (1968) *Transporte e desenvolvimento econômico*. Rio de Janeiro: Victor Publicações LTDA.
- GILBERT, G. P. (1983) *The Project Environment*. International Journal of Project Management, Vol. 1, No. 2, p. 83.

GOMIDE, A. A., et al. Condicionantes institucionais à execução do investimento em infraestrutura: Achados e recomendações. In: GOMIDE, A. A.; PEREIRA A. K. (Orgs.). Governança da política de infraestrutura: condicionantes institucionais ao investimento. Rio de Janeiro: Ipea, 2018. Cap. 16, p. 415-443.

GOUGH-PALMER, D. (1983) *Integration of Time and Cost in the Planning and Monitoring of the Hong Kong Mass Transit Railway Project*. International journal of Project Management, Vol. 1, No. 2, pp. 95-100.

HAY, W.W. (1998) *Ingeniería de Transporte*. Limusa – Noriega Editores, México, 739 p.

HILLSON, D. (2013) *Managing Risk in Complex Projects*. Disponível em david@risk-doctor.com

HOPP, Wallace J.; SPEARMAN, Mark L. *Factory physics*. Waveland Press, 2011.

JAAFARI, A. (1984) *Criticism of CPM for Project Planning Analysis*. Journal of construction engineering and management, v. 110, n. 2, p. 222-233.

JABRI, Ahmad; ZAYED, Tarek. *Agent-based modeling and simulation of earthmoving operations*. Automation in Construction, v. 81, p. 210-223, 2017.

JACOSKI, Claudio Alcides et al.. *Integração e interoperabilidade em projetos de edificações: uma Implementação com IFC/XML*. 2003.

JOHNSTON, D. W.(1981) *Linear Scheduling Method for Highway Construction*. Journal of the Construction Division, ASCE, Vol. 107.

KANNAN, S. R.; SENTHIL, R. (2014) *Production based scheduling method for linear construction in road projects*. KSCE Journal of Civil Engineering, v. 18, n. 5, p. 1292-1301.

KERZNER, Harold (1994). "The growth of modern project management." Project Management Institute.

KERZNER, H. (2003) *Strategic planning for a project office*. Project Management Journal, v. 34, n. 2, p. 13-25.

KLINGEL JR, A. R. B. (1966) *PERT project completion time calculations for a real network*. Management Science, v. 13, n. 4, p. B-194-B-201.

KOSKELA, L. (1992) *Application of the New Production Philosophy to Construction*. Technical Report n° 72, Center for Integrated Facility Engineering. Department of Civil Engineering. Stanford University. USA.

LAUFER, A.; TUCKER, R. L. (1987) *Is Construction Project Planning Really Doing Its Job? A Critical Examination of Focus, Role and Process*. Construction Management and Economics, v. 5, n. 3, p. 243-266.

- LAW, A. M.; KELTON, W. D. (1982) *Confidence intervals for steady-state simulations II: A survey of sequential procedures*. Management Science, v. 28, n. 5, p. 550-562.
- LEE, J., LEE, J.; JEONG, Y.; SHEWARD, H.; SANGUINETTI, P.; ABDELMOHSEN, S.; EASTMAN, C. M. Development of space database for automated building design review systems. Automation in Construction, v. 24, p. 203–212. 2012.
- LIMMER, C. V.(2013) *Planejamento, orçamentação e controle de projetos e obras* [Reimpr.]. LTC, Rio de Janeiro, RJ. 244 p.
- LONDON, K. A.; KENLEY, R. (2001) *An Industrial Organization Economic Supply Chain Approach for the Construction Industry: a Review*. Construction Management & Economics, v. 19, n. 8, p. 777-788.
- LU, Ming; LI, Heng. *Resource-activity critical-path method for construction planning*. Journal of construction engineering and management, v. 129, n. 4, p. 412-420, 2003.
- LUMSDEN, P. (1968) *The line-of-balance method*. Pergamon Press Limited.
- MACAL, C. M.; NORTH, M. J. *Tutorial on agent-based modelling and simulation*. Journal of Simulation, v. 4, n. 3, p. 151–162. 2010.
- MEREDITH, J. R.; MANTEL, S. J. (2003) *Gerenciamento de Projetos: Uma Abordagem Gerencial*. Project Management: A Managerial Approach.
- MUBARAK, S A (2010) *Construction project scheduling and control*. John Wiley & Sons. 456p.
- BOAVENTURA NETTO, P. O. (2006) *Teoria, Modelos e Algoritmos em Grafos*. Ed. Blücher, 4a edição. 313p.
- NEUMANN, C e SCALICE, R. (2015) *Projeto de Fábrica e Layout*. 1ª ed, Elsevier, Rio de Janeiro, RJ, 422 p.
- PEER, S. (1974) *Network Analysis and Construction Planning*. Journal of the Construction Division, ASCE, Vol. 100.
- POPESCU, C. (1979) *Pitfalls of GSA-CMCS Software*. Journal of the Construction Division, ASCE, Vol. 105, pp. 105-106.
- PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE (2017). *Um Guia do Gerenciamento de Projetos (Guia PMBOK)*, 6ª ed. – Pennsylvania , EUA, 459 p.
- RAGSDALE, C. T.(2009) *Modelagem e análise de decisão*. Cengage Learning, São Paulo, SP, 560 p.
- SALINGER, S. (1980) *Construction Planning for Linear Projects*. Journal of the Construction Division, ASCE, Vol. 106, p. 196.

- SAMBASIVAN, M.; SOON, Y. W. (2007) *Causes and Effects of Delays in Malaysian Construction Industry*. International Journal of project management, v. 25, n. 5, p. 517-526
- SCHONBERGER, R. J. (1981) *Why projects are “always” late: a rationale based on manual simulation of a PERT/CPM network*. Interfaces, v. 11, n. 5, p. 66-70.
- SIPPER, D.; BULFIN, R. L. (1997) *Production: planning, control, and integration*. McGraw-Hill Science, Engineering & Mathematics.
- SONI, G.; KODALI, R. (2011) *A Critical Analysis of Supply Chain Management Content in Empirical Research*. Business Process Management Journal, v. 17, n. 2, p. 238-266.
- STERMAN, J. D. (1992) *System Dynamics Modeling for Project Management*. Unpublished manuscript, Cambridge, MA.
- STRADAL, O.; CACHA, J. (1982) *Time space scheduling method*. Journal of the Construction Division, v. 108, n. 3, p. 445-457.
- TRANFIELD, D. et al.. (2003) *Towards a Methodology for Developing Evidence- Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review*. British Journal of Management, v. 14, n. 3, p. 207-222.
- TCU (2017) Tribunal de contas da União. Relatório de políticas e programas de Governo. Brasília: TCU, 2017. Tribunal de Contas da União. Brasília, DF.
- VANEGAS, J. A.; BRAVO, E. B.; HALPIN, D. W. (1993) *Simulation technologies for planning heavy construction processes*. Journal of Construction Engineering and Management, v. 119, n. 2, p. 336-354.
- VAN SLYKE, R. M. (1963) *Letter to the Editor-Monte Carlo Methods and the PERT Problem*. Operations Research, v. 11, n. 5, p. 839-860.
- VIEIRA, H. F. (2006) *Logística aplicada à Construção civil: como melhorar o fluxo de produção nas obras*. Pini, São Paulo, SP, 178 p.
- WIEST, J. D.; LEVY, F. K. (1977) *A management guide to PERT/CPM: with GERTPDMIDCPM and other networks*.
- Wooldridge, Michael J. (2002) *“An introduction to multiagent systems”*, New York, J. Wiley & Sons.
- WORLD ECONOMIC FORUM. The Global Competitiveness Report 2017–2018. Geneva, 2017. Disponível em: <<https://www.weforum.org/reports/the-global-competitiveness-report-2017-2018>>.
- YIN, Robert K. *Estudo de Caso-: Planejamento e métodos*. Bookman editora, 2015.

ANEXO A PROCESSOS DE PLANEJAMENTO DE TEMPO (PMI – 3ed.)

Tabela A-1 – Processos Planejamento Tempo - PMBOK

AUTOR	MACROPROCESSOS	PROCESSOS	ENTRADAS	FERRAMENTAS	SAÍDAS
PMI PMBOK - 5ª ed.	Gerenciamento de Tempo - Grupo de processos de planejamento	Definir atividades	Plano de gerenciamento do cronograma	Decomposição	Lista de atividades
			Linha de base do escopo	Planejamento em ondas sucessivas	Atributos das atividades
			Estrutura analítica do projeto	Opinião especializada	Lista de marcos
			Fatores ambientais da empresa		
			Ativos de processos organizacionais		
		Sequenciar atividades	Plano de gerenciamento do cronograma	Método do diagrama de precedência (MDP)	Diagramas de rede do cronograma do projeto
			Lista de atividades	Determinação de dependência	Atualizações nos documentos do projeto
			Atributos das atividades	Antecipações e esperas	
			Lista dos marcos		
			Especificação do escopo do projeto		
			Fatores ambientais da empresa		
			Ativos de processos organizacionais		
		Estimar recursos das atividades	Plano de gerenciamento do cronograma	Opinião especializada	Requisitos de recursos das atividades
			Lista de atividades	Análise de alternativas	Estrutura analítica dos recursos
			Atributos das atividades	Dados publicados sobre estimativas	Atualizações nos documentos do projeto
			Calendários dos recursos	Estimativa "bottom-up"	
			Registro dos riscos	Software de gerenciamento de projetos	
			Estimativas de custos das atividades		
			Fatores ambientais da empresa		
			Ativos de processos organizacionais		
		Estimar duração das atividades	Plano de gerenciamento do cronograma	Opinião especializada	Estimativas de duração das atividades
Lista de atividades	Estimativa análoga		Atualizações nos documentos do projeto		
Atributos das atividades	Estimativa paramétrica				

AUTOR	MACROPROCESSOS	PROCESSOS	ENTRADAS	FERRAMENTAS	SAÍDAS
			Calendários dos recursos	Estimativa de três pontos	
			Especificação do escopo do projeto	Técnicas de tomada de decisões em grupo	
			Registro dos riscos	Análise de reservas	
			Estrutura analítica dos recursos		
			Fatores ambientais da empresa		
			Ativos de processos organizacionais		
		Desenvolver o cronograma	Plano de gerenciamento do cronograma	Análise de rede do cronograma	Linha de base do cronograma
			Lista de atividades	Método do caminho crítico	Cronograma do projeto
			Atributos das atividades	Método da corrente crítica	Dados do cronograma
			Diagramas de rede do cronograma do projeto	Técnicas de otimização de recursos	Calendários do projeto
			Requisitos de recursos das atividades	Técnicas de desenvolvimento de modelos	Atualizações no plano de gerenciamento do projeto
			Calendários dos recursos	Antecipações e esperas	Atualizações nos documentos do projeto
			Estimativas das durações das atividades	Compressão de cronograma	
			Especificação do escopo do projeto	Paralelismo ou "fast-tracking"	
			Registro dos riscos		
			Designações do pessoal do projeto		
			Estrutura analítica dos recursos		
			Fatores ambientais da empresa		
			Ativos de processos organizacionais		

ANEXO B PROCESSOS DE PLANEJAMENTO DE TEMPO (CARL V. LIMMER)

Tabela B-1 – Processos Planejamento Tempo - LIMMER

AUTOR	MACROPROCESSOS	PROCESSOS	ENTRADAS	FERRAMENTAS	SAÍDAS
Carl V. Limmer	Conhecimento do Projeto pela Análise de Informações	Analisar informações	Projeto de engenharia preliminar (anteprojeto)	Decomposição	Lista de atividades e seus atributos
			Planilha do contratante	Análise de projeto	Lista de precedências
			Fatores ambientais da empresa	Opinião especializada	Lista de atividades que podem ser executadas em paralelo
			Ativos de processos organizacionais	Reuniões	Estrutura Analítica de Partição - EAP
			Registro dos riscos		Estrutura Analítica de Insumos - EAI
					Estrutura Analítica Operacional - EAO
	Engenharização - Planejamento do Tempo	Calcular a duração das atividades	Plano de contas	Opinião especializada	Lista de duração das atividades
			Lista de atividades e seus atributos	Quadro de cálculo do efetivo de mão-de-obra - QCUMO	QCUMO
			Produtividade da mão de obra		
		Elaborar a rede de planejamento	Lista de atividades e seus atributos	Teoria dos grafos	Rede PERT/CPM
			Lista de precedências	AES	Caminho (s) crítico (s)
			EAP	AEN	Folgas das atividades
			Lista de duração das atividades	Rede Roy	
		Lista de atividades que podem ser executadas em paralelo	PERT/CPM		
		Elaborar o cronograma	Lista de atividades e seus atributos	Análise de rede do cronograma	Duração total do projeto
			Rede PERT/CPM	PERT/CPM	Cronograma de barras (gráfico de Gantt)
			Caminho (s) crítico (s)	Linha de Balanço - LOB	Cronograma de MO
			Calendário	Opinião especializada	Cronograma de equipamentos
		Alocar e nivelar recursos	Lista de duração das atividades	Agregação	Cronograma de materiais
			Calendário de disponibilidade dos recursos	Curva de distribuição de recursos	Distribuição otimizada de recursos
Rede PERT/CPM	Teste de alternativas		Atualização do cronograma de barras		
Folga das atividades			Atualização do diagrama de redes		
Cronograma de barras (gráfico de Gantt)			Atualização dos cronogramas de recursos		
Cronograma de MO			Cronograma de compra de materiais		
Cronograma de equipamentos					
Cronograma de materiais					
QCUMO					
Defasagem de fornecimento dos materiais					

ANEXO C PROCESSOS DE PLANEJAMENTO DE TEMPO (CLOUGH, S. SEARS E G. SEARS)

Tabela C-1 – Processos Planejamento Tempo – CLOUGH & SEARS

AUTOR	MACROPROCESSOS	PROCESSOS	ENTRADAS	FERRAMENTAS	SAÍDAS	
Richard Clough, S. Sears e Gleen Sears	Planejamento	Decompor o projeto	Projeto de engenharia preliminar (anteprojeto)	Conhecimento de métodos construtivos	EAP	
			Informações do local da obra	Reuniões	Informações gerenciais	
				Análise de trabalho	Decomposição início-fim	
				Decomposição	Lista de marcos do projeto	
		Identificar as atividades	EAP	Conhecimento especializado	Lista de atividades e atributos	
			Decomposição início-fim	Decomposição		
			Definição finalidade do estudo	Tentativa e erro		
		Sequenciar as atividades	Lista de atividades e atributos	Conhecimento especializado	Diagramas de rede PERT/COM	
			Lista de precedências	Teoria dos grafos		
			Atributos das atividades	Atrasos em atividades		
		Programação (scheduling)	Estimar a duração das atividades	Lista de atividades e seus atributos	Conhecimento especializado	Lista de duração das atividades
				Diagramas de rede	Tratamento estatístico de dados	
	Calcular a duração total do projeto		Lista de atividades e seus atributos	PERT/CPM	Duração total do projeto	
			Diagramas de rede	Datas mais cedo possível e mais tarde possível	Tempo disponível das atividades	
			Calendário de trabalho		Folgas das atividades	
					Caminho (s) crítico (s)	
	Acelerar a duração do projeto		Duração total do projeto	Aceleração ou "expediting"	Cláusulas contratuais (bônus e multas)	
			Caminho (s) crítico (s)	Compressão ou "project compression"	Cronograma ajustado	
			Lista de marcos do projeto	Trade-off tempo-custo	Rede PERT/CPM ajustada	
			Rede PERT/CPM	Reanálise da duração das atividades	Cronograma de recursos (MO, equipamentos, materiais)	
			Lista de atividades que podem ser executadas em paralelo	Terceirização de atividades	Cronograma físico-financeiro	
			Disponibilidade dos recursos			
			Dados estatísticos de condições climáticas			
	Disponibilidade financeira					
	Nivelar os recursos		Disponibilidade dos recursos	Nivelamento de recursos (picos e vales)	Rede PERT/CPM ajustada	
		Caminho (s) crítico (s)	Terceirização de atividades	Cronograma de recursos (MO, equipamentos, materiais)		
		Rede PERT/CPM	Alteração turno de trabalho	Cronograma físico-financeiro		
Lista de atividades e seus atributos		Locação de equipamentos				
Cronograma de recursos (MO, equipamentos, materiais)		Análise de métodos construtivos				
	Estudo da cadeia logística					

ANEXO D PROCESSOS DE PLANEJAMENTO DE TEMPO (SALEH MUBARAK)

Tabela D-1 – Processos Planejamento Tempo - MUBARAK

AUTOR	MACROPROCESSOS	PROCESSOS	ENTRADAS	FERRAMENTAS	SAÍDAS
Saleh Mubarak	Método do Caminho Crítico - CPM	Determinar as atividades	EAP	Conhecimento especializado	Lista de atividades e seus atributos
			Projeto de engenharia	Decomposição	
		Determinar a duração das atividades	Lista de atividades e seus atributos	Conhecimento especializado	Lista de duração das atividades
			Projeto de engenharia		
			Histórico de produtividades		
			Histórico de chuvas		
		Determinar relações lógicas entre atividades	Projeto de engenharia	Conhecimento especializado	Lista de precedências
			EAP	Reuniões com chefes de equipes	
			Lista de relações lógicas entre as atividades		
		Desenhar a rede lógica	Lista de precedências	Conhecimento especializado	Duração total do projeto
			Projeto de engenharia	Reuniões com chefes de equipes	Caminho (s) crítico (s)
			EAP	Rede PERT/CPM	Folgas das atividades
		Revisar e analisar o cronograma			Diagrama de rede
			Duração total do projeto	Análise	Diagrama de rede corrigido
			Caminho (s) crítico (s)	Conhecimento especializado	Gráfico de Gantt
			Folgas das atividades		Cronograma de recursos (MO, equipamentos, materiais)
Implementar o calendário	Diagrama de rede	Conhecimento especializado	Informações gerenciais		
	Gráfico de Gantt	Reuniões com chefes de equipes			
Alocar recursos	Diagrama de rede	Alocação de recursos	Diagrama de rede atualizado		
	Gráfico de Gantt	Nivelamento de recursos (picos e vales)	Gráfico de Gantt atualizado		
	Cronograma de recursos (MO, equipamentos, materiais)		Cronograma de recursos (MO, equipamentos, materiais)		

ANEXO E PLANILHAS DE ENTRADA DE DADOS

Tabela E-1 – Aba Trechos

SEG. HOMOG.	KM INICIAL	KM FINAL	EXT.	TERRAP. CORTE/ATERRO	SUBBASE	BASE	ASFALTO - BINDER	ASFALTO - CAPA	OAC	DRENO PROF.	VALETA	MFC E SARJETA	CERCA	SINAL. HORIZ.
S1	460,220	468,240	8,020	40.000,00	22.300,00	21.300,00	15.240,00	8.350,00	790,90	7.125,00	3.680,00	12.640,00	7.190,00	8,02
S2	475,880	487,720	11,840	86.000,00	32.431,00	31.030,00	22.380,00	12.235,00	174,00	13.020,00	4.100,00	29.330,00	6.560,00	11,84
S3	489,920	491,020	1,100	5.060,00	3.013,00	2.883,00	2.080,00	1.137,00	-	560,00	1.120,00	1.680,00	700,00	1,10
S4	495,240	524,060	28,820	142.000,00	78.491,00	75.531,00	54.476,00	29.782,00	482,55	19.905,00	3.260,00	31.875,00	9.470,00	28,82
UNIDADE			km	m3	m3	m3	t	t	m	m	m	m	m	km

Tabela E-2 – Aba Usinas

IDT		NÚMERO CAMINHÕES						LOCALIZAÇÃO		Parametros de produção		CAPACIDADE DE PRODUÇÃO (HORÁRIA)														
TIPO	NR	CBP	CBG	CCP	CCG	CX	DA	KM	AFAST. EIXO	Tempo de setup (h)	Estoque mínimo (dias)	BGS - SUBBASE (m3)	BGS - BASE (m3)	CBUQ - CAPA (t)	CBUQ - BINDER (t)	TUBO CONCRETO (und)	TUBO POROSO (und)	CONCRETO USINADO (m3)	MOURÃO CONCRETO (und)	FORMA MADEIRA (m2)	ARMADURA (kg)	B0 (m3)	B1 (m3)	B2 (m3)	BRITABICA CORRIDA (m3)	
USINA CONCRETO	1	7	0	2	1	3	0	474,0	0,3	0,5	1,0					2	10	30	8							
USINA BRITAGEM	1	5	1	0	0	0	0	474,0	0,3	0,5	1,0											80	80	80	80	
USINA ASFALTO	1	16	0	0	0	0	2	474,0	0,3	0,5	1,0			80	80											
USINA SOLO	1	12	50	0	0	0	0	485,1	2,8	0,5	1,0	30	30													
USINA SOLO	2	12	50	0	0	0	0	495,2	0,5	0,5	1,0	30	30													

Tabela E-3 – Aba Jazidas

		LOCALIZAÇÃO		PARAMETROS DE PRODUÇÃO	CAPACIDADE PRODUÇÃO (DIÁRIA)		
TIPO	NÚMERO	KM	AFASTAMENTO DO EIXO	TEMPO DE SETUP (h)	SOLO CBR BAIXO (m3)	SOLO CBR ALTO (m3)	AREIA (m3)
JAZIDA AREIA	1	491,3	6,5	0,5	0,0	0,0	392,0
JAZIDA SOLO CBR ALTO	1	457,1	2,1	0,5	0,0	400,0	0,0
JAZIDA SOLO CBR ALTO	2	485,1	2,8	0,5	0,0	400,0	0,0
JAZIDA SOLO CBR ALTO	3	489,4	2,8	0,5	0,0	400,0	0,0
JAZIDA SOLO CBR BAIXO	1	490,0	1,6	0,5	400,0	0,0	0,0

Tabela E-4 – Aba Canteiro

IDENTIFICAÇÃO		NÚMERO CAMINHÕES						LOCALIZAÇÃO		CAPACIDADE PRODUÇÃO (HORÁRIA)		
TIPO	NÚMERO	CBP	CBG	CCP	CCG	CX	DA	KM	AFASTAMENTO DO EIXO	Pedidos Simultâneos	FORMA MADEIRA (m2)	ARMAÇÃO (kg)
CANTEIRO OBRAS	1	0	0	3	2	0	0	474,0	0,3	5,0	2	12,5

Tabela E-5 – Aba Serviços

EQUIPES DE TRABALHO			PRODUTIVIDADE		
TIPO	ESTOQUE MÍNIMO (DIAS) PARA MOBILIZAÇÃO	UNIDADE	PRODUTIVIDADE HORÁRIA	GRAU DE ADESTRAMENTO	PRODUTIVIDADE DIA
TERRAPLENAGEM - CORTE/ATERRO	6	m3	203,0	0,7	1.136,80
SUBBASE	6	m3	168,0	0,7	940,80
BASE	6	m3	168,0	0,7	940,80
ASFALTO - BINDER	12	t	75,0	0,7	420,00
ASFALTO - CAPA	12	t	75,0	0,7	420,00
OAC	6	m	1,0	1,0	8,00
DRENO PROFUNDO	6	m	21,4	0,7	120,00
VALETA	3	m	15,0	1,0	120,00
MFC E SARJETA	3	m	30,0	1,0	240,00

EQUIPES DE TRABALHO			PRODUTIVIDADE		
TIPO	ESTOQUE MÍNIMO (DIAS) PARA MOBILIZAÇÃO	UNIDADE	PRODUTIVIDADE HORÁRIA	GRAU DE ADESTRAMENTO	PRODUTIVIDADE DIA
CERCA	3	m	50,0	1,0	400,00
SINALIZAÇÃO HORIZONTAL	10	km	0,1250	1,0	1,00

Tabela E-6 – Aba Traço Serviços

SERVIÇOS	UND	PRODUTO USINADO									INSUMO					
		BGS - SB (m3)	BGS - BASE (m3)	CBUQ - BINDER (t)	CBUQ - CAPA (t)	CONCR. USINAD O (m3)	FORMA MADEIRA (m2)	TUBO CONCRETO (und)	TUBO POROSO (und)	MOURÃO CONCR. (und)	B1 (m3)	ARAME FARP. (m)	CM-30 (t)	RR-2C (t)	TINTA TERMOPL ÁSTICA (l)	TACHA REFLE TIVA (und)
OAC	m					1,1	2,3	1,0								
TERRAPL. - CORTE/ATERRO	m³	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SUBBASE	m³	1,0														
BASE	m³		1,0													
ASFALTO - BINDER	t			1,0									0,01464			
ASFALTO - CAPA	t				1,0									0,00488		
DRENO PROFUNDO	m								1,0		0,62					
VALETA	m					0,12	0,09									
MFC E SARJETA	m					0,1171	0,076				0,085					
CERCA	m									0,84		8,0				
SINALIZAÇÃO HORIZONTAL	km														360	221

Tabela E-7 – Aba Traço Produto Usinado

PRODUTO USINADO	UN D	INSUMO														PRODUTO USINADO	
		SOLO CBR BAIXO (m3)	SOLO CBR ALTO (m3)	AREIA (m3)	BRITA BICA CORRIDA (m3)	CAP - 50/70 (t)	BRITA 0 (m3)	BRITA 1 (m3)	BRITA 2 (m3)	CIMENTO SACO (kg)	CIMENTO GRANEL (kg)	TÁBUA (m2)	AÇO CONSTR. (kg)	DINAMITE 60% (kg)	CORDEL DETONANTE (m)	ARMAÇÃO (kg)	CONCRETO USINADO (m3)
ATERRO	M3	1,1															
BGS - SUBBASE (m3)	M3		0,6105	0,21	0,2775												
BGS - BASE (m3)	M3		0,111	0,21	0,777												
CBUQ - CAPA (t)	T			0,0533		0,055	0,2252	0,2252	0,1126	28,0							
CBUQ - BINDER (t)	T			0,161		0,05	0,0946	0,1892	0,1892								
TUBO CONCRETO (und)	UND															31,0	0,4222
TUBO POROSO (und)	UND																0,0302
CONCRETO USINADO (m3)	M3			0,87				0,415	0,415			350,0					
MOURÃO CONCRETO (und)	UND															1,99	0,0495
FORMA MADEIRA (m2)	M2											0,579					
ARMAÇÃO (kg)	KG												1,1				
BRITA 0 (m3)	M3													0,2394	0,456		
BRITA 1 (m3)	M3													0,2394	0,456		
BRITA 2 (m3)	M3													0,2394	0,456		
BRITA BICA CORRIDA (m3)	M3													0,2394	0,456		

Tabela E-8 – Aba Caminhão x Carga

TIPO	CAPACIDADE (m3 ou t)	BGS - SB (m3)	BGS - BASTE (m3)	CBUQ - BINDE R (t)	CBUQ - CAPA (t)	CONCRUSINADO (m3)	ARMAÇÃO (kg)	FORMA MADEIRA (m2)	TUBO CONCR (und)	TUBO POROSO (und)	MOURÃO CONCRETO (und)	B0 (m3)	B1 (m3)	B2 (m3)	BRITA BICACORRIDA (m3)	ARAME FARPADO (m)	CM - 30 (t)	RR - 2 C (t)	TINTA (l)	TACHA REFLETIVA (und)	CORDEL DETONANTE (m)	DINAMITE 60% (kg)	AREIA (m3)	SOLOCBR ALTO (m3)	SOLO (m3)	CIMENTO SACO (kg)
CBP	10,0	10,0	10,0	18,0	18,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	10,0	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0	10,0	10,0	10,0	0,0
CBG	30,0	30,0	30,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	30,0	30,0	30,0	30,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0	30,0	30,0	30,0	0,0
CCP	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6000,0	400,0	5,0	82,0	48,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3000,0	0,0	0,0	6000,0	60000,0	60.000,0	6.000,0	0,0	0,0	0,0	6000,0
CCG	9,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9000,0	600,0	8,0	124,0	72,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4500,0	0,0	0,0	9000,0	90000,0	90.000,0	9.000,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CX	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DA	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,0	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela E-9 – Aba Equipamento Reserva

TIPO DE EQUIPAMENTO / VEÍCULO	Número	TEMPO DE MANUTENÇÃO DE FALHA - MTTR (DIAS)
ESCAVADEIRA HIDRÁULICA	3	1,5
ROLO PÉ DE CARNEIRO	3	1,5
MOTONIVELADORA	3	1,5
ROLO LISO	3	1,5
ROLO PNEUS	3	1,5
PAVIMENTADORA	3	1,5
CAMINHÃO CARROCERIA	3	1,5
RETROESCAVADEIRA	3	1,5
CAMINHÃO SINALIZADOR	3	1,5
USINA CONCRETO	3	1,5
CARREGADEIRA	3	1,5
USINA ASFALTO	3	1,5

TIPO DE EQUIPAMENTO / VEÍCULO	Número	TEMPO DE MANUTENÇÃO DE FALHA - MTTR (DIAS)
BRITADOR	3	1,5
USINA SOLO	3	1,5

Tabela E-10 – Aba Falha e Manutenção

AGENTE	TIPO DE EQUIPAMENTO / VEÍCULO	MTBF (DIAS)	INTERVALO DE MNT PROGRAMADA (DIAS)	TEMPO DIAGNÓSTICO (DIAS)	TEMPO DE MANUTENÇÃO DE FALHA - MTTR (DIAS)	TEMPO MANUTENÇÃO PROGRAMADA (DIAS)	PROBABILIDADE DA PEÇA EM ESTOQUE	TEMPO CHEGADA DA PEÇA (DIAS)	TEMPO DE SUBSTITUIÇÃO EQUIPAMENTO (DIAS)
EQUIPE TERRAPLENAGEM	ESCAVADEIRA HIDRÁULICA	10	125	1	2	1	1	6	1
EQUIPE SUBBASE	ROLO PÉ DE CARNEIRO	1	125	1	2	1	1	6	1
EQUIPE SUBBASE	MOTONIVELADORA	1	125	1	2	1	1	6	1
EQUIPE BASE	ROLO PÉ DE CARNEIRO	1	125	1	2	1	1	6	1
EQUIPE BASE	MOTONIVELADORA	1	125	1	2	1	1	6	1
EQUIPE ASFALTO	ROLO LISO	1	125	1	2	1	1	6	1
EQUIPE ASFALTO	ROLO PNEUS	1	125	1	2	1	1	6	1
EQUIPE ASFALTO	PAVIMENTADORA	1	125	1	2	1	1	6	1
EQUIPE OAC	CAMINHÃO CARROCERIA	1	125	1	2	1	1	6	1
EQUIPE OAC	RETROESCAVADEIRA	1	125	1	2	1	1	6	1
EQUIPE DRENAGEM PROFUNDA	RETROESCAVADEIRA	1	125	1	2	1	1	6	1
EQUIPE VALETA	RETROESCAVADEIRA	1	125	1	2	1	1	6	1
EQUIPE MFC E SARJETA	RETROESCAVADEIRA	1	125	1	2	1	1	6	1
EQUIPE SINALIZAÇÃO HORIZONTAL	CAMINHÃO SINALIZADOR	1	125	1	2	1	1	6	1
JAZIDA AREIA	ESCAVADEIRA HIDRÁULICA	1	125	1	2	1	1	6	1
JAZIDA SOLO CBR ALTO	ESCAVADEIRA HIDRÁULICA	1	125	1	2	1	1	6	1
JAZIDA SOLO CBR BAIXO	ESCAVADEIRA HIDRÁULICA	1	125	1	2	1	1	6	1

AGENTE	TIPO DE EQUIPAMENTO / VEÍCULO	MTBF (DIAS)	INTERVALO DE MNT PROGRAMADA (DIAS)	TEMPO DIAGNÓSTICO (DIAS)	TEMPO DE MANUTENÇÃO DE FALHA - MTRR (DIAS)	TEMPO MANUTENÇÃO PROGRAMADA (DIAS)	PROBABILIDADE DA PEÇA EM ESTOQUE	TEMPO CHEGADA DA PEÇA (DIAS)	TEMPO DE SUBSTITUIÇÃO EQUIPAMENTO (DIAS)
USINA CONCRETO	USINA CONCRETO	1	125	1	2	1	1	6	1
USINA CONCRETO	CARREGADEIRA	1	125	1	2	1	1	6	1
USINA ASFALTO	USINA ASFALTO	1	125	1	2	1	1	6	1
USINA ASFALTO	CARREGADEIRA	1	125	1	2	1	1	6	1
USINA BRITAGEM	BRITADOR	1	125	1	2	1	1	6	1
USINA BRITAGEM	CARREGADEIRA	1	125	1	2	1	1	6	1
USINA SOLO	USINA SOLO	1	125	1	2	1	1	6	1
USINA SOLO	CARREGADEIRA	1	125	1	2	1	1	6	1

Tabela E-11 – Aba Precedência

EQUIPE	SUBBASE	BASE	ASFALTO - BINDER	ASFALTO - CAPA	OAC	DRENO PROFUNDO	VALETA	MFC E SARJETA	CERCA	SINALIZAÇÃO HORIZONTAL	TERRAPLENAGEM - CORTE/ATERRO
SUBBASE					1	1					1
BASE	1				1	1					1
ASFALTO - BINDER	1	1			1	1					1
ASFALTO - CAPA	1	1	1		1	1					1
OAC											
DRENO PROFUNDO					1						1
VALETA					1						1
MFC E SARJETA	1	1	1	1	1	1					1
CERCA											
SINALIZAÇÃO HORIZONTAL	1	1	1	1	1	1		1			1
TERRAPLENAGEM - CORTE/ATERRO					1						

Tabela E-12– Controle de Estoque

AGENTE SOLICITANTE	INSUMO / PRODUTO USINADO	UNIDADE	Estoque Inicial	TIPO DE CONTROLE	QUANT. PEDIDO (Q*)	PONTO DE PEDIDO (ROP)	INTERVALO ENTRE PEDIDOS (T*) DIAS	NÍVEL MÁXIMO DO ITEM (M*)	CAPACIDADE
CANTEIRO OBRAS	CIMENTO SACO (kg)	sc	0,00	3	1.080,00		4,00	3.120,00	3.120,00
CANTEIRO OBRAS	DINAMITE 60% (kg)	kg	0,00	3			9,00	9.000,00	9.000,00
CANTEIRO OBRAS	CORDEL DETONANTE (m)	m	0,00	3			9,00	20.000,00	20.000,00
CANTEIRO OBRAS	TÁBUA (m2)	m	0,00	3	426,00		38,00	600,00	600,00
CANTEIRO OBRAS	AÇO CONSTRUÇÃO (kg)	kg	0,00	3			7,00	12.000,00	12.000,00
CANTEIRO OBRAS	ARAME FARPADO (m)	m	0,00	3			7,00	45.000,00	45.000,00
CANTEIRO OBRAS	TINTA TERMOPLÁSTICA (l)	l	0,00	3			7,00	6.000,00	6.000,00
CANTEIRO OBRAS	TACHA REFLETIVA (und)	und	0,00	3			7,00	5.000,00	25.000,00
CANTEIRO OBRAS	FORMA MADEIRA (m2)	m2	0,00	3	293,00		7,00	600,00	1.200,00
USINA CONCRETO	CIMENTO GRANEL (kg)	kg	0,00	2	90.000,00	84.000,00			100.000,00
USINA CONCRETO	AREIA (m3)	m3	0,00	2	1.000,00	210,00			10.000,00
USINA CONCRETO	BRITA 1 (m3)	m3	0,00	2	320,00	100,00			10.000,00
USINA CONCRETO	BRITA 2 (m3)	m3	0,00	2	320,00	100,00			10.000,00
USINA CONCRETO	TUBO POROSO (und)	und	0,00	3	111,00		1,00	984,00	4.920,00
USINA ASFALTO	AREIA (m3)	m3	0,00	2	1.380,00	560,00			10.000,00
USINA ASFALTO	BRITA 0 (m3)	m3	0,00	2	790,00	840,00			10.000,00
USINA ASFALTO	BRITA 1 (m3)	m3	0,00	2	900,00	1.090,00			10.000,00
USINA ASFALTO	BRITA 2 (m3)	m3	0,00	2	760,00	800,00			10.000,00
USINA ASFALTO	CIMENTO SACO (kg)	und	0,00	3	1.080,00		4,00	3.120,00	3.120,00
USINA ASFALTO	CM-30 (t)	t	0,00	3	20,00		3,00	80,00	80,00
USINA ASFALTO	RR-2C (t)	t	0,00	3	16,00		6,00	40,00	40,00
USINA ASFALTO	CAP-50/70 (t)	t	0,00	3	26,00		3,00	80,00	80,00

AGENTE SOLICITANTE	INSUMO / PRODUTO USINADO	UNIDADE	Estoque Inicial	TIPO DE CONTROLE	QUANT. PEDIDO (Q*)	PONTO DE PEDIDO (ROP)	INTERVALO ENTRE PEDIDOS (T*) DIAS	NÍVEL MÁXIMO DO ITEM (M*)	CAPACIDADE
USINA SOLO	SOLO CBR ALTO (m3)	m3	0,00	2	8.700,00	4.260,00			20.000,00
USINA SOLO	AREIA (m3)	m3	0,00	2	2.890,00	2.480,00			10.000,00
USINA SOLO	BRITA BICA CORRIDA (m3)	m3	0,00	2	2.140,00	6.230,00			10.000,00
USINA BRITAGEM	DINAMITE 60% (kg)	kg	0,00	3			9,00	9.000,00	45.000,00
USINA BRITAGEM	CORDEL DETONANTE (m)	m	0,00	3			9,00	18.000,00	90.000,00
EQUIPE SUBBASE	BGS - SUBBASE (m3)	m3	0,00	1	1.460,00		1,00		1.460,00
EQUIPE BASE	BGS - BASE (m3)	m3	0,00	1	1.460,00		1,00		1.460,00
EQUIPE ASFALTO - BINDER	CBUQ - BINDER (t)	t	0,00	1	630,00		1,00		630,00
EQUIPE ASFALTO - BINDER	CM-30 (t)	t	0,00	3	20,00		3,00	80,00	80,00
EQUIPE ASFALTO - CAPA	CBUQ - CAPA (t)	t	0,00	1	640,80		1,00		640,80
EQUIPE ASFALTO - CAPA	RR-2C (t)	t	0,00	3	12,00		5,00	40,00	40,00
EQUIPE OAC	FORMA MADEIRA (m2)	m2	0,00	3	183,00		10,00	295,00	1.475,00
EQUIPE OAC	TUBO CONCRETO (und)	und	0,00	3	61,00		8,00	110,00	550,00
EQUIPE DRENAGEM PROFUNDA	TUBO POROSO (und)	und	0,00	3	877,00		6,00	1.957,00	9.785,00
EQUIPE DRENAGEM PROFUNDA	BRITA 1 (m3)	m3	0,00	3	586,00		6,00	1.213,00	6.065,00
EQUIPE VALETA	CONCRETO USINADO (m3)	m3	0,00	1	16,73		1,00		16,73
EQUIPE VALETA	FORMA MADEIRA (m2)	m2	0,00	3	140,00		13,00	200,00	1.000,00
EQUIPE MFC E SARJETA	CONCRETO USINADO (m3)	m3	0,00	1	32,66		1,00		32,66
EQUIPE MFC E SARJETA	FORMA MADEIRA (m2)	m2	0,00	3	182,00		10,00	280,00	1.400,00
EQUIPE MFC E SARJETA	BRITA 1 (m3)	m3	0,00	3	257,00		13,00	393,00	1.965,00

AGENTE SOLICITANTE	INSUMO / PRODUTO USINADO	UNIDADE	Estoque Inicial	TIPO DE CONTROLE	QUANT. PEDIDO (Q*)	PONTO DE PEDIDO (ROP)	INTERVALO ENTRE PEDIDOS (T*) DIAS	NÍVEL MÁXIMO DO ITEM (M*)	CAPACIDADE
EQUIPE CERCA	ARAME FARPADO (m)	m	0,00	3	25.629,00		9,00	47.313,00	236.565,00
EQUIPE CERCA	MOURÃO CONCRETO (und)	und	0,00	3	854,00		3,00	2.678,00	5.356,00
EQUIPE SINALIZAÇÃO HORIZONTAL	TINTA TERMOPLÁSTICA (l)	l	0,00	3	1.970,00		6,00	4.109,00	12.327,00
EQUIPE SINALIZAÇÃO HORIZONTAL	TACHA REFLETIVA (und)	und	0,00	3	2.096,00		10,00	3.508,00	10.524,00

Legenda:

- 0 – Sem controle
- 1 – Controle Básico
- 2 – Controle Avançado (método do ponto de pedido com demanda incerta)
- 3 – Controle Avançado (método de revisão periódica com demanda incerta)
- 4 – Até a capacidade