
**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**



COMPRESSÃO TEMPO-CUSTO PARAMÉTRICA ÓTIMA DE PROJETOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

Jayme Bentes

Belém – PA
2012

**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**



Jayme Bentes

COMPRESSÃO TEMPO-CUSTO PARAMÉTRICA ÓTIMA DE PROJETOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Jorge de Araújo de Ichihara

Dados Internacionais de Catalogação - na - Publicação (CIP) –

Biblioteca Central/UFPA, Belém-PA

Bentes, Jayme

Compressão Ótima Tempo-Custo Paramétrica de Projetos de Construção Civil/ Jayme Bentes; orientador, Jorge de Araújo Ichihara. – 2012.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2012.

1.Construção Civil. 2.Projeto. 3. Programação Linear. 4. Otimização Tempo-Custo. I. Ichihara Jorge de Araújo. II. Título.

CDD: . ed.



Jayme Bentes

**COMPRESSÃO TEMPO-CUSTO PARAMÉTRICA ÓTIMA DE
PROJETOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

APROVADA EM: / /

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Jorge de Araújo Ichihara
Orientador

Prof. Dr. ANDRÉ AUGUSTO AZEVEDO MONTENEGRO DUARTE
Membro

Prof. Dr. ANDRÉ CRISTIANO SILVA MELO
Membro

Visto:

Prof. CLÁUDIO JOSÉ CAVALCANTE BLANCO, Ph.D
Coordenador do PPGEC/ITEC/UFPA



À memória de meus avós paternos
e maternos.

Aos meus pais, Ramiro e Janete,
dedico este trabalho.



AGRADECIMENTOS

A D'us, por guiar meu caminho em cada momento da minha vida.

Aos meus pais, Ramiro e Janete, por estarem sempre ao meu lado e compartilharem esses momentos tão importante da minha vida.

Ao meus irmãos, Sabrina, Michele e Elias, pelo apoio e ajuda nesta dissertação.

À minha namorada, Amanda, pela ajuda, apoio e paciência para a concretização deste Trabalho.

Ao amigo e orientador professor Dr. Jorge de Araújo Ichihara, pelo incentivo e apoio dado a este Mestrado.

Aos colegas e amigos da PPGEC que me auxiliaram na realização deste estudo.

À empresa construtora, pela disponibilidade dos dados que foram utilizados nesta Dissertação.



RESUMO

Bentes, Jayme. Compressão Tempo-Custo Paramétrica Ótima de Projetos de Construção Civil. Belém, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará (UFPA), 2012. 139p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil).

Um dos problemas da indústria da Construção Civil é na fase de planejamento da obra, quando se verifica dificuldade em realizar o projeto no tempo, inicialmente, pensado pela contratante. Assim sendo, o presente estudo propõe a aplicação do método de programação linear para a resolução do problema da otimização dos fatores tempo e custo nos projetos da Construção Civil. Foi realizado, inicialmente, levantamento bibliográfico, bem como a releitura de alguns conceitos básicos, técnicas de programação com rede e caminho crítico. Após, foram abordadas definições de pesquisa operacional e de modelos matemáticos de programação linear. Foi proposto, então, um método de solução para o problema da otimização tempo e custo dos projetos de Construção Civil. Para demonstrar a aplicação do método proposto, foi utilizada como problema uma obra pública, obtendo-se como resultado a compressão do projeto em 14 dias, atingindo o prazo de contato, a um custo de compressão no valor de R\$ 95.040,15 (noventa e cinco mil quarenta reais e quinze centavos), menor do que se houvesse incremento de multa por atraso. Com isso, alcançado o objetivo proposto, ou seja, a compressão do projeto para a duração desejada.

Palavras chave: Projeto, Construção Civil, Programação Linear, Otimização tempo/custo.



ABSTRACT

Bentes, Jayme. Parametric Time-Cost Compression Scheduling problem from the Civil Construction Project. Belém, Post-Graduate Program in Civil Engineering, Federal University of Pará (UFPA), 2011. 139p. Dissertation (Master's degree in Civil Engineering).

One of the issues of the Civil Construction Industry is around the planning phase of the the project, when is possible to verify the difficulty in completing the project in time, initially, thinking as the contractor. Therefore, the present study proposes the application of the linear programming method as a solution to the problem of the optimization of the factors time and costs from the Civil Construction projects. Initially it was done, by bibliographic mapping, also as the re-reading of some basic concepts, programming Technics with network and critical path. Afterword, it was discussed definitions of operational research and mathematical models of Linear Programming. It was proposed, therefore, a method aiming the solution of the issue of the time optimization and projects expenses of Civil Construction. To demonstrate the application of the proposed method, it was used as a scenario, a governmental construction project, that the goal was the compression of the project in 14 days, reaching a period of contract, a cost of compression the amount of R\$ 95,040.15 (ninety five thousand forty dollars and fifteen cents), less than if there were an increase in penalty for delay. With this achieved our objective, i.e., compression project for the desired duration.

Keywords: Projects, Civil Construction, Linear Programming, Time/Cost Scheduling Problem.



LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Cronograma de Barras.....	11
Figura 2.2 Exemplo do método americano (Rede CPM e PERT).....	13
Figura 2.3 Exemplo do Método Francês (PDM).....	14
Figura 2.4 Dados de tempo e custo e rede CPM.....	18
Figura 2.5 Compressão de rede limitada pelo aceleração da atividade B.....	19
Figura 2.6 Processo de Modelagem.....	24
Figura 2.7 Exemplo de Rede de um Projeto.....	34
Figura 2.8 Modelo de Programação Linear.....	35
Figura 3.1 Rede de um Projeto com Quatro Atividades (A, B, C e D).....	37
Figura 3.2 Representação gráfica tempo-custo da atividade j	38
Figura 4.1 Prédio do Instituto de Tecnologia da UFPA.....	43
Figura 4.2 Planilha com os Campos das Células Variáveis.....	54
Figura 4.3 Parâmetros.....	56
Figura 4.4 Restrição quanto ao início do projeto.....	56
Figura 4.5 Restrições quanto ao início das atividades.....	57
Figura 4.6 Restrição quanto ao modo de produção.....	58
Figura 4.7 Restrição quanto ao início das atividades iguais a números inteiros.....	58



LISTA DE QUADROS

Quadro 1 Relação de <i>softwares</i> para solução de programação linear.....	30
--	----



LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 Orçamento Analítico da Obra de Construção do Prédio do Instituto de Tecnologia.....	45
Tabela 4.2 Atividades com duração e suas predecessoras da obra de Construção do Prédio do Instituto de Tecnologia.....	47
Tabela 4.3 Relação Atividade X Modo de Produção.....	49
Tabela 4.4 Relação Atividade x CMA.....	52
Tabela 4.5 Fórmulas de interligação das atividades do projeto.....	57
Tabela 4.6 Resultado da otimização tempo e custo do projeto pesquisado.....	60
Tabela 4.7 Resultado das datas após a compressão do projeto.....	62
Tabela 4.8 Resultado em relação aos custos de compressão.....	64
Tabela 4.9 Resumo do Projeto em estudo.....	65



SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE QUADROS

LISTA DE TABELAS

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS E DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA.....	13
1.2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS.....	15
1.3 JUSTIFICATIVA.....	16
1.4 MÉTODO E QUESTÃO DE PESQUISA.....	17
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
2. REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 BREVE HISTÓRICO DO GERENCIAMENTO DE PROJETOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL	19
2.2 CONCEITOS BÁSICOS.....	21
2.2.1 Projeto	21
2.2.2 Planejamento	21
2.2.3 Programação	22
2.3 GRÁFICO DE GANTT.....	22
2.4 TÉCNICAS DE PROGRAMAÇÃO COM REDES.....	23
2.4.1 Os métodos CPM, PERT e PDM.....	24
2.5 FOLGAS.....	26
2.5.1 Folga total	26
2.5.2 Folga livre	27
2.5.3 Folga dependente	27
2.6 DETERMINAÇÃO DO CAMINHO CRÍTICO.....	28
2.7 PROBLEMAS DE ALOCAÇÃO DE RECURSOS.....	28
2.8 O PROBLEMA TEMPO X CUSTO.....	28

2.9 COMPRESSÃO OU ACELERAÇÃO DE PROJETO	29
2.9.1 Compressão limitada pela aceleração das atividades	31
2.9.2 Compressão limitada por folga	32
2.9.3 Compressão limitada por caminhos críticos paralelos	32
2.9.4 Compressão limitada por caminhos críticos acelerados	32
2.10 CÁLCULO DE COMPRESSÃO COMPLEXA	33
2.10.1 Compressão usando curvas de tempo x custo de múltiplo estágio	33
2.10.2 Compressão usando caminhos críticos múltiplos	33
2.11 PESQUISA OPERACIONAL	34
2.11.1 Origens e Definição de Pesquisa Operacional	34
2.11.2 Modelos Matemáticos	35
2.11.3 Estrutura dos modelos matemáticos	36
2.11.4 Fases de estudo de pesquisa operacional	37
2.11.5 Técnicas matemáticas utilizadas em Pesquisa Operacional	38
2.12 PROGRAMAÇÃO LINEAR	39
2.12.1 Problemas de Programação Linear	40
2.12.2 Limitações da Programação Linear	41
2.12.3 Resolvendo Problemas de Programação Linear com o Computador	42
2.13 PROGRAMAÇÃO INTEIRA	43
2.14 PROGRAMAÇÃO 0/1 OU PROGRAMAÇÃO BINÁRIA	44
2.15 MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR DE ACELERAÇÃO	45
3. MÉTODO DE SOLUÇÃO PROPOSTO	48
3.1 MODELAGEM MATEMÁTICA DE OTIMIZAÇÃO TEMPO-CUSTO EM PROJETOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL	48
3.2 MODELO PROPOSTO	49
4. APLICAÇÃO E RESULTADO	54
4.1 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA EMPRESA PESQUISADA	54
4.2 DESCRIÇÃO DA OBRA	54
4.3 DESCRIÇÃO DA APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO	59
4.3.1 Etapa 1 – Definição dos Modos de Produção	59
4.3.2 Etapa 2 - Cálculo do Custo Marginal de Aceleração (CMA)	62
4.3.3 Etapa 3 - Implementação do Modelo proposto no <i>Microsoft Excel</i>	64
4.4 RESULTADOS OBTIDOS	70
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	78

5.1 CONCLUSÕES	78
5.2 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	79
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS PRINCIPAIS	80
APÊNDICES.....	83

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS E DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA

A Indústria da Construção Civil é um conjunto de atividades bastante abrangente, conglomerando em si várias especialidades, como edificações, redes de saneamento, aeroportos, dentre outros. O Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC), por exemplo, segmenta a Construção Civil nos subsetores de Materiais de Construção, Edificações e Construções Pesadas.

Para se ter uma noção de quão expressivo é o papel deste ramo como fator propulsor da economia, principalmente nos últimos anos, o Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil no ano de 2010 teve um crescimento de 7,5% (sete e meio por cento) – maior alta nos últimos 25 (vinte e cinco) anos –, enquanto a Construção Civil teve um acréscimo de 11,6% (onze vírgula seis por cento), segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE,2010).

O referido ramo apresenta peculiaridades em relação às outras indústrias, por refletir uma estrutura nômade, na qual é necessário o deslocamento físico dos recursos para o local onde o empreendimento será construído. Além disso, é complexa, pois reúne um conjunto de profissionais, máquinas, equipamentos e materiais.

Assim, ante o crescimento do mercado da Construção Civil e suas particularidades, os empresários do ramo precisam tomar decisões de forma rápida e precisa, tanto em relação ao custo e quanto ao prazo de uma obra. Nesse contexto, os gestores devem estar munidos de informações relevantes que os auxiliem a obter um bom desempenho para que as decisões sejam as mais rápidas e precisas possíveis.

Writh (2008) destaca que há cem anos, as decisões empresariais eram tomadas com base na intuição, na coragem pessoal e raramente em poucas regras empíricas de avaliação das alternativas. Por outro lado, segundo o autor, atualmente, pelo menos nos países desenvolvidos, as decisões tendem a fluir de uma série objetiva de cálculos, estudos de mercado e análise de custos.

Destarte, há necessidade de ferramentas adequadas para o auxílio neste processo decisório por parte do setor de planejamento das empresas construtoras. Destacando-se que a tomada de decisão acerca de modelos e métodos racionais contribui para o aumento da consistência das decisões e sobrevivência da empresa.

Limmer (1997) relata que o projeto deve ser gerenciado como um todo, devendo-se organizar de forma lógica os recursos humanos, materiais e equipamentos para que a obra seja concluída dentro dos parâmetros de prazo, custo, qualidade e risco previamente estabelecidos.

Para que este objeto seja possível, segundo o autor, é necessário planejar a duração do projeto em todas as fases; definir os insumos a serem empregados; estabelecer a estrutura organizacional para implementação do projeto; quantificar os recursos necessários e saber como distribuí-los ao longo das atividades; e, por fim, orçar os custos, diretos e indiretos, de todos os recursos e disseminá-los ao longo do tempo, obtendo-se o cronograma físico-financeiro.

O autor completa ainda que, em paralelo a tudo isso, há necessidade de coletar dados durante a execução do projeto, transformando-os em informações para alimentar o sistema de controle do empreendimento, no qual as correções de eventuais desvios são feitas nos cronogramas e orçamentos até então planejados, tantas vezes quantas sejam necessárias.

Para demonstrar como pode se dar a forma de controle de tempo e custo, bem como o planejamento de projetos, serão abordadas técnicas de redes: a) *Critical Path Method* (CPM); b) *Program Evaluation and Review Technique* (PERT); e, c) *Precedence Diagramming Method* (PDM).

O desenvolvimento de tais métodos auxilia na busca de uma solução ótima que representa aquela que melhor atende concomitantemente aos critérios de custo e tempo, ou seja, é a equação ideal na qual o custo seja o menor possível em relação ao tempo desejado. Este é o objetivo almejado pela esmagadora maioria, senão por todos os projetos de Engenharia Civil.

Caso, por exemplo, o critério tempo fosse o único a pautar o planejamento, em determinada situação, a obra poderia até mesmo ser concluída no tempo ideal, porém, o custo poderia ser desnecessariamente aumentado. Ao revés, caso o custo fosse o critério máximo em detrimento do tempo, a obra poderia se prolongar por período bem acima do ideal. Nenhuma destas alternativas atende evidentemente aos objetivos dos projetos.

Assim, nessa linha de raciocínio, o que se busca com o planejamento é a otimização da relação entre tempo e custo para a compressão do projeto na busca da melhor relação custo e tempo das atividades que formam o caminho crítico (o mais longo) dentre todas as atividades que serão desempenhadas concomitantemente para que a obra tenha a duração

desejada. A cada passo, o caminho crítico pode mudar com a compressão de uma de suas atividades.

Para solução desse problema de otimização é aplicado a Programação Linear, uma das técnicas matemáticas de Pesquisa Operacional.

A Pesquisa Operacional é uma ciência aplicada para a resolução de problemas reais com o objetivo de fornecer ferramentas quantitativas ao processo de tomadas de decisões, e ao mesmo tempo, elementos de objetividade e racionalidade nesses processos, levando-se em consideração os elementos subjetivos e de enquadramento organizacional que caracterizam os problemas (LISBOA, 2002).

Segundo Arenales et al., 2007, alguns exemplos de técnicas de otimização utilizada em Pesquisa Operacional são: Programação Linear (PL); Programação Inteira (PI); Programação em redes; e, Programação não-linear.

A técnica utilizada neste trabalho para solução do problema de otimização é a Programação Linear. Prado (2010) conceitua Programação Linear como sendo uma técnica de otimização e ferramenta utilizada para alcançar o lucro máximo ou o custo mínimo em ocasiões nas quais tenham varias opções de escolhas sujeitas a algum tipo de restrição ou regulamentação.

Considerando todas as premissas acima expostas, o problema a ser abordado ao longo do desenvolvimento do presente trabalho pode ser enunciado mediante a seguinte pergunta: Como demonstrar mediante um estudo de caso a aplicação da programação linear na compressão de projetos de Construção Civil com minimização ótima do tempo e custo, levando também em consideração multa por descumprimento de prazo?

1.2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

O objetivo geral desta pesquisa é apresentar um modelo passível de ser utilizado pelas empresas do Estado do Pará, com o intuito de comprimir otimamente projetos de Construção Civil, setor de edificações, levando em consideração os critérios tempo e custo e considerando também multa por atraso.

Como objetivos específicos têm-se:

- Apresentar modelo de programação linear para a solução do problema;
- Apresentar uma sistemática de resolução por um *software* popular e de baixo custo;

- Apresentar modelagem paramétrica, isto é, que para cada duração de projeto determinada, seja obtida uma programação ótima;
- Apresentar soluções discretas, isto é, não deve haver possibilidade de um modo de produção híbrido, entre dois modos perfeitamente definidos;
- Apresentar modelo matemático que seja capaz de comprimir partes do projeto, uma cadeia ou um grupo de atividades continuadas em série e paralelo;
- Permitir que o modelo possa ir além do binômio normal-acelerado, ou seja, cada atividade tenha tantos modos de produção quanto se queira;
- Permitir que as atividades possam ter quantidades de modos de produção diferentes;
- Permitir que algumas atividades não necessariamente possuam modos de produção alternativo;
- Apresentar aplicação considerando um empreendimento real, comum à indústria local, passível de replicação metodológica.

1.3 JUSTIFICATIVA

Os responsáveis pelo gerenciamento de uma obra deparam-se, constantemente, com problemas relativos ao tempo de execução de um projeto, bem como a seu custo. Na maioria das vezes, o tempo é exíguo demais e, em outras, o custo é demasiadamente alto.

Assim sendo, deve-se sempre buscar a melhor relação entre tempo e custo com a otimização das etapas produtivas para que se desenvolvam no melhor tempo com o custo ideal para o projeto.

É comum que o empresariado do ramo da Construção Civil utilize para a resolução dessa problemática experiência e intuição, o que não é a melhor forma de proceder, já que podem ser perpetrados erros em razão da ausência de método científico ou procedimento pré-elaborado.

Ocorre, porém, que, em geral, esta maneira de resolver o impasse se limita a uma visão de curto prazo, ou seja, a tomada de decisões só leva em consideração um número reduzido de atividades, normalmente as que estão ocorrendo naquele momento. Essa situação é mais uma característica de capacidade da mente humana, que da, também existente, ausência de método.

Desta feita, o desenvolvimento deste trabalho tem o potencial de modificar para melhor a gestão de projetos na Construção Civil no Estado do Pará ao demonstrar como aplicar Programação Linear para a compressão de projetos visando a alcançar a minimização ótima dos fatores tempo e custo, levando-se em consideração o projeto como um todo.

Por conseguinte, conforme demonstrará a aplicação do método proposto, abandona-se a solução parcial e pontual, partindo-se para uma solução global, resolvendo o problema de maneira adequada.

1.4 MÉTODO E QUESTÃO DE PESQUISA

No decorrer do presente trabalho, serão apresentados os conceitos referentes a técnicas de programação com redes, determinação de caminho crítico, problema de alocação de recursos, problema de tempo-custo, compressão de projeto, Pesquisa Operacional e Programação Linear, além de outros relacionados aos temas abordados, conforme a visão de diversos autores, tais como Antill e Woodhead (1968), Limmer (1997), Hirschfeld (1969), Moder *et al.* (1983), Lisboa (2002), Ferreira (2006), Arenales et al. (2007), Prado (2010), Puccini e Pizzolato (1987) e outros.

O método a ser utilizado para a solução do problema será o dedutivo que, de acordo com Figueiredo & Souza (2010), “parte do geral para o particular, isto é, através de uma cadeia de raciocínio descendente com base em teorias ou leis, chega-se a uma conclusão”.

Para tanto foi, inicialmente realizada pesquisa bibliográfica, com o intuito de levantar a documentação existente sobre o assunto, utilizando-se livros, artigos e teses de autores nacionais e estrangeiros.

Após o desenvolvimento das premissas básicas, será aplicado o modelo de compressão de projetos em um caso real, para demonstrar a importância e eficácia do mesmo e, notadamente, obter indícios de que pode ser utilizado pelas empresas do setor de Construção Civil do Estado do Pará. Será escolhida uma edificação considerada representativa da construção civil local.

Este trabalho busca responder a questão central: - “Como comprimir otimamente em termos de tempo e custo, projetos de Construção Civil, área de edificações, levando também em consideração multa por descumprimento de prazo?”.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta Dissertação está estruturada em seis capítulos:

Capítulo 1 – Introdução – apresenta as considerações iniciais, definição do problema de pesquisa, os seus objetivos gerais e específicos e a justificativa da pesquisa.

Capítulo 2 – Referencial Teórico – aborda o histórico e o referencial teórico sobre gerenciamento e planejamento de projetos na Construção Civil, os pontos mais importantes de Pesquisa Operacional, com destaque em Programação Linear, Inteira e Binária.

Capítulo 3 – Método de Solução Proposto – consiste no modelo matemático de otimização tempo-custo em projetos de Construção civil.

Capítulo 4 - Aplicação e Resultado - incide na aplicação do modelo proposto em uma obra real e seus resultados quanto a otimização tempo-custo do projeto.

Capítulo 5 – Conclusões e Recomendações - apresenta as conclusões e as limitações da pesquisa e as recomendações para trabalhos futuros.

Além desses capítulos, são apresentadas as Referências Bibliográficas e o Apêndice.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este item trata de revisão bibliográfica útil para o desenvolvimento do trabalho, de acordo com a visão de vários autores importantes, destacando os seus principais aspectos relacionados com a pesquisa.

2.1 BREVE HISTÓRICO DO GERENCIAMENTO DE PROJETOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Desde os tempos das construções das pirâmides no Egito, apesar de não existirem registros de planejamentos formais, já havia uma preocupação quanto ao prazo, pois se relata que se o responsável não terminasse a pirâmide para servir de tumba para o Faraó antes de sua morte, o mesmo seria emparedado vivo dentro da pirâmide (LIMMER, 1997).

Já no início do século XX, Frederick Taylor (1856-1915) utilizou o raciocínio científico para mostrar que o trabalho pode ser analisado e melhorado focando-se em suas partes elementares (SISK, 1998).

Antes disso, o trabalho era visto como um todo unitário e inseparável, e a única forma de aumentar a produtividade dos trabalhadores era exigindo mais e mais horas de trabalho, e com o fracionamento racional das etapas produtivas melhorou-se o gerenciamento e, conseqüentemente, a produtividade (SISK, 1998).

O sócio de Taylor, Henry Gantt (1861-1919), estudou detalhadamente a ordem de operações no trabalho. Exemplificando a sua contribuição para o gerenciamento de projetos, durante a Primeira Guerra Mundial, construiu e utilizou gráficos com barras de tarefas e marcos, esboçando a sequência e duração de todas as tarefas no processo de construção de navios (SISK, 1998).

No período da Segunda Guerra Mundial, como as operações eram de grande porte e envolviam marinha, aeronáutica e aviação de, pelo menos, três países, as forças armadas norte-americanas ordenaram o desenvolvimento de métodos de planejamento mais efetivos para as suas complexas operações militares. Surgiu, assim, a pesquisa operacional e, em decorrência, a análise de sistemas (PARSONS, 1970 *apud* CODAS, 1987).

Após a Segunda Grande Guerra, a complexidade dos projetos e a diminuição da oferta de trabalho exigiram novas estruturas organizacionais. Assim, foi necessário desenvolver métodos para fornecer aos gerentes de engenharia um maior controle sobre os projetos que

passaram a ser extremamente complexos, a exemplo da fabricação de armas militares com uma enorme variedade de funções e numerosas interações ocorrendo ao mesmo tempo (SISK, 1998).

Para se ter um exemplo, em 1957, a Marinha dos Estados Unidos estava com certo receio de que ocorresse um caos administrativo no projeto de construção de mísseis denominados *Polaris*, pois havia um grande número de empreiteiros, subempreiteiros e muitas agências do governo envolvidas no projeto. Para se ter uma idéia, no campo de suprimentos, o número de peças envolvidas chegava cerca de 7.000 (sete mil), o que ocasionava um certo temor de atraso no término da execução (HIRSCHFELD, 1969).

Foi então que, em 1958, a Marinha Americana junto com empresas de projetos balísticos e a maior firma de consultores de empresa dos Estados Unidos, Booz, Allen & Hamilton Internacional Inc., desenvolveu o método de Técnica de Avaliação e Controle de Programas, em inglês *Program Evaluation and Review Technique* (PERT) (vide item 2.4.1), mediante o qual conseguiu reduzir o tempo de construção de foguetes de cinco para três anos (HIRSCHFELD, 1969; MODER *et al.*, 1970).

Quase ao mesmo tempo, a Cia. E. I. Du Pont de Nemours executava projetos de introdução de produtos químicos, nos quais o tempo tinha que ser estimado com bastante precisão, e, com auxílio da assessoria da empresa *Remington Rand Division*, desenvolveu o método do Caminho Crítico, em inglês *Critical Path Method* (CPM) (vide item 2.4.1), com objetivo de reduzir o tempo necessário para realizar revisão de plantas de rotina, manutenção e construção (HIRSCHFELD, 1969; MODER *et al.*, 1970).

Já na década de 60, na França, foi desenvolvido pelo professor da Universidade de Sorbonne, Bernard Roy, o método *Precedence Diagram Method* (PDM) (vide item 2.4.1), com a diferença de ilustrar as atividades nos nós do grafo representativo e não mais em seta, tal como nos dois primeiros métodos (LIMMER, 1997).

Rapidamente, estas técnicas se espalharam para outros tipos de indústria e líderes de projeto buscaram aprimorá-las, bem como descobrir novos métodos e ferramentas para gerenciar a evolução e dinamismo de suas atividades em um mundo competitivo e em rápida mutação (SISK, 1998).

No Brasil, o desenvolvimento da gerência de projetos, sob forte influência norte-americana, percorreu os mesmos caminhos dos outros países, sendo aplicado, inicialmente, no

setor de planejamento das indústrias em geral e montadoras de veículos, bem como no gerenciamento de obras hidrelétricas e construção de estradas (CODAS, 1987).

2.2 CONCEITOS BÁSICOS

2.2.1 Projeto

Projeto é o empreendimento singular que possui objetivo(s) bem definido(s), a ser(em) realizado(s) segundo um plano preestabelecido e dentro de condições de prazo, custo, qualidade e risco previamente definidas (LIMMER, 1997).

Pode ser definido ainda como um empreendimento que engloba um conjunto de ações, atividades, recursos materiais e humanos e tudo o que for necessário para a execução do que foi planejado ou acertado (NOCÊRA, 2009).

Ferreira (2010) em seu dicionário, apresenta os seguintes significados: a) Idéia que se forma de executar ou realizar algo, no futuro; plano, intento, desígnio; b) Empreendimento a ser realizado dentro de determinado esquema; c) Redação ou esboço preparatório ou provisório de um texto; d) Esboço ou risco de obra a ser realizada; e, e) Plano geral de edificação. Portanto, o significado técnico do termo envolve todos os citados por Ferreira, de maneira mais específica e adequada à Engenharia.

Tem-se, assim, que para a Construção Civil projeto é o empreendimento que engloba todas as tarefas, recursos humanos e materiais necessários à execução de uma obra.

2.2.2 Planejamento

Planejamento é um processo por meio do qual se estabelecem objetivos, discutem-se expectativas de eventos de situações presumidas, veiculam-se informações e comunicam-se resultados pretendidos entre pessoas, entre unidades de trabalho, entre departamentos de uma empresa e, mesmo, entre empresas (LIMMER, 1997).

O que se almeja em um planejamento é uma estrutura lógica de tarefas a serem executadas, suas interdependências e suas durações normais de tempo, com isso permitindo saber em cada tarefa qual a data mais cedo de começá-la e finalizá-la e qual a data mais tarde, isto é, a última chance de iniciá-la e terminá-la (HIRSCHFELD, 1969).

Com isso, o planejamento é um mecanismo de apoio à decisão, que permite soluções sempre mais eficientes, e no ramo da construção civil, o planejamento tem um caráter dinâmico, através do fornecimento de informações e diretrizes para o auxílio nas políticas e estratégicas das empresas (SANTOS E MOCELLIN, 1999).

2.2.3 Programação

Ferreira (2010) apresenta muitos significados para o termo programação, dentre os quais os mais importantes para o contexto abordado são: a) ato de programar, de estabelecer um programa; e, b) o programa ou plano de trabalho de uma empresa ou indústria, organização e etc., para ser cumprido ou executado em determinado período de tempo.

A programação indica as datas de início e de fim de cada atividade e, no conjunto das atividades, as datas de início e de fim do projeto (LIMMER, 1997).

2.3 GRÁFICO DE GANTT

O Gráfico de Gantt, mais conhecido como cronograma em forma de gráfico de barras horizontais, foi criado em 1918 pelo engenheiro industrial Henry Gantt (LIMMER, 1997).

O gráfico é construído da seguinte forma: as atividades do projeto são dispostas em barras (na Figura 2.1, as atividades vão de A a F) e as respectivas durações são representadas em colunas (na Figura 2.1, os períodos de tempo são dispostos de 1 a 7). Assim, de acordo com a duração de cada atividade, haverá uma barra cuja extensão engloba a unidade total de tempo adotada e o respectivo período, conforme ilustrado na Figura 2.1 (LIMMER, 1997).

ATIVIDADE	PERÍODOS DE TEMPO						
	1	2	3	4	5	6	7
A	█						
B	█						
C		█					
D			█				
E				█			
F					█		

Figura 2.1 - Cronograma de barras; Fonte: Limmer, 1997.

Verifica-se assim, que a atividade A será desenvolvida em três unidades de tempo, com início na unidade 1 e término na unidade 3. A atividade B será executada apenas na unidade 1. A atividade C será desenvolvida em três unidades de tempo, começando na unidade 2 e sendo finalizada na unidade 4. Segue-se a mesma lógica quanto às demais atividades, sendo possível visualizar o projeto como um todo e as atividades a serem desenvolvidas em cada uma de suas fases.

Em razão da robustez dos grafos matemáticos na modelagem de sistemas discretizados foram desenvolvidos os métodos de programação em rede.

2.4 TÉCNICAS DE PROGRAMAÇÃO COM REDES

Dá-se o nome de rede à representação gráfica de um projeto, mediante modelagem por grafos orientados, na qual se apresenta a sequência lógica do planejamento com as interdependências das tarefas tendo por fim alcançar um determinado objetivo (HIRSCHFELD, 1969)

As redes podem ser apresentadas de duas maneiras: a) atividades em setas (Método Americano), na qual as atividades são representadas pelas setas e os eventos pelos nós grafos, conforme o exemplo constante na Figura 2.2 do subitem 2.4.1; e, b) atividades em nós (Método Francês), na qual as atividades são representadas pelos nós e as setas

representam a ordem de ligação das tarefas, conforme exemplifica a Figura 2.3 do subitem 2.4.1 (LIMMER, 1997; HIRSCHFELD, 1969).

As redes servem como base para a programação orientada pelo tempo e tem como modelos mais tradicionais, no Método Americano, a Técnica de Avaliação e Controle de Programas (*Program Evaluation and Review Technique* – PERT) e o Método do Caminho Crítico (*Critical Path Method* – CPM), e, no Método Francês, o Método de Rede de Precedências (*Precedence Diagramming Method* – PDM).

Tais modelos servirão de apoio para a solução do problema de otimização da relação entre tempo e custo de um projeto, devido à possibilidade de visualizá-lo como um todo, com a facilidade de identificar o caminho mais longo da rede, constituído de atividades críticas, para melhor visualizar o mecanismo de compressão do projeto.

2.4.1 Os métodos CPM, PERT e PDM

O modelo *Critical Path Method* (CPM) tem como enfoque principal controlar os custos do projeto, baseando-se na premissa de que se forem alocados mais recursos na execução de uma determinada atividade, esta será executada mais rapidamente, ainda que o seu custo seja aumentado. É aplicada em projetos nos quais se sabe a duração das atividades com bastante precisão, embora por tradição, seja muito usado em obras da Construção Civil (SANTOS, 2003).

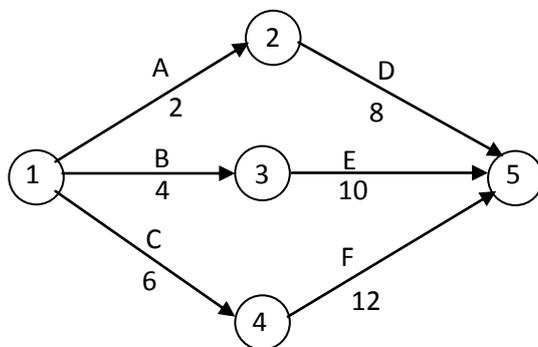
Já o método *Program Evaluation and Review Technique* (PERT) foi criado como um modelo probabilístico no qual a duração de cada atividade é uma variável aleatória de modo que para cada uma são feitas três estimativas de duração, quais sejam: a) duração otimista, que é a mais provável de ocorrer se não tiver nenhum problema; b) duração pessimista, que é provável de acontecer caso existam problemas; e, c) duração mais provável, que deve ocorrer quando a atividade for executada em condições normais (SANTOS, 2003).

Os métodos CPM e PERT são conhecidos como métodos americanos em razão de sua origem e representação comuns. Contudo, possuem uma significativa diferença: enquanto no primeiro os tempos de duração das atividades são definidos com base em experiências pregressas, de forma determinística; no segundo, são definidos mais de um tempo para cada atividade de forma probabilística (HIRSCHFELD, 1969; LIMMER, 1997).

Por fim, no *Precedence Diagramming Method* (PDM) as atividades são ilustradas por retângulos ou quadrados interligadas por meio de setas, de quatro maneiras diferentes: a) fim-início: a iniciação da atividade sucessora depende do término da atividade predecessora; b) início-início: o começo da atividade sucessora depende do começo da subsequente; c) início-fim: o término da atividade sucessora depende do começo da atividade subsequente; e, d) fim-fim: o fim da atividade sucessora depende do término da atividade predecessora (LIMMER, 1997).

Nas redes CPM e PERT, os nós representam eventos ou acontecimentos instantâneos e os arcos representam simultaneamente as atividades e os interrelacionamentos. Por sua vez, o PDM utiliza os nós como sendo as atividades, e os arcos exercem somente a função de estabelecer os interrelacionamentos.

Para ilustrar os Métodos Americano e Francês, pode-se imaginar um planejamento de um projeto constituído de cinco eventos ou marcos caracterizando um determinado instante em um projeto (1,2,3,4,5), seis tarefas ou atividades, representando a execução efetiva de uma operação (A, B, C, D, E e F), com as durações de suas atividades (2, 4, 6, 8, 10 e 12 semanas, respectivamente) e com certas interdependências, conforme ilustrado nas figura 2.2 e 2.3.



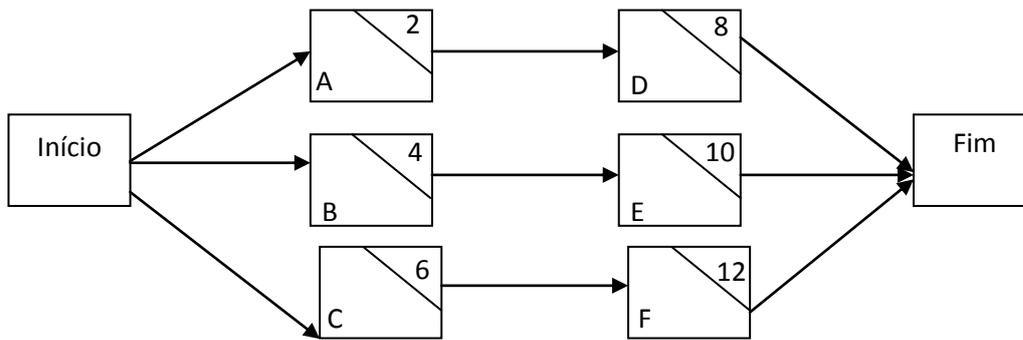
Onde:

A,B,...,F = Atividades;

1,2,...,5 = eventos;

{2,4,6,8,10,12} = durações das atividades.

Figura 2.2 – Exemplo do método americano (Rede CPM e PERT) Fonte: Autor, 2011



Onde

A,B,...,F = Atividades;

{2,4,6,8,10,12} = durações das atividades.

Figura 2.3 – Exemplo do Método Francês (PDM); Fonte : Autor, 2011.

2.5 FOLGAS

Para definir as folgas de uma atividade é necessária a definição de algumas variáveis das atividades, que são: a) Primeira data ou data mais cedo de início de uma atividade (*Earliest Start*) que corresponde a data em que a atividade pode ser iniciada após obedecidas as durações estimadas de suas antecessoras que definiram o seu valor; e, b) última data de início (*Later Start*) que é a ultima data limite para se iniciar uma atividade (SANTOS, 2003; HIRSCHFELD, 1969).

Também se deve levar em consideração a definição das seguintes datas: Primeira data de término ou tempo de término mais cedo de uma atividade que é o tempo mais cedo que pode ser finalizada uma atividade, correspondendo a soma do cedo do evento inicial da atividade com a sua duração; e última data de término ou tempo de término mais tarde de uma atividade definida como a última data possível de se terminar uma atividade (HIRSCHFELD, 1969; ANTILL e WOODHEAD, 1968)

2.5.1 Folga total

Folga total é definida como sendo a quantidade total de tempo que o início de uma atividade pode ser atrasado sem causar alongamento da duração do projeto. Tal demora pode acarretar em outras tantas nas atividades subsequentes, mas não retardará o projeto. Uma atividade que possui folga total igual a zero é considerada crítica, se a folga livre

também for zero, simultaneamente (HIRSCHFELD, 1969; ANTILL e WOODHEAD, 1968).

O cálculo da folga total pode ser feito pela subtração da data mais tarde de fim (data mais tarde em que uma atividade pode acabar sem comprometer a duração do projeto) pela data mais cedo de fim (data mais cedo em que uma atividade pode acabar) ou pela subtração da data mais tarde de início (data mais tarde em que uma atividade pode começar sem comprometer a duração do projeto) pela data mais cedo de início (data mais cedo possível em que uma atividade pode começar) (SANTOS, 2003).

2.5.2 Folga livre

A folga livre de uma atividade é a quantidade total de tempo que o início de uma atividade pode ser delongada, sem interferir com o início de qualquer atividade sucessora, com isto a folga livre não pode ser maior que a folga total (ANTILL e WOODHEAD, 1968).

Quando se tem folga livre corresponde que o prazo de realização da atividade pode ser dilatado sem se alterar o cedo do evento final que vem ser o cedo do evento inicial da ou das atividades seguintes (HIRSCHFELD, 1969).

2.5.3 Folga dependente

A folga dependente é a diferença entre a folga total e a folga livre de uma atividade. Qualquer atraso em iniciar uma atividade que envolva o consumo de qualquer parcela da folga dependente, ocasionará o retardo de algumas atividades seguintes, porém não comprometerá o tempo total de duração do projeto, a menos que ocorra atrasos em excesso na folga total (ANTILL e WOODHEAD, 1968).

Hirschfeld (1969) define folga total como o prazo de que se dispõe, a partir do tarde do evento inicial de uma atividade, para executar esta atividade e terminá-la até o máximo do tarde do evento final desta mesma atividade.

2.6 DETERMINAÇÃO DO CAMINHO CRÍTICO

As atividades que possuem folga total e folga livre iguais a zero são chamadas de atividades críticas e o caminho formado por estas atividades é conhecido como caminho crítico (SANTOS, 2003). Sendo que podem existir vários caminhos críticos em uma mesma rede ou mesmo todos os caminhos serem críticos, o que ocorre quando não existem folgas (HIRSCHFELD, 1969).

O caminho crítico é dependente, exclusivamente, das durações das atividades, de modo que, por um planejamento criterioso pode-se fazê-lo seguir cadeias específicas de atividades (ANTILL e WOODHEAD, 1968).

2.7 PROBLEMAS DE ALOCAÇÃO DE RECURSOS

Podem ocorrer três tipos importantes de problemas de alocação de recursos em uma programação de projetos: a) existir a necessidade de reduzir a variação nos perfis de demanda; b) ser necessário diminuir a duração do projeto, com isto, há necessidade de ter que acrescentar recursos ao menor custo; e c) ser preciso gerar uma combinação das datas de início das atividades, de modo que o recurso disponível não seja ultrapassado pelas despesas em nenhum período de tempo (ICHIHARA, 1998).

Com isso, os problemas de alocação de recursos podem ser classificados em três tipos principais: o Problema do Nivelamento de Recursos, o Problema da Compressão de Projetos e o Problema da Alocação de Recursos Limitados. (DAVIS, 1973 *apud* ICHIHARA, 1998).

2.8 O PROBLEMA TEMPO X CUSTO

Uma das possíveis aplicações da técnica de redes é a alocação dos custos às diferentes atividades, levando em consideração o seu valor econômico como um recurso. Ocorrendo que caso o executor do projeto deseje ajustar o prazo prefixado de um projeto, o mesmo deve ter conhecimento do valor deste ajuste de tempo, haja vista que o custo varia em função do tempo, para computá-lo no orçamento do projeto (LIMMER, 1997)

A ação de alocar um recurso significa em designá-lo para uma determinada atividade por período de tempo, de modo a não ocorrer de a capacidade de consumo ser superior à disponibilidade ofertada. Em um processo de alocação de recursos, podem ocorrer de duas situações: a) a oferta é maior que a demanda, e nesta situação, os recursos passam a não ser fatores limitantes na implementação do projeto; e b) a demanda é maior que a oferta em uma ou mais unidade de tempo (ICHIHARA, 1998).

O problema de tempo x custo possui inúmeras soluções. Se o tempo não for relevante, cada operação poderá ser realizada de modo a proporcionar o menor custo direto. Se o custo não é importante, cada operação poderá ser acelerada de maneira a ser finalizado em um intervalo de tempo mínimo (ANTILL e WOODHEAD, 1968).

Ao acelerar uma etapa do projeto ocasionará em um aumento do seu custo e uma diminuição do seu tempo de execução, porém se ela não se encontrar no caminho crítico, não decrescerá o tempo total do projeto. Por isso, é necessário buscar a melhor relação tempo x custo, a fim de reduzir o tempo do projeto a um menor custo (LIMMER, 1997).

Segundo Antill e Woodhead. (1968), a solução para o problema tempo x custo não é simples, pois todos os custos variam com o tempo. Os custos diretos tendem a decrescer se for acrescido mais tempo a uma operação, porém ocorrerá um crescimento nos custos indiretos e gerais com o tempo. É o apropriado equilíbrio entre o tempo e o custo total que levará a uma solução ótima.

2.9 COMPRESSÃO OU ACELERAÇÃO DE PROJETO

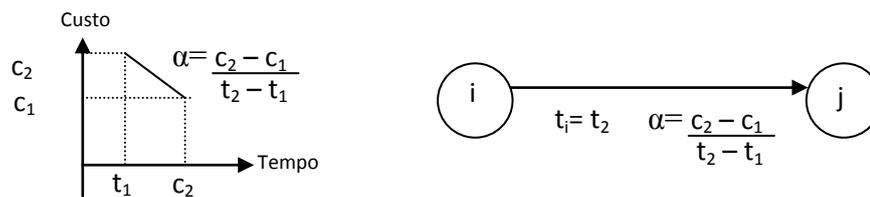
Para elaboração do presente tópico, foi utilizado, em grande parte o estudo realizado pelo Antill e Woodhead (1968).

Para a conclusão de um projeto, há a necessidade de aplicação de certas quantidades de recursos e tempo em cada uma de suas atividades. Com um mínimo de recursos e um máximo de tempo, a atividade é finalizada ao custo e duração normais, porém existem meios mais rápidos e conseqüentemente mais dispendiosos. Com isso, o projeto poderá ser acelerado, terminando num tempo menor do que foi projetado e com um custo mais elevado, mas o menor possível.

Esta aceleração de uma atividade, a qual pode ser descrita como uma *compressão da duração de uma atividade*, é dependente, tão somente, da disponibilidade de recursos, da forma da curva tempo x custo e do desejo de apressar a conclusão da tarefa.

Na compressão de uma rede, inicialmente deve-se conhecer o tempo e o custo de cada atividade. Estes dados são mostrados em forma de gráfico tempo x custo (Figura 2.4), com seus respectivos coeficientes angulares (α).

Atividade A_{ij}



Onde:

- α é o coeficiente angular;
- t_i é o tempo de duração da atividade i;
- c_i é o custo da atividade i.

Figura 2.4 - Dados de tempo e custo e rede CPM; Fonte: Autor, 2011.

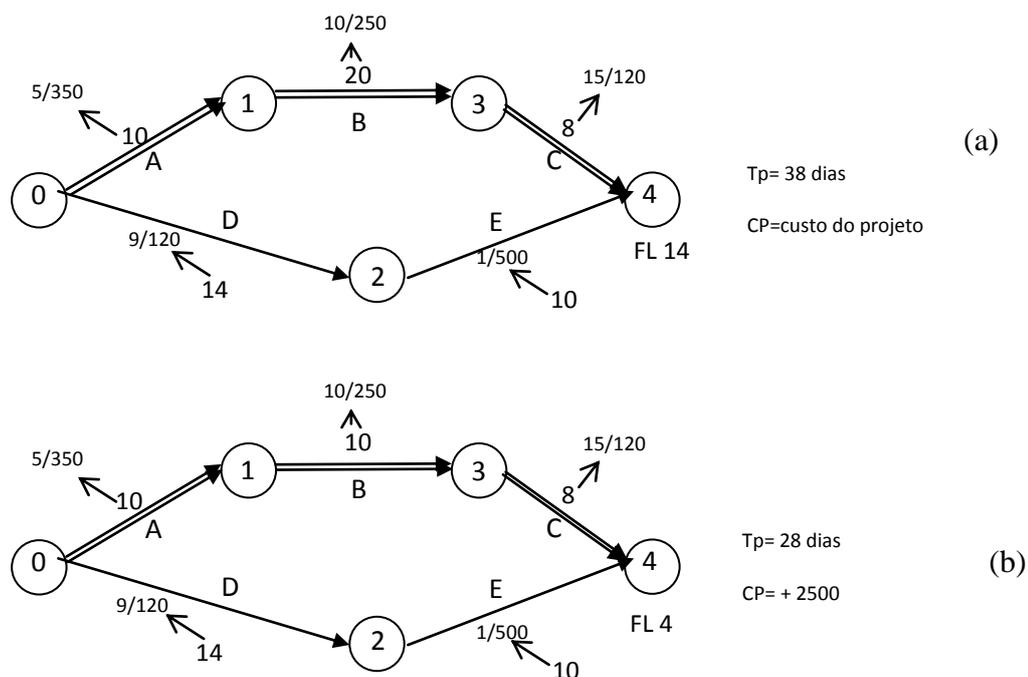
O procedimento básico para a compressão de uma rede é acelerar as atividades ao longo do seu caminho crítico, iniciando com a atividade que tenha o coeficiente angular menor e, então considerando, sucessivamente, as que tiverem maiores, tomando a precaução para que o total de compressão proposta não interfira com o restante da rede. Os cálculos da compressão de projeto estão ligados a parte da matemática conhecida como Programação Linear (vide item 2.12).

Na compressão de projetos existe uma variedade de limitações que pode levar à interrupção da compressão, entre elas, destacam-se a compressão limitada pela aceleração das atividades, limitada por folgas, limitada por caminhos críticos paralelos e limitada por caminhos críticos acelerados.

2.9.1 Compressão limitada pela aceleração das atividades

A compressão limitada pela aceleração das atividades é o caso onde uma determinada atividade está localizada no caminho crítico e pode ser acelerada de sua duração atual, supondo que somente exista um caminho crítico na parte da rede onde se encontra essa atividade e quando realizada a compressão não comprometa as outras atividades da rede (ANTILL e WOODHEAD, 1968).

A Figura 2.5 ilustra um exemplo onde a compressão de rede é possível. Imagina-se um planejamento de um projeto, com as atividades A, B, C e D, onde as atividades B e C estão no caminho crítico. Os dados tempo e custo são apresentados na rede. O tempo é indicado ao lado da seta e sobre essas durações são apontados as potenciais alterações nos tempos de duração e seus coeficientes angulares.



Onde:

- A,B,...,E = Atividades;
- TP = Tempo total do projeto;
- CP = custo total do projeto;
- FL = Folga livre.

Figura 2.5 - Compressão de rede limitada pelo aceleração da atividade B. Fonte: Autor, 2011.

Observa-se que primeiro relaciona as atividades do caminho crítico (A, B e C) e eliminam-se as atividades sem potencial para compressão, já aceleradas (A e C). Depois se

verifica a de menor coeficiente angular ($B - 250$), determinando o total a ser comprimido e o custo, levando em consideração se há alguma restrição na rede, como folga livre na cadeia paralela para a compressão (FL 14 maior que o total a ser comprimido que é de 10 dias). Por último, comprimi-se a rede até o máximo de 10 dias a um custo de 2500 unidades monetárias.

2.9.2 Compressão limitada por folga

Este caso de compressão ocorre quando ao comprimir uma atividade no caminho crítico, a mesma é impedida porque tornaria outra cadeia de atividades crítica (ANTILL e WOODHEAD, 1968).

No exemplo da Figura 2.5, no subitem 2.9.1, tal situação ocorre que ao comprimir a rede, encontra-se a atividade A no caminho crítico disponível para compressão de 5 dias a um custo de 350 unidade monetária por dia, porém a cadeia D-E, iniciando e acabando no caminho crítico, possui uma folga de 4 dias, com isso restringindo a compressão da atividade A em 4 dias.

2.9.3 Compressão limitada por caminhos críticos paralelos

Quando uma rede possuir dois ou mais caminhos críticos, deve haver compressão em todos esses caminhos críticos, pois ao contrário não ocorrerá a redução do projeto (ANTILL e WOODHEAD, 1968).

2.9.4 Compressão limitada por caminhos críticos acelerados

Com a aplicação continuada de recursos adicionais para compressão ótima de uma rede, todas as atividades de um caminho crítico devem alcançar suas durações aceleradas, portanto, ficando fisicamente impossível comprimir mais além a cadeia crítica. Com isso, ao atingir este estágio, encerra-se a análise da rede, pois qualquer redução do tempo de qualquer atividade não surtirá nenhum efeito na duração do projeto (ANTILL e WOODHEAD, 1968).

2.10 CÁLCULO DE COMPRESSÃO COMPLEXA

2.10.1 Compressão usando curvas de tempo x custo de múltiplo estágio

Segundo Antill e Woodhead (1968), as atividades podem ser representadas por curvas de estágio múltiplo, constituídas simplificada de uma série de linhas retas contínuas cada uma associada a um coeficiente angular. Em alguns casos, pode-se substituir essa curva de estágio múltiplo por uma linha reta, com o risco de esse procedimento levar a erros inaceitáveis, com isso levando a utilizar preferencialmente uma curva composta de segmentos de reta.

O cálculo de compressão em atividades com curvas de múltiplo estágio demanda mais estágios de compressão entre a atual situação e a acelerada, pois afetam a seleção das atividades para comprimir, na qual, se esta prosseguir além do intervalo selecionado do coeficiente angular, deve-se considerar um novo coeficiente (ANTILL e WOODHEAD, 1968).

Antill e Woodhead (1968) concluem que se as curvas de tempo x custo forem linearizadas de modo conservador, a curva de custo direto também será conservadora, levando a custos maiores do que os que efetivamente se aplicam ao caso.

2.10.2 Compressão usando caminhos críticos múltiplos

Nos casos em que se encontram múltiplos caminhos críticos, a decisão da melhor combinação de atividades encontradas no caminho crítico, para o menor coeficiente angular, torna-se mais complicada, devido atividades anteriormente comprimidas, precisarem ser descomprimidas para uma economia de custos e, em paralelo, comprimir mais pesadamente outras atividades para assegurar uma melhor compressão em relação ao tempo x custo.

Esta situação aparece quando uma atividade cara é descomprimida e uma outra atividade, relativamente barata, é comprimida. A rede e os dados disponíveis de tempo e custo permitem que esta situação se desenvolva por causa do intercruzamento de caminhos críticos e a sua mudança através da compressão instantânea de atividades, cujos dados básicos tem variações discretas. (ANTILL e WOODHEAD, 1968)

2.11 PESQUISA OPERACIONAL

2.11.1 Origens e Definição de Pesquisa Operacional

O termo Pesquisa Operacional, tradução da expressão inglesa *Operational Research*, foi criado pelo Superintendente da Estação de Pesquisa A. P. Rowe que coordenava equipes para examinar a eficiência de técnicas de operações oriundas de experimentos com interceptação de radar, na Inglaterra, na primeira metade do século XX (ARENALES *et al.*, 2007).

Durante a Segunda Guerra Mundial, um grupo de cientistas foi chamado à Inglaterra para pesquisar acerca de problemas relacionados à estratégia e tática de defesa do país, com o intuito de deliberar sobre a utilização mais eficaz de recursos militares limitados, o que implicou na aplicabilidade da atividade formal de Pesquisa Operacional pela primeira vez na história (LISBOA, 2002; FERREIRA, 2006).

A Pesquisa Operacional cresceu rapidamente na Inglaterra e nos Estados Unidos e, em 1947, o matemático George Dantzig, um dos coordenadores do projeto *Scientific Computation of Optimal* (SCOOP) do Pentágono, desenvolveu e testou o método *Simplex* para resolver problemas de Programação Linear, ou seja, solucionar questões de planejamento nas quais são empregados modelos de otimização linear (ARENALES *et al.*, 2007; FERREIRA, 2006).

Com o surgimento dos computadores, na década de 1950, criou-se a possibilidade de desenvolver novas metodologias para solucionar uma variedade considerável de problemas práticos, o que atraiu para a Pesquisa Operacional o interesse de muitas áreas de produção e logística, tais como: indústria de alimentação, automóveis, construção civil, metalurgia, etc. (ARENALES *et al.*, 2007). O que se observa é que na medida em que as capacidades de processamento dos computadores evoluem, possibilita-se a resolução de problemas cada vez mais complexos (LISBOA, 2002; FERREIRA, 2006).

Desta forma, pode-se conceituar Pesquisa Operacional como uma ciência aplicada para a resolução de problemas reais com o objetivo de fornecer ferramentas quantitativas ao processo de tomada de decisões e, ao mesmo tempo, elementos de objetividade e racionalidade nesses processos, levando-se ainda em consideração os elementos subjetivos e de enquadramento organizacional que caracterizam os problemas (LISBOA, 2002).

De forma sucinta, Arenales *et al.* (2007) define Pesquisa Operacional como “enfoque científico sobre a tomada de decisões”, tendo como objetivo servir de suporte para determinação de políticas e ações de forma científica.

2.11.2 Modelos Matemáticos

A matemática tem um papel importante em todas as áreas do conhecimento humano, uma vez que, a partir da observação de fenômenos, processos ou sistemas (físicos, químicos ou biológicos), buscam-se as leis que os regem. Essas leis, quando podem ser demonstradas por uma relação matemática, dão origem ao que se convencionou chamar de modelos matemáticos (ARENALES *et al.*, 2007).

Nesse contexto, modelo pode ser definido como uma representação de um objeto real que pode já existir ou ser apenas um projeto à espera de implementação. No primeiro caso, o modelo tem o intuito de se reportar ao funcionamento do sistema, com o objetivo de aumentar a produtividade; já no segundo, é empregado para determinar a estrutura ideal do sistema (LISBOA, 2002).

Para que a solução apresentada pelo modelo alcance credibilidade, deve-se buscar a validação do mesmo na representação do sistema real, isto é, a confirmação de que ele realmente é coerente com o contexto original. Com isso, a qualidade do modelo depende da maior aproximação possível entre a solução real e a solução proposta, sendo considerado mais preciso aquele modelo que consegue melhor descrever o comportamento original do sistema (ARENALES *et al.*, 2007; LISBOA, 2002).

Considerando que o modelo matemático é uma reprodução simplificada do problema real, ele deve ser suficientemente detalhado para captar os elementos essenciais do problema e, ao mesmo tempo, ser satisfatoriamente tratável por métodos de resolução (ARENALES *et al.*, 2007).

O diagrama da Figura 2.6 ilustra um processo da abordagem de solução de problema usando a modelagem matemática.

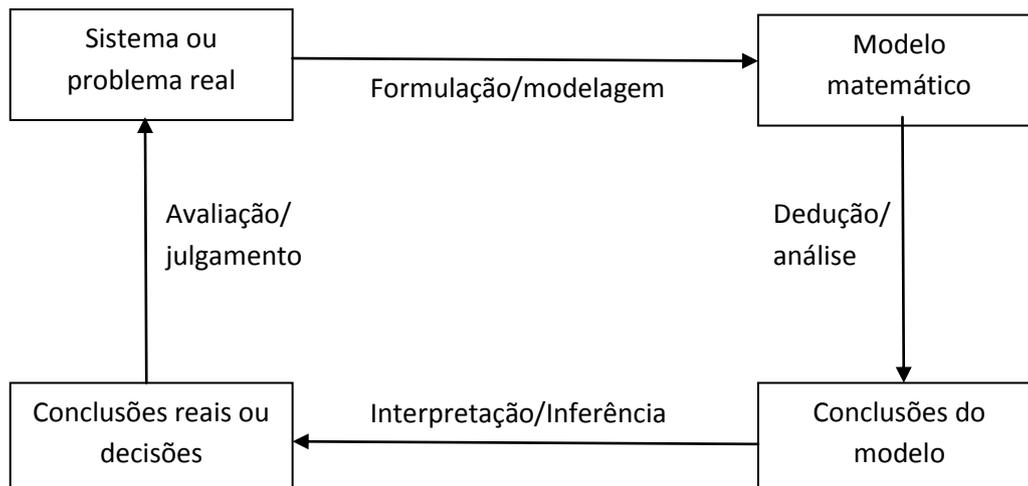


Figura 2.6 – Processo de Modelagem; Fonte: ARENALES, 2007.

Mediante a Figura 2.6 é possível verificar que a formulação (modelagem) delibera as variáveis e as relações matemáticas para delinear a conduta relevante do sistema ou problema real. Por sua vez, a dedução (análise) utiliza técnicas matemáticas e tecnologia para solucionar o modelo matemático e verificar quais as conclusões sugeridas.

Já a interpretação (inferência), verifica se as conclusões retiradas do modelo tem significados satisfatórios para inferir conclusões ou decisões para o problema real. Por fim, por meio da avaliação (julgamento), constata-se se as conclusões ou decisões inferidas são ou não adequadas para a definição do problema e sua modelagem matemática, e, caso não sejam, será necessária a revisão e, conseqüentemente, os passos serão repetidos (ARENALES, 2007).

2.11.3 Estrutura dos modelos matemáticos

A estrutura de um modelo matemático inclui três conjuntos principais de elementos, quais sejam: a) variáveis de decisão e parâmetros; b) restrições; e c) função objetivo (LISBOA, 2002; NAKASHIMA, 2004; ARENALES *et al.*, 2007).

As variáveis de decisão são as incógnitas a serem determinadas e os parâmetros são os valores fixos do problema, e.g., quantidades produzidas ou recursos utilizados.

As restrições devem ser incluídas nos modelos para limitar as variáveis de decisão a seus valores possíveis ou viáveis, ou seja, um conjunto de funções que define o espaço factível de soluções, e.g., limites para recurso, restrições operacionais de um processo de

produção, limitações físicas e técnicas. Já a função objetivo é uma função matemática que define a qualidade da solução em função das variáveis de decisão, e.g., minimizar custos, reduzir o número de homens/hora, maximizar lucros (LISBOA, 2002; NAKASHIMA, 2004; ARENALES *et al.*, 2007).

Para melhor ilustrar a estrutura de um modelo matemático incluindo os três elementos principais, pode-se considerar o seguinte exemplo:

Uma empresa A produz dois tipos de produtos, P1 e P2. Para produção dos mesmos são utilizados os insumos I1 e I2. Onde, para P1 são empregados 5kg de I1 e 1kg de I2 e para P2 são utilizados 4kg de I1 e 2kg de I2. O custo de P1 e P2 são, respectivamente, \$30 e \$40 e o preço do insumo I1 é \$5 e I2 é \$2. A disponibilidade do insumo I1 é de 10.000Kg por mês e do I2 é de 30.000kg por mês. Com isso, busca-se saber qual a quantidade de cada produto que deve ser produzido com o intuito de maximizar o lucro.

Neste exemplo, as variáveis de decisão são as quantidades de cada tipo de produto (P1 e P2) a serem produzidas, os parâmetros são os preços unitários de compra e venda, além das quantidades de insumos I1 e I2 em cada tipo de produto. As restrições são os limites dos insumos e a função objeto é uma função matemática para a determinação do lucro em função das variáveis de decisão e que deve ser maximizada.

2.11.4 Fases de estudo de pesquisa operacional

A abordagem de um problema por meio da Pesquisa Operacional envolve as etapas: a) definição do problema; b) construção do modelo; c) solução do modelo; d) validação do modelo; e, e) implementação do modelo (LISBOA, 2002; ARENALES *et al.*, 2007).

Na fase definição do problema, além de ser delimitado o problema em estudo, deve-se descrever de forma exata os objetivos, a identificação das alternativas de decisões existentes, limitações, restrições e exigências. A construção do modelo traduz o problema em relações matemáticas ou lógicas, ou em uma combinação delas.

Já a solução do modelo fornece métodos de solução e algoritmos conhecidos para a solução do modelo proposto na fase anterior. A etapa validação do modelo verifica se o modelo é capaz de fornecer uma previsão aceitável do comportamento do sistema, ou seja, se o modelo apresentado representa apropriadamente o problema. E, por fim, a implementação do modelo traduz os resultados do modelo em solução, preocupando-se com a solução do problema na prática.

2.11.5 Técnicas matemáticas utilizadas em Pesquisa Operacional

A formulação de um modelo deve estar diretamente ligada ao sistema a ser concebido, no qual a função-objetivo e as funções relacionadas às restrições podem ser lineares ou não-lineares; as variáveis de decisão podem ser contínuas ou discretas; e, os parâmetros podem ser determinísticos ou probabilísticos (LISBOA, 2002).

A implicação dessa ampla variedade de representações de sistemas é o desenvolvimento de diversas técnicas de otimização, criadas para solucionar cada tipo de modelo existente (LISBOA, 2002).

Nakashima (2004) define otimização como a área da matemática aplicada que visa calcular valores ótimos para variáveis de decisão de acordo com algum critério de avaliação, ao mesmo tempo em que procura satisfazer restrições de um modelo matemático.

Alguns exemplos dessas técnicas de otimização são :a) Programação Linear (PL); b) Programação Inteira (PI); c) Programação em redes; e, d) Programação não-linear (ARENALES et al., 2007; LISBOA, 2002; NAKASHIMA, 2004).

Os modelos lineares implicam relações lineares entre as variáveis do problema e quaisquer relações não-lineares presentes ou na função objetivo ou nas restrições, caracterizam um modelo de programação não linear. Em relação a Programação Inteira é aplicada para problemas que exigem variáveis inteiras ou alguma relação lógica entre as variáveis, como no caso de modelos que utilizam variáveis binárias (do tipo 1 ou 0) (OLIVEIRA, 2005).

Uma característica presente em quase todas as técnicas da programação matemática é que a solução ótima do problema não pode ser obtida em um único passo, mas sim iterativamente. Dessa forma, é escolhida uma solução inicial (que geralmente não é a solução ótima). A seguir, um algoritmo é especificado para determinar, a partir desta, uma nova solução, que geralmente é superior à anterior. Finalmente, este passo é repetido até que a solução ótima seja alcançada, caso exista (LISBOA, 2002).

2.12 PROGRAMAÇÃO LINEAR

O assunto de Programação Linear foi inicialmente analisado por Wassily Leontieff, em 1936, que desenvolveu um modelo constituído por um conjunto de equações lineares, considerado como o início para o estabelecimento das técnicas de programação linear. Em 1939, o matemático russo L. V. Kantorovick publicou um trabalho sobre planejamento de produção que apresentava, dentre diversas abordagens, o uso de equações lineares. No Ocidente, em 1960, estes trabalhos de programação linear vieram a ser conhecidos (PRADO, 2010).

Esta técnica é uma das mais utilizadas na abordagem de problemas da Pesquisa Operacional, sendo considerado um dos avanços científicos mais importantes do século XX e vem sendo aplicada em diversos ramos da administração de produção, análise de investimentos, alocação de recursos limitados, planejamento, logística e etc. Seus benefícios são procurados por todas as empresas: diminuição dos custos e aumento dos lucros (PRADO, 2010; SANTOS, 2003).

A Programação Linear utiliza-se de um modelo matemático para descrever o problema. O termo linear denota que todas as funções matemáticas dos modelos são, obrigatoriamente, lineares e a palavra programação deve ser vista como um sinônimo de planejamento. Em suma, Programação Linear pode ser definida como sendo o planejamento de atividades para atingir um resultado ótimo, ou seja, um resultado que atinja, da melhor forma possível, a um determinado objetivo (SANTOS, 2003).

Prado (2010) conceitua Programação Linear como sendo: uma técnica de otimização e ferramenta utilizada para alcançar o lucro máximo ou o custo mínimo em ocasiões nas quais tenham várias opções de escolhas sujeitas a algum tipo de restrição ou regulamentação.

Na prática, a Programação Linear tem sido utilizada em diversas áreas. Na alimentação, ajuda a determinar quais os alimentos que devem ser consumidos para que o custo seja mínimo e, ao mesmo, sejam obtidos os nutrientes adequados. Na manufatura, auxilia escolha da composição de produtos de modo que o lucro seja máximo, respeitando limitações ou exigências do mercado e a capacidade da fábrica. Na carteira de investimento, facilita na seleção das ações que devem fazer parte da carteira de investimentos, de modo que o lucro seja máximo, respeitando-se as previsões de

lucratividade e as restrições governamentais. Isto para ficar em apenas poucos exemplos (PRADO, 2010; ANDRADE, 1998 *apud* RODRIGUEZ, 2009).

Prado (2010) enumera as principais vantagens da Programação Linear, quais sejam: identificação das melhores opções em estudo de qualidade total; identificação de gargalos em linhas de produção; fixação de diretrizes para expansão; e avaliação do potencial de aplicabilidade de uma pesquisa para aprofundar o entendimento do problema.

2.12.1 Problemas de Programação Linear

Os problemas de Programação Linear fazem referência à distribuição eficiente de recursos limitados entre atividades competitivas, com o intuito de atender a um determinado objetivo, por exemplo, alcançar uma redução nos custos da empresa ou o aumento de seus lucros. No caso da programação linear, essa meta a ser alcançada é expressa por uma função linear conhecida como função objetivo (PUCCINI, 1972; LISBOA, 2002).

Há necessidade de definir as atividades que consomem cada recurso e em que proporção é realizado este consumo, informações fornecidas por equações ou inequações lineares, uma para cada recurso. O conjunto dessas equações ou inequações lineares denomina-se restrições (PUCCINI, 1972).

A distribuição dos recursos escassos entre as atividades deve ser coerente com as equações de consumo de cada recurso, isto é, satisfazendo às restrições do problema. Portanto, essa distribuição deve satisfazer às restrições do problema e alcançar o objetivo desejado, ou seja, que maximize o lucro ou minimize o custo. A essa solução denomina-se solução ótima (PUCCINI, 1972).

Um modelo geral de Programação Linear pode ser ilustrado da seguinte forma (PUCCINI e PIZZOLATO, 1987)

Max. $Z = c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_n x_n$, sujeito a

$$a_{11} x_1 + a_{12} x_2 + \dots + a_{1n} x_n \leq b_1$$

$$a_{21} x_1 + a_{22} x_2 + \dots + a_{2n} x_n \leq b_2$$

.....

$$a_{m1} x_1 + a_{m2} x_2 + \dots + a_{mn} x_n \leq b_m$$

e que

$$x_1 \geq 0; x_2 \geq 0; \dots; x_n \geq 0.$$

Puccini e Pizzolato (1987) afirmam que para melhor interpretar o modelo geral de Programação Linear, convém associá-lo a uma empresa que possui m recursos disponíveis para a produção de n produtos diferentes (atividades). Logo, para $j= 1, 2, \dots, n$ e $i= 1, 2, \dots, m$, tem-se:

x_j = nível de produção do produto j . Os x_j ($j= 1, 2, \dots, n$) são as incógnitas ou variáveis do problema.

c_j = lucro unitário do produto j .

b_i = quantidade disponível do recurso i ($b_i \geq 0$).

a_{ij} = quantidade do recurso i consumida na produção de uma unidade do produto j .

A função objetivo a ser maximizada representa o lucro total da empresa nas n atividades diferentes.

As restrições $a_{m1} x_1 + a_{m2} x_2 + \dots + a_{mn} x_n \leq b_m$ informam que o total gasto no recurso i , nas n atividades, tem que ser menor ou, no máximo, igual à quantidade b_i disponível daquele recurso.

As restrições $x_n \geq 0$ indicam que o nível de produção de cada produto não pode ser negativo.

2.12.2 Limitações da Programação Linear

Os modelos de programação linear, de acordo com Puccini (1972), possuem as seguintes limitações: coeficientes constantes, divisibilidade, proporcionalidade e aditividade. Coeficiente constantes, entende-se que os coeficientes a_{ij} , b_i e c_j são considerados constantes. Porém, na realidade, esses valores podem ser variáveis. A análise de sensibilidade do modelo permite fornecer os intervalos desses coeficientes, para os quais a solução ótima continua a mesma.

A divisibilidade consiste que as soluções ótimas poderão apresentar valores fracionados para qualquer uma das variáveis. O arredondamento de valores fracionados para valores inteiros mais próximos pode levar a erros bastante grosseiros.

A proporcionalidade corresponde que o lucro de cada atividade deve ser proporcional ao nível de produção x_j , sendo o lucro unitário o coeficiente de

proporcionalidade. Essa proposição apresenta que o lucro unitário c_j independe do nível de produção x_j e não leva em consideração a economia em escala.

Por fim, a aditividade consiste em considerar as atividades como entidades totalmente independentes, não permitindo que ocorra interdependência das mesmas.

2.12.3 Resolvendo Problemas de Programação Linear com o Computador

Problemas reais são solucionados no computador com a utilização de *softwares* que se baseiam no algoritmo método *simplex*. Existem atualmente centenas de pacotes para programação linear e, dentre os diversos disponíveis, os listados no quadro 1 são os mais utilizados (PRADO, 2010):

<i>Software</i>	Fornecedor	Capacidade		Programação Inteira		Formato para Entrada de Dados		
		Restrições (Linhas)	Variáveis (Colunas)	Binário ou 0,1	Geral	MPS	Planilha	LP
Lindo/ Lingo	Lindo	Sem limite	Sem limite	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
MPSX	IBM	16 milhões	2 bilhões	Sim	Sim	Sim	—	—
CPLEX	Cplex	50.000	100.000	Sim	Sim	Sim	—	Sim
OSL	IBM	16 milhões	2 bilhões	Sim	Sim	Sim	Sim	—
Solver-excel	Microsoft	100	200	Sim	Sim	—	Sim	—
Solver Premium	Frontline	Sem limite	1.000	Sim	Sim	—	Sim	—

Quadro 1- Relação de *softwares* para solução de programação linear; Fonte: Prado, 2010.

Para que um *software* seja considerado de boa qualidade, deve conter os seguintes requisitos: a) robustez matemática, ou seja, prover resultados corretos e estar apto a situações complexas; b) boa velocidade para solução de problemas complexos; e, c) conter

recursos visuais, arquivos de entrada e saída, possibilidade interativas e etc (PRADO, 2010).

2.13 PROGRAMAÇÃO INTEIRA

A Programação Inteira é também denominada de Programação Linear Inteira, Programação Discreta ou Programação Inteira Pura (PUCCINI e PIZZOLATO, 1987). É a denominação dada a problemas de Programação Linear em que as variáveis só podem admitir valores inteiros, ou seja, os valores fracionários não são admissíveis (GOÉS, 2005; PUCCINI e PIZZOLATO, 1987).

O modelo de programação linear inteira tem a seguinte expressão matemática (PUCCINI e PIZZOLATO, 1987):

Max. $Z = c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_n x_n$, sujeito a

$$a_{11} x_1 + a_{12} x_2 + \dots + a_{1n} x_n \leq b_1$$

$$a_{21} x_1 + a_{22} x_2 + \dots + a_{2n} x_n \leq b_2$$

.....

$$a_{m1} x_1 + a_{m2} x_2 + \dots + a_{mn} x_n \leq b_m$$

e que

$$x_j \geq 0 \text{ e inteiro, } j= 1, 2, \dots, n.$$

Onde:

x_j = nível de produção do produto j . Os x_j ($j= 1, 2, \dots, n$) são as incógnitas ou variáveis do problema.

c_j = lucro unitário do produto j .

b_i = quantidade disponível do recurso i ($b_i \geq 0$).

a_{ij} = quantidade do recurso i consumida na produção de uma unidade do produto j .

O modelo matemático de problemas da Programação Linear Inteira acima é diferenciado do modelo matemático da Programação Linear Pura (item 2.12.1) pela última restrição, na qual $x_j \geq 0$ é inteiro.

Caso particular de Programação Linear Inteira muito importante é aquele em que as variáveis x_j só podem assumir valores 0 ou 1, sendo denominado de Programação 0/1 ou Programação Binária (PUCCINI e PIZZOLATO, 1987).

2.14 PROGRAMAÇÃO 0/1 OU PROGRAMAÇÃO BINÁRIA

A programação 0/1 é estudada a parte, dentre as aplicações de programação linear, por possuir uma imensa variedade e importância de uso. É quando algumas variáveis somente podem assumir os valores zero e um. Dentre as aplicações da programação 0/1 destacam-se (PRADO, 2010):

- Problemas que envolvem variáveis discretas, variáveis de decisão, de encargos fixos, que utilizam conjuntos de restrições do tipo “ou” e que utilizam restrições condicionais.
- No caso de problemas que envolvem variáveis discretas, uma ou mais variáveis podem somente assumir valores discretos, um exemplo seria uma máquina que somente produz um produto em determinadas taxas.
- Nos problemas que envolvem variáveis de decisão, quando uma escolha ou decisão deve ser tomada, comumente são usadas variáveis binárias, o que pode ser observado frequentemente em problemas de investimento ou de locação.
- Nos problemas de encargos fixos, ao levantar os encargos de um sistema em operação, é comum constatar que um custo é constituído de uma porção fixa e um proporcional ao nível da atividade.
- Nas situações em que a solução ótima deve satisfazer a uma ou a outra restrição, mas não às duas, são problemas que utilizam restrições do tipo “ou”.
- Em problemas que usam restrições condicionais, se tem que expressar alguma restrição da seguinte forma: “se uma condição existe, então uma outra condição deve também ocorrer” ou então “se uma condição ocorre, então uma outra não deve ocorrer”

Prado, 2010 apresenta o seguinte caso de problema de programação 0/1, descrito abaixo:

Maximizar

$$\text{Lucro} = 11A + 20B$$

Sujeito a

$$8A + 5B \leq 400$$

$$A - 50I_a \leq 0$$

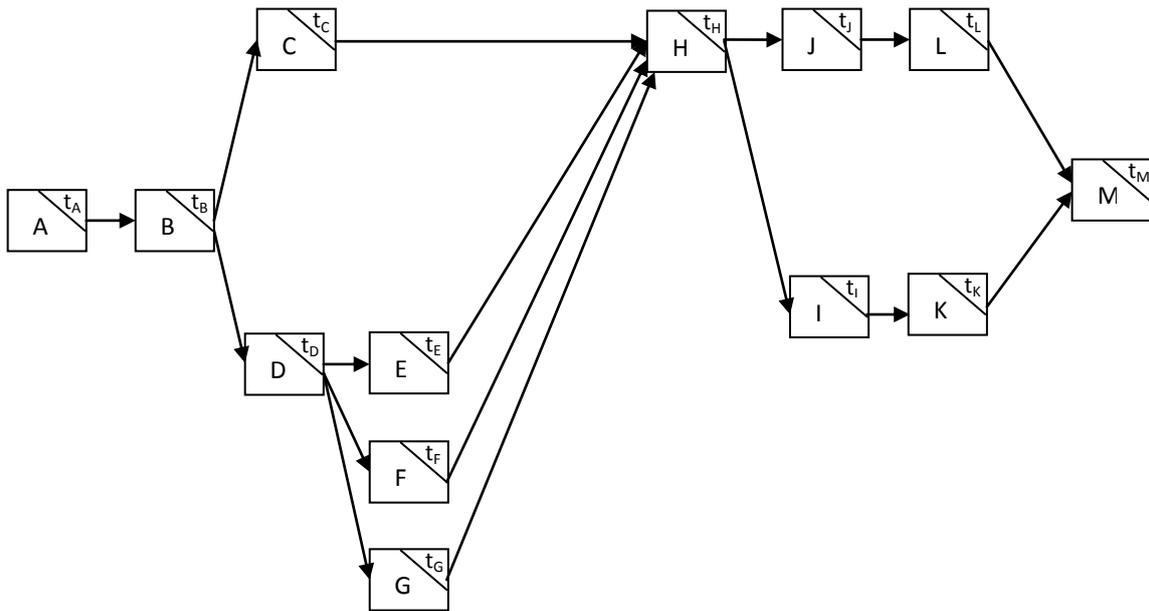
$$B \leq 60$$

$$A - 15I_a \geq 0$$

Onde, uma fábrica produz o produto A que somente pode ser produzido em quantidade maior que 15 unidades, em decorrência de características do processo produtivo. Logo, tem-se a situação para o produto A em que $A = 0$ ou $A > 15$. Foi criada para incluir a última restrição uma variável de decisão “ I_a ” que somente pode assumir os valores 0 ou 1, para representar a presença ou não do produto A na solução ótima, na qual “ I_a ” igual a 0 significa que não vai ser produzido o produto A, caso contrário “ I_a ” igual a 1, o produto A será produzido.

2.15 MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR DE ACELERAÇÃO

Considerando um projeto constituído com atividades de A até M e com suas respectivas durações de t_A até t_M , bem como suas interdependências representados em rede na Figura 2.7.



Onde:

A, B, ..., M = atividades;

t_A, t_B, \dots, t_M = durações das atividades.

Figura 2.7 – Exemplo de Rede de um Projeto; Fonte: Autor, 2011.

A formulação de um modelo de Programação Linear destinado a determinar o modo de produção (normal ou acelerado) e a data mais cedo de cada atividade, respeitando-se a otimização tempo-custo e as restrições impostas pelo grafo representativo do projeto, está disposto na Figura 2.8 (LIMA *et al.*, 2008).

Variáveis:

T_i Instante em que se inicia a atividade i

t_i Tempo regular da atividade i

C_i Tempo de comprimido da atividade i

Modelo:

$$\text{Min } T_M + t_m - C_m \quad (1)$$

Sujeito a:

$$T_B - T_A \geq t_A - C_A \quad (2) \quad T_H - T_C \geq t_C - C_C \quad (8) \quad T_G - T_H \geq t_H - C_H \quad (13)$$

$$T_C - T_B \geq t_B - C_B \quad (3) \quad T_H - T_E \geq t_E - C_E \quad (9) \quad T_K - T_I \geq t_I - C_I \quad (14)$$

$$T_D - T_B \geq t_B - C_B \quad (4) \quad T_H - T_F \geq t_F - C_F \quad (10) \quad T_L - T_J \geq t_J - C_J \quad (15)$$

$$T_E - T_D \geq t_D - C_D \quad (5) \quad T_H - T_J \geq t_J - C_J \quad (11) \quad T_M - T_K \geq t_K - C_K \quad (16)$$

$$T_F - T_D \geq t_D - C_D \quad (6) \quad T_I - T_H \geq t_H - C_H \quad (12) \quad T_M - T_L \geq t_L - C_L \quad (17)$$

$$T_G - T_D \geq t_D - C_D \quad (7)$$

$$C_i \leq \text{Tempo máximo de compressão disponível para a atividade } i \quad (18)$$

$$T_i, C_i \geq 0 \quad (19)$$

Figura 2.8 – Modelo de Programação Linear; Fonte: Lima *et al.*, 2008.

Na Figura 2.8 a função objetivo (1) está direcionada para minimizar o tempo total necessário para finalização do projeto. As restrições (2) a (17) asseguram que certa atividade só seja iniciada quando sua atividade predecessora tiver sido realizada. A restrição (18) garante que o tempo de compressão de uma atividade não ultrapasse o limite estabelecido. Por fim, a restrição (19) está relacionada à natureza das variáveis (LIMA *et al.*, 2008).

3. MÉTODO DE SOLUÇÃO PROPOSTO

3.1 MODELAGEM MATEMÁTICA DE OTIMIZAÇÃO TEMPO-CUSTO EM PROJETOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

O modelo de programação matemática que será desenvolvido neste trabalho é do tipo inteiro, devido possuir linearidade nas relações entre as variáveis, a variável binária 0-1 será incorporada ao modelo, a fim de representar decisões do tipo “sim” ou “não”, referindo-se ao modo de produção a ser utilizado.

O modelo matemático proposto está baseado em um modelo de programação linear tempo-custo que, genericamente, é descrito a seguir.

$$\text{Min } T_M + t_m - C_m \quad (1)$$

onde:

T_i Instante em que se inicia a atividade i

t_i Tempo regular da atividade i

C_i Tempo de compressão da atividade i

Sendo a função objetivo (1) com a finalidade de minimizar o tempo total necessário para conclusão do projeto. Tendo que respeitar as restrições que garantam que certa atividade só tenha início quando sua atividade predecessora tiver sido realizada, conforme abaixo (2)-(17):

$$T_B - T_A \geq t_A - C_A \quad (2) \quad T_H - T_C \geq t_C - C_C \quad (8) \quad T_G - T_H \geq t_H - C_H \quad (13)$$

$$T_C - T_B \geq t_B - C_B \quad (3) \quad T_H - T_E \geq t_E - C_E \quad (9) \quad T_K - T_I \geq t_I - C_I \quad (14)$$

$$T_D - T_B \geq t_B - C_B \quad (4) \quad T_H - T_F \geq t_F - C_F \quad (10) \quad T_L - T_J \geq t_J - C_J \quad (15)$$

$$T_E - T_D \geq t_D - C_D \quad (5) \quad T_H - T_J \geq t_J - C_J \quad (11) \quad T_M - T_K \geq t_K - C_K \quad (16)$$

$$T_F - T_D \geq t_D - C_D \quad (6) \quad T_I - T_H \geq t_H - C_H \quad (12) \quad T_M - T_L \geq t_L - C_L \quad (17)$$

$$T_G - T_D \geq t_D - C_D \quad (7)$$

O tempo de compressão de uma atividade não pode violar o tempo limite estabelecido (18):

$$C_i \leq \text{Tempo máximo de compressão disponível para a atividade } i \quad (18)$$

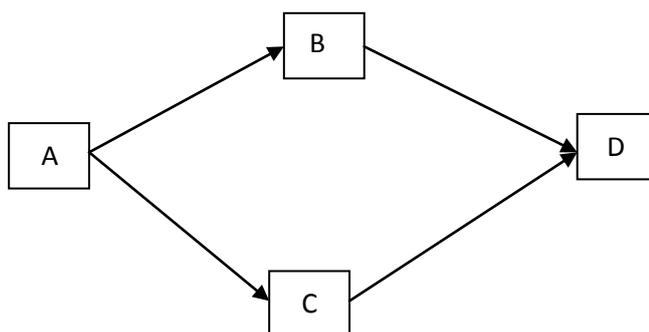
Obviamente, os tempos não podem ser negativos (19):

$$T_i, C_i \geq 0 \quad (19)$$

3.2 MODELO PROPOSTO

O objetivo do modelo desenvolvido neste trabalho é encontrar a solução ótima para a compressão de projetos de construção civil, levando em consideração os critérios tempo e custo, onde cada atividade pode ou não possuir modo(s) de produção. Além disso, o modelo levará em conta a possibilidade de multa para cada dia de atraso à data estabelecida em contrato. Tais características dirigem o modelo a uma realidade mais próxima da gestão de projetos.

Para apresentar o modelo, adotou-se um projeto genérico, constituído com quatro atividades A, B, C e D e suas interdependências, conforme demonstrado na rede da Figura 3.1.



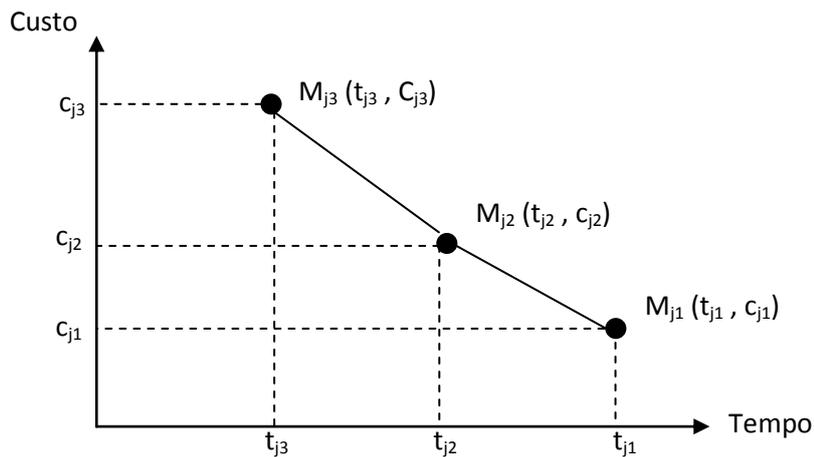
Onde:

A, B, C e D = Atividades

Figura 3.1 – Rede de um Projeto com Quatro Atividades (A, B, C e D); Fonte: Autor, 2011.

Cada atividade A, B, C e D possui três, por exemplo, modos de produção M_1 , M_2 e M_3 . A representação gráfica tempo-custo das atividades com seus respectivos modos de produção pode ser ilustrado, de modo geral, na Figura 3.2.

Atividade j



Onde:

M_{j1} , M_{j2} e M_{j3} = modos de produção;

t_{j1} , t_{j2} , t_{j3} = duração da atividade j no modo de produção k ;

c_{j1} , c_{j2} , c_{j3} = custo da atividade j no modo de produção k ;

$CMA = (c_{jk} / t_{jk})$ = custo marginal de aceleração.

Figura 3.2 – Representação gráfica tempo-custo da atividade j ; Fonte: Autor, 2011.

A representação matemática para o modelo proposto, por precedência, está descrito a seguir:

- Função Objetivo.

$$\text{Min } Z = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K CMA_{jk} \cdot x_{jk} + M [(I_D + (x_{D1} \cdot t_{D1} + x_{D2} \cdot t_{D2} + x_{D3} \cdot t_{D3}) - 1) - PL]$$

Onde:

$CMA = (c_{jk} / t_{jk})$ = custo marginal de aceleração

t_{jk} = duração da atividade j no modo de produção k ;

c_{jk} = custo da atividade j no modo de produção k ;

$x_{jk} = 0$, se o modo de produção (t_{jk}, c_{jk}) não for escolhido;

1, se o modo de produção (t_{jk}, c_{jk}) for escolhido;

Portanto x_{jk} = variável discreta inteira e binária;

M é a multa estabelecida em contrato para cada dia transpassado à data contratual;

PL = Prazo licitado, ou seja, prazo acordado em contrato com o cliente, até o qual o valor da multa é igual a zero;

I_D = Início da atividade D (última atividade).

- Restrições:

- Assegurar que o início do projeto comece no primeiro dia.

$$I_A = 1$$

Onde:

I_A = Início da primeira atividade do projeto.

- Para garantir que toda atividade só tenha início quando sua atividade predecessora tenha sido realizada, ou seja, esse grupo de restrição tem por finalidade promover a interligação das atividades.

- No caso de uma atividade ter seu início após o término de sua antecessora.

$$I_A + (x_{A1} \cdot t_{A1} + x_{A2} \cdot t_{A2} + x_{A3} \cdot t_{A3}) \leq I_B$$

$$I_A + (x_{A1} \cdot t_{A1} + x_{A2} \cdot t_{A2} + x_{A3} \cdot t_{A3}) \leq I_C$$

$$I_B + (x_{B1} \cdot t_{B1} + x_{B2} \cdot t_{B2} + x_{B3} \cdot t_{B3}) \leq I_D$$

$$I_C + (x_{C1} \cdot t_{C1} + x_{C2} \cdot t_{C2} + x_{C3} \cdot t_{C3}) \leq I_D$$

- No caso de uma atividade ter seu início ao mesmo tempo de sua predecessora (com ou sem uma latência de tempo), ou seja, início-início (II).

$$(I_n + x \text{ dias}) = I_j$$

- No caso de o término de uma atividade (com ou sem latência de tempo) coincidir com o início de sua predecessora, ou seja, término-início (TI).

$$(I_n + t_n - x \text{ dias}) = I_j$$

- No caso de o término de uma atividade (com ou sem latência de tempo) coincidir com o término de sua predecessora, ou seja, término-término (TT).

$$(I_n + t_n - x \text{ dias}) = (I_j + t_j)$$

Onde:

I_j, I_n = início da atividade j, n .

t_j, t_n = duração da atividade j, n ;

x = Latência, número inteiro.

- Escolha de um único modo de produção.

$$x_{A1} + x_{A2} + x_{A3} = 1$$

$$x_{B1} + x_{B2} + x_{A3} = 1$$

$$x_{C1} + x_{C2} + x_{A3} = 1$$

$$x_{D1} + x_{D2} + x_{A3} = 1$$

- O tempo de compressão do projeto não pode ser maior ou igual a duração requerida.

$$I_D + (x_{D1} \cdot t_{D1} + x_{D2} \cdot t_{D2} + x_{D3} \cdot t_{D3}) - 1 \leq PA$$

Onde:

PA = Parâmetro = duração requerida para o projeto ($P < P_1$);

- Condição binária às variáveis.

$$x_{jk} = 0 \text{ ou } 1.$$

- Os inícios das atividades tem que ser números inteiros.

$$I_j = \text{Número Inteiro.}$$

4. APLICAÇÃO E RESULTADO

4.1 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA EMPRESA PESQUISADA

A construtora envolvida nesta pesquisa é uma empresa de pequeno porte sediada na cidade de Belém, Estado do Pará, que, por questão de sigilo comercial, é denominada de “Construtora Alfa”. Presta serviço de engenharia civil voltada para o segmento de reforma e construção, tanto para o setor público – onde, atualmente, se concentram a maioria de suas obras –, quanto para o privado.

A empresa foi fundada, em 2005, por dois engenheiros civis que são, até hoje, seus sócios-diretores e dividem a responsabilidade pelo gerenciamento da empresa, incluindo orçamento e planejamento e, também, a condução das obras. No período de realização deste estudo, a empresa construía, simultaneamente, três empreendimentos públicos e um privado.

Durante a realização da pesquisa, verificou-se que a empresa enfrenta o seguinte problema: quando do planejamento da obra, antes de seu início, são encontradas dificuldades em cumprir o tempo indicado pelo órgão licitante para a execução do empreendimento. Na grande maioria dos casos, já nesta fase inicial, é identificada a necessidade de comprimir o tempo de execução para aquém do indicado no contrato administrativo.

Para a aplicação do modelo proposto no capítulo anterior, foi selecionada uma obra pública da empresa, na qual foi enfrentada esta problemática.

4.2 DESCRIÇÃO DA OBRA

A obra utilizada para este trabalho tem como objeto a prestação de serviços técnicos para a construção do prédio do Instituto de Tecnologia, localizado no Campus da Universidade Federal do Pará, situado em Belém (Figura 4.1), que foi licitada na modalidade concorrência pública, do tipo menor preço global.



Figura 4.1 – Prédio do Instituto de Tecnologia da UFPA; Fonte: Autor, 2012

A especificação técnica da obra é um empreendimento de 2 (dois) pavimentos, totalizando 720 m² (setecentos e vinte metros quadrados), constituído de salas de aulas e de professores. A fundação é em estaca de concreto armado 20 x 20 centímetros, seguido de blocos em concreto armado. A estrutura é formada por vigas e pilares constituídas de aço CA-50 e CA-60 e concreto estrutural com resistência (fck) de 25 MPA (vinte e cinco Mega Pascal), bem como de lajes convencionais e pré-fabricadas.

O fechamento é em alvenaria a cutelo e as divisões dos banheiros em granito. A cobertura do prédio é de estrutura metálica com telhas de aço zincado. A pavimentação é de piso em alta resistência, tipo *korodur* e nos banheiros lajotas 20 x 20 centímetros. As portas são em madeira de lei, sendo algumas chapeadas em compensado; as esquadrias em alumínio anodizado naturais tipo basculante. As pinturas das paredes internas e externas são em PVA acrílico.

A obra foi dividida em duas etapas, tendo sido licitada, inicialmente, somente a primeira etapa que abrange os serviços preliminares, fundação, infra-estrutura e superestrutura, paredes e divisórias, instalações elétricas, lógicas e hidrossanitárias (somente tubulações), bem como a limpeza da obra.

Essa concorrência foi vencida pela “Empresa Alfa” que apresentou orçamento no valor de R\$ 414.470,45 (quatrocentos e quatorze mil, quatrocentos e setenta reais e quarenta e

cinco centavos), conforme detalhado na Tabela 4.1, na qual é apresentada a planilha das atividades e suas respectivas quantidades e valores unitários reais.

SUBITEM	DISCRIMINAÇÃO	UND	QTDE	V. UNIT.(R\$)	TOTAL
1	SERVIÇOS PRELIMINARES				628,84
1.1	Locação da obra com aparelho e execução de gabarito	m ²	400,00	1,57	628,84
2	FUNDAÇÃO				208.781,11
2.1	Escavação manual	m ³	50,00	15,70	784,88
2.2	Reaterro compactado	m ³	25,00	17,17	429,25
2.3	Estaca de concreto armado 20 x 20 cm	m	1.924,00	100,00	192.400,00
2.4	Lastro em concreto magro	m ³	1,83	326,05	596,66
2.5	Forma de madeira comum	m ²	46,95	32,27	1.515,03
2.6	Aço CA-50	kg	639,00	7,25	4.632,24
2.7	Concreto estrutural Fck=25Mpa	m ³	13,04	444,83	5.800,62
2.8	Desforma	m ²	57,15	1,37	78,01
2.9	Forma dos pescoços	m ²	10,20	32,27	329,14
2.10	Armadura dos pescoços	kg	189,00	7,25	1.370,10
2.11	Concreto dos pescoços	m ³	1,90	444,83	845,18
3	ESTRUTURA				164.903,88
3.1	TERREO				
3.1.1	Forma dos pilares	m ²	50,50	32,27	1.629,58
3.1.2	Armadura dos pilares	kg	189,00	7,25	1.370,10
3.1.3	Concreto dos pilares	m ³	1,90	444,83	845,18
3.1.4	Forma das vigas	m ²	60,70	32,27	1.958,73
3.1.5	Armadura das vigas	kg	431,00	7,25	3.124,41
3.1.6	Concreto das vigas	m ³	12,00	444,83	5.337,99
3.1.7	Cimbramento Metálico	m ²	213,33	29,29	6.248,53
3.1.8	Forma das lajes	m ²	277,00	32,27	8.938,51
3.1.9	Armadura das Lajes	kg	1.762,00	7,25	12.773,09
3.1.10	Concreto da laje	m ³	27,70	444,83	12.321,86
3.1.11	Desforma	m ²	388,20	1,37	529,89
3.1.12	Laje pré fabricada	m ²	40,72	79,13	3.222,27
3.2	SUPERIOR				
3.2.1	Forma dos pilares	m ²	50,50	32,27	1.629,58
3.2.2	Armadura dos pilares	kg	242,00	7,25	1.754,31
3.2.3	Concreto dos pilares	m ³	2,60	444,83	1.156,56
3.2.4	Forma das vigas	m ²	100,00	32,27	3.226,90
3.2.5	Armadura das vigas	kg	743,00	7,25	5.386,16
3.2.6	Concreto das vigas	m ³	9,50	444,83	4.225,91
3.2.7	Cimbramento Metálico	m ²	213,33	29,29	6.248,53
3.2.8	Forma das lajes	m ²	277,00	32,27	8.938,51
3.2.9	Armadura das Lajes	kg	3.011,30	7,25	21.829,52
3.2.10	Concreto da laje	m ³	28,00	444,83	12.455,31
3.2.11	Desforma	m ²	427,50	1,37	583,54

Continuação da Tabela					
SUBITEM	DISCRIMINAÇÃO	UND	QTDE	V. UNIT.(R\$)	TOTAL
3.3	FORRO				
3.3.1	Forma das vigas	m ²	139,00	32,27	4.485,39
3.3.2	Armadura das vigas	kg	543,00	7,25	3.936,32
3.3.3	Concreto das vigas	m ³	8,20	444,83	3.647,63
3.3.4	Cimbramento Metálico	m ²	213,33	29,29	6.248,53
3.3.5	Forma das lajes	m ²	204,80	32,27	6.608,69
3.3.6	Armadura das Lajes	kg	642,00	7,25	4.653,99
3.3.7	Concreto da laje	m ³	20,50	444,83	9.119,07
3.3.8	Desforma	m ²	343,80	1,37	469,29
4	PAREDES E PAINÉIS				21.605,59
4.1	Alvenaria a cutelo térreo	m ²	338,36	26,45	8.949,49
4.2	Alvenaria a cutelo superior	m ²	338,36	26,45	8.949,49
4.3	Elemento vazado tipo 1/ tijolo invertido	m ²	30,56	79,10	2.417,37
4.4	Brise	m ²	16,48	78,23	1.289,24
5	INSTALAÇÕES ELÉTRICA E LÓGICA				12.775,76
5.1	Tubulações laje do térreo	vb	1,00	6.387,88	6.387,88
5.2	tubulações laje superior	vb	1,00	6.387,88	6.387,88
6	INSTALAÇÕES HIDROSSANITÁRIAS				4.129,02
6.1	Tubulações laje do térreo	vb	1,00	2.064,51	2.064,51
6.2	tubulações laje superior	vb	1,00	2.064,51	2.064,51
7	COMPLEMENTAÇÃO DA OBRA				1.646,25
7.1	Limpeza da obra	m ²	500,00	3,29	1.646,25
TOTAL GERAL					414.470,45

Tabela 4.1 – Orçamento Analítico da obra de Construção do Prédio do Instituto de Tecnologia; Fonte: Empresa pesquisada, 2011.

O prazo de execução para conclusão da primeira etapa, segundo planejamento desenvolvido pela empresa, ficou no total de 144 (cento e quarenta e quatro) dias úteis. A Tabela 4.2 relaciona as atividades com suas durações e predecessoras.

Item	Atividade	Duração	Predecessoras
A	Construção Prédio do ITEC	144 dias	
2	SERVIÇOS PRELIMINARES	5 dias	
3	Locação	5 dias	
4	FUNDAÇÃO	36 dias	
5	Cravação de estaca	30 dias	3
6	Escavação c/ arrasamento	8 dias	5TI-10 dias
7	Reaterro	2 dias	14
8	Forma dos blocos	2 dias	6TT
9	Lastro dos blocos	1 dia	8
10	Ferragem dos blocos	3 dias	9TT

Continuação da Tabela			
Item	Atividade	Duração	Predecessoras
11	Concreto dos blocos	1 dia	10
12	Forma dos pescoços	2 dias	11
13	Ferragem dos pescoços	2 dias	11
14	Concreto dos pescoços	1 dia	13;12
15	Desforma	3 dias	14
16	ESTRUTURA	86 dias	
17	TERREO	45 dias	
18	Forma dos pilares	2 dias	23
19	Armadura dos pilares	2 dias	7
20	Concreto dos pilares	1 dia	18;19
21	Forma das vigas	7 dias	25TT;15
22	Armadura das vigas	7 dias	21TT
23	Concreto das vigas	3 dias	27TT;22
24	Escoramento em madeira	8 dias	7
25	Forma das lajes	8 dias	24II+5 dias
26	Armadura das Lajes	6 dias	25TT-2 dias
27	Concreto da laje	4 dias	26;57;60
28	Desforma	8 dias	27TI+18 dias
29	Laje pré fabricada (rampa)	2 dias	27
30	SUPERIOR	56 dias	
31	Forma dos pilares	2 dias	36
32	Armadura dos pilares	2 dias	26
33	Concreto dos pilares	1 dia	31;32
34	Forma das vigas	7 dias	38TT
35	Armadura das vigas	7 dias	34TT
36	Concreto das vigas	3 dias	40TT;35
37	Escoramento em madeira	8 dias	20
38	Forma das lajes	8 dias	37II+5 dias
39	Armadura das Lajes	8 dias	38TT-2 dias
40	Concreto da laje	4 dias	39;58;61
41	Desforma	8 dias	40TI+18 dias
42	FORRO	42 dias	
43	Forma das vigas	7 dias	47TT
44	Armadura das vigas	5 dias	43TT
45	Concreto das vigas	3 dias	49TT;44
46	Escoramento em madeira	8 dias	33
47	Forma das lajes	8 dias	46II+5 dias
48	Armadura das Lajes	6 dias	47TT-2 dias
49	Concreto da laje	4 dias	48
50	Desforma	8 dias	45TI+18 dias
51	PAREDES E PAINÉIS	32 dias	
52	Alvenaria a cutelo térreo	10 dias	41
53	Alvenaria a cutelo superior	10 dias	50

Continuação da Tabela			
Item	Atividade	Duração	Predecessoras
54	Elemento vazado tipo 1/ tijolo invertido	3 dias	53
55	Brise	2 dias	52
56	INSTALAÇÕES ELÉTRICAS	24 dias	
57	Tubulações laje do térreo	2 dias	25TT
58	tubulações laje superior	2 dias	38TT
59	INSTALAÇÕES HIDROSSANITÁRIAS	24 dias	
60	Tubulações laje do térreo	2 dias	25
61	tubulações laje superior	2 dias	38
62	DIVERSOS E LIMPEZA	5 dias	
63	Limpeza final	5 dias	28; 29; 54; 55

Tabela 4.2 – Tabela das atividades com duração e suas predecessoras da obra de Construção do Prédio do Instituto de Tecnologia; Fonte: Empresa pesquisada, 2011.

Ressalta-se que, o tempo de execução da obra planejado pela empresa ficou 24 (vinte e quatro) dias acima do tempo licitado pela Universidade, pelo que há o risco de aplicação, pelo ente público, de multa por atraso.

4.3 DESCRIÇÃO DA APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

A seguir serão apresentadas as etapas realizadas durante a aplicação do modelo proposto no Capítulo 3.

4.3.1 Etapa 1 – Definição dos Modos de Produção

Neste trabalho, foi definido como modo de produção uma maneira de realizar uma atividade, ou seja, cada uma das possibilidades de organização em termos de tecnologia, quantidade de mão de obra, equipamentos e materiais utilizados. O Modo Normal ou Modo 1 é o de maior duração e menor custo; os outros modos são de compressão de tempo com o aumento de custo, sendo denominados de Modo 2, Modo 3, etc.

No intuito de deliberar quais atividades vão possuir mais de um modo de produção, foram selecionadas aquelas com duração igual ou acima de três dias. Essa decisão teve o objetivo único de reduzir o tamanho do exemplo, sem comprometer os resultados da pesquisa.

Analisando a Tabela 4.2 do subitem 4.3, as atividades que possuem três ou mais dias, ou seja, as que vão ter mais de um modo de produção são as seguintes atividades: cravação das estacas, escavação com arrasamento, armadura das vigas e lajes, escoramento e alvenaria. A atividade “forma em madeira” que possui mais de cinco dias de duração, não foi considerada por restrição orçamentária inerente ao projeto.

Na atividade de cravação das estacas, no modo de produção normal, há a utilização de somente um equipamento de bate-estaca para cravação. Por sua vez, como modo de produção alternativo, tem-se a utilização de dois bate-estacas, com intuito de redução do tempo de execução da atividade.

No serviço de escavação com arrasamento, na composição de custo unitário da empresa, estava prevista a realização do serviço com utilização de pá. Como modo de produção alternativo e com o intuito de melhorar a produtividade, foi considerado o aluguel de martetele pneumático.

Na atividade de armadura das vigas e lajes, a “Empresa Alfa” adotou como modo de produção a compra de ferro para dobra e corte, no canteiro da obra, com sua própria mão de obra. Em relação a esse serviço, foram tomados dois modos de produção alternativos, quais sejam: (a) a compra da ferragem cortada direto do representante da fábrica na região, porém com o serviço de dobra continuando a ser executado no canteiro da obra; e (b) a compra da ferragem já cortada e dobrada diretamente do representante da fábrica na região.

No escoramento das formas, a empresa considerou como Modo 1 o uso de escora em madeira, tendo sido pensados como modos de produção alternativos: (a) o escoramento misto, ou seja, a utilização de peças em madeiras e o aluguel de estrutura metálica; e (b) o cimbramento metálico, que consiste no aluguel de peças metálicas.

No que diz respeito ao serviço de concretagem, foi considerado como modo normal o concreto confeccionado no canteiro de obra e o lançamento do mesmo por meio de carrinhos de mão. Já os Modos 2 e 3 foram os seguintes: (a) a compra de concreto usinado, porém mantendo-se o lançamento do mesmo com a utilização de carrinhos de mão; e (b) a compra de concreto usinado e aluguel de bomba para lançamento do mesmo.

Por último, no serviço de alvenaria, verificou-se que a empresa, normalmente, adota a utilização de tijolos de seis furos, pelo que a proposta de modo de produção alternativo consistiu no o emprego de tijolo de oito furos.

Após esse passo, foi criada uma tabela com as atividades e os seus respectivos modos de produção, conforme demonstrado na Tabela 4.3.

Atividade		Normal	Acelerado	
		Modo 1	Modo 2	Modo 3
2	FUNDAÇÃO			
2.1	Cravação de estaca	Mobilização de um bate estaca	Mobilização de dois bate estacas	
2.2	Escavação c/ arrasamento	Escavação manual	Aluguel de Martetele Pneumático	
2.7	Concreto dos blocos	Concreto confeccionado no canteiro da obra e lançado manualmente	Concreto usinado e lançado manualmente	Concreto usinado e bombeado
3	ESTRUTURA			
3.1	TERREO			
3.1.5	Armadura das vigas	Corte e dobra da ferragem no canteiro	Ferro cortado de fábrica e dobra no canteiro	Ferro cortado e dobrado de fábrica
3.1.6	Concreto das vigas	Concreto confeccionado no canteiro da obra e lançado manualmente	Concreto usinado e lançado manualmente	Concreto usinado e bombeado
3.1.7	Escoramento de Madeira	Escoramento com peças de madeira	Escoramento misto com peças de madeira e estrutura metálica	Escoramento metálico
3.1.9	Armadura das Lajes	Corte e dobra da ferragem no canteiro	Ferro cortado de fábrica e dobra no canteiro	Ferro cortado e dobrado de fábrica
3.1.10	Concreto da laje	Concreto confeccionado no canteiro da obra e lançado manualmente	Concreto usinado e lançado manualmente	Concreto usinado e bombeado
3.2	SUPERIOR			
3.2.5	Armadura das vigas	Corte e dobra da ferragem no canteiro	Ferro cortado de fábrica e dobra no canteiro	Ferro cortado e dobrado de fábrica
3.2.7	Escoramento de Madeira	Escoramento com peças de madeira	Escoramento misto com peças de madeira e estrutura metálica	Escoramento metálico
3.2.9	Armadura das Lajes	Corte e dobra da ferragem no canteiro	Ferro cortado de fábrica e dobra no canteiro	Ferro cortado e dobrado de fábrica
3.2.10	Concreto da laje	Concreto confeccionado no canteiro da obra e lançado manualmente	Concreto usinado e lançado manualmente	Concreto usinado e bombeado
3.3	FORRO			
3.3.2	Armadura das vigas	Corte e dobra da ferragem no canteiro	Ferro cortado de fábrica e dobra no canteiro	Ferro cortado e dobrado de fábrica
3.3.4	Escoramento de Madeira	Escoramento com peças de madeira	Escoramento misto com peças de madeira e estrutura metálica	Escoramento metálico
3.3.6	Armadura das Lajes	Corte e dobra da ferragem no canteiro	Ferro cortado de fábrica e dobra no canteiro	Ferro cortado e dobrado de fábrica
3.3.7	Concreto da laje	Concreto confeccionado no canteiro da obra e lançado manualmente	Concreto usinado e lançado manualmente	Concreto usinado e bombeado
4	PAREDES E PAINÉIS			
4.1	Alvenaria a cutelo terreo	Tijolo de 6 furos	Tijolo de 8 furos	
4.2	Alvenaria a cutelo superior	Tijolo de 6 furos	Tijolo de 8 furos	

Tabela 4.3 – Relação Atividade X Modo de Produção; Fonte: Empresa pesquisada,

Após a definição dos modos de produção das atividades, a etapa seguinte é o cálculo do Custo Marginal de Aceleração (CMA).

4.3.2 Etapa 2 - Cálculo do Custo Marginal de Aceleração (CMA)

O Custo Marginal de Aceleração (CMA) corresponde à multiplicação do custo total para execução de uma determinada tarefa pela sua duração, representado pela seguinte fórmula:

$$CMA = c_{jk} / t_{jk}$$

Onde:

t_{jk} = duração da atividade j no modo de produção k ;

c_{jk} = custo da atividade j no modo de produção k ;

Para a obra pesquisada foi desenvolvida a Tabela 4.4 que relaciona as atividades com os seus custos marginais de aceleração para cada modo de produção.

Atividade		Normal			Acelerado					
		Modo 1			Modo 2			Modo 3		
		Custo (R\$)	Duração	CMA	Custo	Duração	CMA	Custo	Duração	CMA
1	SERVIÇOS PRELIMINARES									
1.1	Locação	628,84	5,00	125,77						
2	FUNDAÇÃO									
2.1	Cravação de estaca	192400,00	30,00	6413,33	283489,38	20,00	14174,47			
2.2	Escavação c/ arrasamento	784,88	8,00	98,11	1140,97	3,00	380,32			
2.3	Reaterro	429,25	2,00	214,63						
2.4	Forma dos blocos	1515,03	2,00	757,51						
2.5	Lastro dos blocos	596,66	1,00	596,66						
2.6	Ferragem dos blocos	4632,24	3,00	1544,08						
2.7	Concreto dos blocos	5800,62	3,00	1933,54	6181,87	2,00	3090,94	6236,18	1,00	6236,18
2.8	Forma dos pescoços	329,14	2,00	164,57						
2.9	Armadura dos pescoços	1370,10	2,00	685,05						
2.10	Concreto dos pescoços	845,18	1,00	845,18						
2.11	Desforma	78,01	3,00	26,00						

Continuação da Tabela										
Atividade		Normal			Acelerado					
		Modo 1			Modo 2			Modo 3		
		Custo (R\$)	Duração	CMA	Custo	Duração	CMA	Custo	Duração	CMA
3	ESTRUTURA									
3.1	TERREO									
3.1.1	Forma dos pilares	1629,58	2,00	814,79						
3.1.2	Armadura dos pilares	1370,10	2,00	685,05						
3.1.3	Concreto dos pilares	845,18	1,00	845,18						
3.1.4	Forma das vigas	1958,73	7,00	279,82						
3.1.5	Armadura das vigas	3124,41	7,00	446,34	3403,43	4,00	850,86	3561,18	2,00	1780,59
3.1.6	Concreto das vigas	5337,99	3,00	1779,33	5688,84	2,00	2844,42	5738,82	1,00	5738,82
3.1.7	Escoramento de Madeira	6248,53	8,00	781,07	9288,53	7,00	1326,93	9655,47	6,00	1609,24
3.1.8	Forma das lajes	8938,51	8,00	1117,31						
3.1.9	Armadura das Lajes	12773,09	6,00	2128,85	13913,81	4,00	3478,45	14558,70	2,00	7279,35
3.1.10	Concreto da laje	12321,86	4,00	3080,47	13131,74	3,00	4377,25	13247,11	1,00	13247,11
3.1.11	Desforma	529,89	4,00	132,47						
3.1.12	Laje pré fabricada	3222,27	2,00	1611,14						
3.2	SUPERIOR									
3.2.1	Forma dos pilares	1629,58	2,00	814,79						
3.2.2	Armadura dos pilares	1754,31	2,00	877,15						
3.2.3	Concreto dos pilares	1156,56	1,00	1156,56						
3.2.4	Forma das vigas	3226,90	7,00	460,99						
3.2.5	Armadura das vigas	5386,16	7,00	769,45	5867,17	4,00	1466,79	6139,11	2,00	3069,56
3.2.6	Concreto das vigas	4225,91	1,00	4225,91						
3.2.7	Escoramento de Madeira	6248,53	8,00	781,07	9288,53	7,00	1326,93	9655,47	6,00	1609,24
3.2.8	Forma das lajes	8938,51	8,00	1117,31						
3.2.9	Armadura das Lajes	21829,52	8,00	2728,69	23779,03	5,00	4755,81	24881,17	2,00	12440,58
3.2.10	Concreto da laje	12455,31	4,00	3113,83	13273,96	3,00	4424,65	13390,58	1,00	13390,58
3.2.11	Desforma	583,54	4,00	145,88						
3.3	FORRO									
3.3.1	Forma das vigas	4485,39	7,00	640,77						
3.3.2	Armadura das vigas	3936,32	5,00	787,26	4287,85	3,00	1429,28	4486,59	2,00	2243,30
3.3.3	Concreto das vigas	3647,63	1,00	3647,63						
3.3.4	Escoramento de Madeira	6248,53	8,00	781,07	9288,53	7,00	1326,93	9655,47	6,00	1609,24
3.3.5	Forma das lajes	6608,69	8,00	826,09						
3.3.6	Armadura das Lajes	4653,99	6,00	775,66	5069,62	4,00	1267,40	5304,59	2,00	2652,29
3.3.7	Concreto da laje	9119,07	4,00	2279,77	9718,44	3,00	3239,48	9803,82	1,00	9803,82
3.3.8	Desforma	469,29	4,00	117,32						
4	PAREDES E PAINÉIS									
4.1	Alvenaria a cutelo terreo	8949,49	10,00	894,95	9287,72	6,00	1547,95			
4.2	Alvenaria a cutelo superior	8949,49	10,00	894,95	9287,72	6,00	1547,95			
4.3	Elemento vazado tipo 1/ tijolo invertido	2417,37	3,00	805,79						
4.4	Brise	1289,24	2,00	644,62						
5	INSTALAÇÕES ELÉTRICAS E LÓGICA									
5.1	Tubulações laje do terreo	6387,88	2,00	3193,94						
5.2	tubulações laje superior	6387,88	2,00	3193,94						

Continuação da Tabela										
Atividade		Normal			Acelerado					
		Modo 1			Modo 2			Modo 3		
		Custo (R\$)	Duração	CMA	Custo	Duração	CMA	Custo	Duração	CMA
6	INSTALAÇÕES HIDROSSANITÁRIAS									
6.1	Tubulações laje do terreo	2064,51	2,00	1032,25						
6.2	tubulações laje superior	2064,51	2,00	1032,25						
7	DIVERSOS E LIMPEZA									
7.1	Limpeza final	1646,25	5,00	329,25						

Tabela 4.4 – Relação Atividade x CMA; Fonte: Autor, 2012

Com os dados coletados junto à empresa pesquisada e a organização em planilhas no *Software Microsoft Excel®*, passou-se a etapa de solução utilizando a ferramenta *Solver*.

4.3.3 Etapa 3 - Implementação do Modelo proposto no Microsoft Excel

Para aplicação do modelo proposto neste trabalho, foi desenvolvida uma pasta no *Microsoft Excel®* com os campos para entrada dos dados necessários para otimização tempo e custo da obra, respeitando, conforme apresentado no Capítulo 3, os seguintes elementos: a) a função objetivo; b) suas variáveis; c) parâmetros; e d) restrições.

Na função objetivo, foi criada uma célula destino para conter a fórmula proposta no Capítulo 3.

$$\text{Min } Z = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K CMA_{jk} \cdot x_{jk} + M [(I_D + (x_{D1} \cdot t_{D1} + x_{D2} \cdot t_{D2} + x_{D3} \cdot t_{D3}) - 1) - PL]$$

Onde:

$CMA = (c_{jk} / t_{jk})$ = custo marginal de aceleração

t_{jk} = duração da atividade j no modo de produção k ;

c_{jk} = custo da atividade j no modo de produção k ;

$x_{jk} = 0$, se o modo de produção (t_{jk}, c_{jk}) não for escolhido;

1, se o modo de produção (t_{jk}, c_{jk}) for escolhido;

Portanto x_{jk} = variável discreta inteira e binária;

M é a multa estabelecida em contrato para cada dia transpassado à data contratual;

PL = Prazo licitado, ou seja, prazo acordado em contrato com o cliente, até o qual o valor da multa é igual a zero;

I_D = Início da atividade D (última atividade).

Quanto à capacidade da ferramenta *Solver* da *Microsoft Excel*®, há restrição de 100 (cem) linhas e comporta apenas 200 colunas de variáveis, conforme demonstrado no Quadro 1 do Capítulo 2 deste trabalho.

No que tange às células variáveis, foram criados campos no *Microsoft Excel*® para as variáveis binárias das atividades que possuem mais de um modo de produção. Com isso, rodado o *Solver*, quando o modo de produção de uma atividade assumir o valor igual a 0 (zero) significa que aquele modo de produção não foi o escolhido. Caso assuma o valor de 1 (um) representa que o modo de produção foi o escolhido para otimização tempo e custo do projeto.

Outro campo de células variáveis é o de início das atividades que, após a aplicação do modelo proposto neste trabalho, através da ferramenta *Solver*, corresponderá ao tempo de início de cada atividade, sendo a somatória o tempo ótimo do projeto.

A Figura 4.2 mostra o início de cada atividade (I3, I5, I6,..., I63) e suas variáveis binárias (X5,1, X5,2,..., X53,2), após a aplicação do *Solver*.

Atividade	Início	Atividade	Início	Atividade	Início
I3	1	I27	41	I48	78
I5	6	X27,1	1	X48,1	0
X5,1	0	X27,2	0	X48,2	0
X5,2	1	X27,3	0	X48,3	1
I6	16	I28	80	I49	80
X6,1	0	I29	114	X49,1	0
X6,2	1	I31	64	X49,2	0
I7	24	I32	64	X49,3	1
I8	17	I33	66	I50	99
I9	19	I34	59	I52	103
I10	17	I35	54	X52,1	1
I11	20	X35,1	1	X52,2	0
X11,1	0	X35,2	0	I53	107
X11,2	0	X35,3	0	X53,1	0
X11,3	1	I36	63	X53,2	1
I12	21	I37	48	I54	113

Continuação Tabela

Atividade	Início	Atividade	Início	Atividade	Início
I13	21	X37,1	1	I55	113
I14	23	X37,2	0	I57	37
I15	29	X37,3	0	I58	59
I18	45	I38	53	I60	39
I19	45	I39	51	I61	61
I20	47	X39,1	1	I63	116
I21	32	X39,2	0		
I22	32	X39,3	0		
X22,1	1	I40	63		
X22,2	0	X40,1	0		
X22,3	0	X40,2	0		
I23	42	X40,3	1		
X23,1	1	I41	95		
X23,2	0	I43	73		
X23,3	0	I44	78		
I24	26	X44,1	0		
X24,1	1	X44,2	0		
X24,2	0	X44,3	1		
X24,3	0	I45	80		
I25	31	I46	67		
I26	31	X46,1	1		
X26,1	1	X46,2	0		
X26,2	0	X46,3	0		
X26,3	0	I47	72		

Figura 4.2 – Planilha com os Campos das Células Variáveis; Fonte: Autor, 2012.

Em relação aos parâmetros, foram indicados campos para o preenchimento das durações de cada atividade (d1, d2, d3) em relação a cada modo de produção (Xij), quando possuir mais de um modo.

Foi ainda criado um campo para preenchimento da duração licitada (PL), ou seja, o tempo total do projeto licitado – em caso de obra pública – ou desejado – em caso de obra particular – até que o valor da multa seja igual a zero.

Os outros campos são o valor da multa por dia de atraso, nos termos do contrato firmado, e o prazo a pesquisar que é o prazo além do licitado, em que o planejador pretende saber a programação ótima somada ao valor de multa. A Figura 4.3 representa esses campos.

PRAZO LICITADO (PL)

120

MULTA

12434,10

PRAZO A PESQUISAR (>=PL)

120

	d1	d2	d3	ESQ		d1	d2	d3	ESQ		d1	d2	d3	ESQ
I3	5			6	I26	6	4	2	37	X46,1				
I5	30	20		26	X26,1					X46,2				
X5,1					X26,2					X46,3				
X5,2					X26,3					I47	8			80
I6	8	3		19	I27	4	3	1	45	I48	6	4	2	80
X6,1					X27,1					X48,1				
X6,2					X27,2					X48,2				
I7	2			26	X27,3					X48,3				
I8	2			19	I28	8			88	I49	4	3	1	81
I9	1			20	I29	2			116	X49,1				
I10	3			20	I31	2			66	X49,2				
I11	3	2	1	21	I32	2			66	X49,3				
X11,1					I33	1			67	I50	8			107
X11,2					I34	2			61	I52	10	6		113
X11,3					I35	7	4	2	61	X52,1				
I12	2			23	X35,1					X52,2				
I13	2			23	X35,2					I53	10	6		113
I14	1			24	X35,3					X53,1				
I15	3			32	I36	1			64	X53,2				
I18	2			47	I37	8	7	6	56	I54	3			116
I19	2			47	X37,1					I55	3			116
I20	1			48	X37,2					I57	2			39
I21	7			39	X37,3					I58	2			61
I22	7	4	2	39	I38	8			61	I60	2			41
X22,1					I39	8	5	2	59	I61	2			63
X22,2					X39,1					I63	5			121
X22,3					X39,2									
I23	3	2	1	45	X39,3									
X23,1					I40	4	3	1	64					
X23,2					X40,1									
X23,3					X40,2									
I24	8	7	6	34	X40,3									
X24,1					I41	8			103					
X24,2					I43	7			80					
X24,3					I44	5	3	2	80					

	d1	d2	d3	ESQ		d1	d2	d3	ESQ
I25	8			39	X44,1				
					X44,2				
					X44,3				
I45	1			81					
I46	8	7	6	75					

Figura 4.3 – Parâmetros; Fonte: Autor, 2012.

No que diz respeito às restrições apresentadas no capítulo 3, foram criados campos para garantir que fossem cumpridas. Uma visa assegurar que o projeto comece com a atividade inicial, ou seja, que o início da atividade 3 (na aplicação corresponde a coluna R e linha 6 da planilha do *Microsoft Excel*®) seja igual a 1. A Figura 4.4 representa a restrição no *Solver*.



Figura 4.4 – Restrição quanto ao início do projeto; Fonte: Autor, 2012.

A segunda restrição é quanto às atividades e suas predecessoras para garantir a interligação entre as atividades, conforme as fórmulas apresentadas na Tabela 4.5.

Hipótese	Fórmula
Atividade predecessora inicia depois do término da atividade anterior (Início – término)	$I_j + (x_{j1} \cdot t_{j1} + x_{j2} \cdot t_{j2} + x_{j3} \cdot t_{j3}) \leq I_n$
Atividade inicia ao mesmo tempo de sua predecessora, com ou sem uma latência de tempo (início – início)	$(I_n + x \text{ dias}) = I_j$
Término de uma atividade, com ou sem latência de tempo, coincide com o início de seu predecessora (término – início)	$(I_n + t_n - x \text{ dias}) = I_j$
Término da atividade, com ou sem latência de tempo, coincide com o término de seu predecessora (término – término)	$(I_n + t_n - x \text{ dias}) = (I_j + t_j)$
<p>Onde:</p> <p>I_j, I_n = início da atividade j, n.</p> <p>t_j, t_n = duração da atividade j, n.</p> <p>x = Latência, número inteiro.</p>	

Tabela 4.5 – Fórmulas de interligação das atividades do projeto; Fonte: Autor, 2012.

A Figura 4.5 representa os campos para adicionar as restrições quanto à interligação das atividades na ferramenta *Solver* do *Microsoft Excel*®.

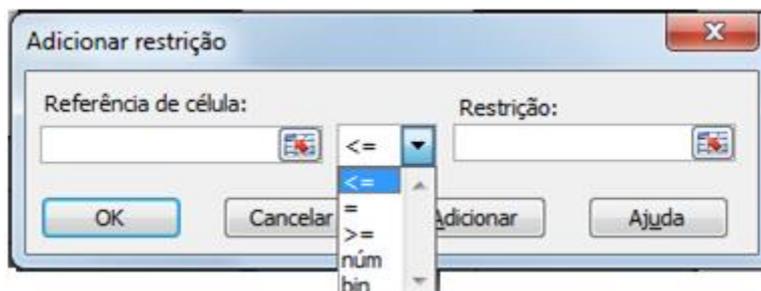


Figura 4.5 – Restrições quanto ao início das atividades; Fonte: Autor, 2012.

A terceira restrição é quanto à escolha de um único modo de produção, ou seja, a somatória das variáveis binárias (x) que tem que ser igual a 1 (um). A Figura 4.6 representa a forma para a adição das restrições do *Solver*.

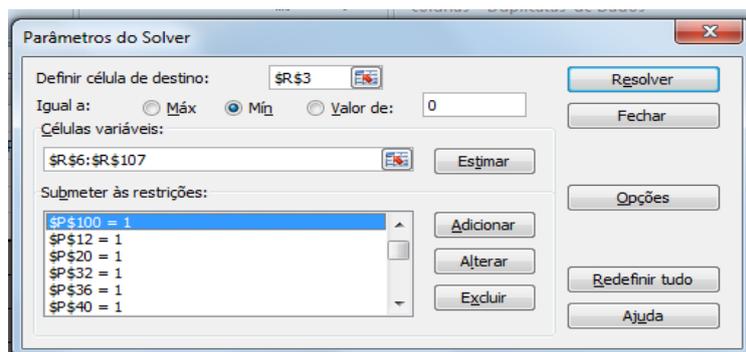


Figura 4.6 – Restrição quanto ao modo de produção; Fonte: Autor, 2012.

A quarta restrição visa garantir que os inícios das atividades sejam números inteiros, conforme a Figura 4.7.

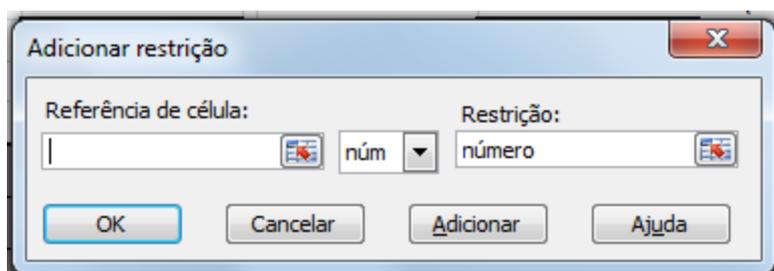


Figura 4.7 – Restrição quanto ao início das atividades iguais a números inteiros; Fonte: Autor, 2012.

4.4 RESULTADOS OBTIDOS

Com a aplicação do modelo proposto no Capítulo 3, utilizando da ferramenta *Solver* do *Microsoft Excel*®, foram obtidos os seguintes resultados para a obra analisada neste trabalho, conforme representado na Tabela 4.6.

A Tabela 4.6 representa os modos de produção escolhidos para a otimização do custo e tempo do projeto, ou seja, os modos que tiveram a variável binária igual a um (1). O projeto tinha duração, segundo planejamento da empresa em questão, 144 dias, porém o prazo licitado para execução era de 120 dias, ocorrendo multa de 10% do valor da obra correspondendo a R\$ 41.447,04 (quarenta e um mil quatrocentos e quarenta e quatro reais e quatro centavos) e mais multa diária de 3% do valor da obra (R\$ 12.434,10).

Atividade		Normal		Acelerado			
		Modo 1	d1	Modo 2	d2	Modo 3	d3
	FUNDAÇÃO						
I5	Cravação de estaca	Mobilização de um bate estaca	30	Mobilização de dois bate estacas	20		
	Variável Binária	0		1			
I6	Escavação c/ arrasamento	Escavação manual	8	Aluguel de Martetele Pneumático	3		
	Variável Binária	0		1			
I11	Concreto dos blocos	Concreto confeccionado no canteiro da obra e lançado manualmente	3	Concreto usinado e lançado manualmente	2	Concreto usinado e bombeado	1
	Variável Binária	0		0		1	
	ESTRUTURA						
	TERREO						
I22	Armadura das vigas	Corte e dobra da ferragem no canteiro	7	Ferro cortado de fábrica e dobra no canteiro	4	Ferro cortado e dobrado de fábrica	2
	Variável Binária	1		0		0	
I23	Concreto das vigas	Concreto confeccionado no canteiro da obra e lançado manualmente	3	Concreto usinado e lançado manualmente	2	Concreto usinado e bombeado	1
	Variável Binária	1		0		0	
I24	Escoramento de Madeira	Escoramento com peças de madeira	8	Escoramento misto com peças de madeira e estrutura metálica	7	Escoramento metálico	6
	Variável Binária	1		0		0	
I26	Armadura das Lajes	Corte e dobra da ferragem no canteiro	6	Ferro cortado de fábrica e dobra no canteiro	4	Ferro cortado e dobrado de fábrica	2
	Variável Binária	1		0		0	
I27	Concreto da laje	Concreto confeccionado no canteiro da obra e lançado manualmente	4	Concreto usinado e lançado manualmente	3	Concreto usinado e bombeado	1
	Variável Binária	1		0		0	
3.2	SUPERIOR						
I35	Armadura das vigas	Corte e dobra da ferragem no canteiro	7	Ferro cortado de fábrica e dobra no canteiro	4	Ferro cortado e dobrado de fábrica	2
	Variável Binária	1		0		0	

Continuação da Tabela							
Atividade		Normal		Acelerado			
		Modo 1	d1	Modo 2	d2	Modo 3	d3
I37	Escoramento de Madeira	Escoramento com peças de madeira	8	Escoramento misto com peças de madeira e estrutura metálica	7	Escoramento metálico	6
Variável Binária		1		0		0	
I39	Armadura das Lajes	Corte e dobra da ferragem no canteiro	8	Ferro cortado de fábrica e dobra no canteiro	5	Ferro cortado e dobrado de fábrica	2
Variável Binária		1		0		0	
I40	Concreto da laje	Concreto confeccionado no canteiro da obra e lançado manualmente	4	Concreto usinado e lançado manualmente	3	Concreto usinado e bombeado	1
Variável Binária		0		0		1	
	FORRO						
I44	Armadura das vigas	Corte e dobra da ferragem no canteiro	5	Ferro cortado de fábrica e dobra no canteiro	3	Ferro cortado e dobrado de fábrica	2
Variável Binária		0		0		1	
I46	Escoramento de Madeira	Escoramento com peças de madeira	8	Escoramento misto com peças de madeira e estrutura metálica	7	Escoramento metálico	6
Variável Binária		1		0		0	
I48	Armadura das Lajes	Corte e dobra da ferragem no canteiro	6	Ferro cortado de fábrica e dobra no canteiro	4	Ferro cortado e dobrado de fábrica	2
Variável Binária		0		0		1	
I49	Concreto da laje	Concreto confeccionado no canteiro da obra e lançado manualmente	4	Concreto usinado e lançado manualmente	3	Concreto usinado e bombeado	1
Variável Binária		0		0		1	
	PAREDES E PAINEIS						
I52	Alvenaria a cutelo terreo	Tijolo de 6 furos	10	Tijolo de 8 furos	6		
Variável Binária		1		0			
I53	Alvenaria a cutelo superior	Tijolo de 6 furos	10	Tijolo de 8 furos	6		
Variável Binária		0		1			

Tabela 4.6 – Resultado da otimização tempo e custo do projeto pesquisado; Fonte: Autor,

2012.

A Tabela 4.7 apresenta a data de início e término do projeto, bem como de cada uma das atividades, após a aplicação do modelo proposto através da ferramenta *Solver*.

Item	Atividade	Data de Início (I _j)	Data de Término
Data de Início do Projeto (I3)		1	
	SERVIÇOS PRELIMINARES		
I3	Locação	1	5
	FUNDAÇÃO		
I5	Mobilização de dois bate estacas (Modo 2)	6	25
I6	Aluguel de Martetele Pneumático (Modo 2)	16	18
I7	Reaterro	24	25
I8	Forma dos blocos	17	18
I9	Lastro dos blocos	19	19
I10	Ferragem dos blocos	19	19
I11	Concreto usinado e bombeado (Modo 3)	17	19
I12	Forma dos pescoços	21	22
I13	Ferragem dos pescoços	21	22
I14	Concreto dos pescoços	23	23
I15	Desforma	29	31
	ESTRUTURA		
	TÉRREO		
I18	Forma dos pilares	45	46
I19	Armadura dos pilares	45	46
I20	Concreto dos pilares	47	47
I21	Forma das vigas	32	38
I22	Armadura das vigas	32	38
I23	Concreto das vigas	42	44
I24	Escoramento em Madeira	26	33
I25	Forma das lajes	31	38
I26	Armadura das Lajes	31	36
I27	Concreto da laje	41	44
I28	Desforma	80	87
I29	Laje pré fabricada (rampa)	114	115
	SUPERIOR		
I31	Forma dos pilares	64	65
I32	Armadura dos pilares	64	65
I33	Concreto dos pilares	66	66
I34	Forma das vigas	59	60

Continuação da Tabela			
Item	Atividade	Data de Início (I_j)	Data de Término
I35	Armadura das vigas	54	60
I36	Concreto das vigas	63	63
I37	Escoramento em Madeira	48	55
I38	Forma das lajes	53	60
I39	Armadura das Lajes	51	58
I40	Concreto usinado e bombeado (Modo 3)	63	63
I41	Desforma	95	102
	FORRO		
I43	Forma das vigas	73	79
I44	Ferro cortado e dobrado de fábrica (Modo 3)	78	79
I45	Concreto das vigas	80	80
I46	Escoramento em Madeira	67	74
I47	Forma das lajes	72	79
I48	Ferro cortado e dobrado de fábrica (Modo 3)	78	79
I49	Concreto usinado e bombeado (Modo 3)	80	80
I50	Desforma	99	106
	PAREDES E PAINEIS		
I52	Alvenaria a cutelo terreo	103	112
I53	Alvenaria Tijolo de 8 furos (Modo 2)	107	112
I54	Elemento vazado tipo 1/ tijolo invertido	113	115
I55	Brise	113	115
	INSTALAÇÕES ELÉTRICAS		
I57	Tubulações laje do terreo	37	38
I58	tubulações laje superior	59	60
	INSTALAÇÕES HIDROSSANITÁRIAS		
I60	Tubulações laje do terreo	39	40
I61	tubulações laje superior	61	62
	DIVERSOS E LIMPEZA		
I63	Limpeza final	116	120
Data de Término do Projeto		120	

Tabela 4.7 – Resultado das datas após a compressão do projeto; Fonte: Autor, 2012.

A Tabela 4.8 demonstra o custo normal do projeto (todas as atividades no modo de produção 1), custo de aceleração do projeto (soma dos custos marginais de aceleração escolhido das atividades vezes a sua duração menos o custo normal do projeto) e o custo de projeto comprimido (soma dos custos marginais escolhidos das atividades vezes suas durações).

Item	Atividade	Custo Normal (M _{ij} = 1)	Custo Aceleração
	SERVIÇOS PRELIMINARES		
I3	Locação	628,84	628,84
	FUNDAÇÃO		
I5	Cravação de estaca	192.400,00	
	Mobilização de dois bate estacas (Modo 2)		283.489,38
I6	Escavação manual c/ arrasamento	784,88	
	Aluguel de Martetele Pneumático (Modo 2)		1.140,97
I7	Reaterro	429,25	429,25
I8	Forma dos blocos	1.515,03	1.515,03
I9	Lastro dos blocos	596,66	596,66
I10	Ferragem dos blocos	4.632,24	4.632,24
I11	Concreto dos blocos	5.800,62	
	Concreto usinado e bombeado (Modo 3)		6.236,18
I12	Forma dos pescoços	329,14	329,14
I13	Ferragem dos pescoços	1.370,10	1.370,10
I14	Concreto dos pescoços	845,18	845,18
I15	Desforma	78,01	78,01
	ESTRUTURA		
	TÉRREO		
I18	Forma dos pilares	1.629,58	1.629,58
I19	Armadura dos pilares	1.370,10	1.370,10
I20	Concreto dos pilares	845,18	845,18
I21	Forma das vigas	1.958,73	1.958,73
I22	Armadura das vigas	3.124,41	3.124,41
I23	Concreto das vigas	5.337,99	5.337,99
I24	Escoramento em Madeira	6.248,53	6.248,53
I25	Forma das lajes	8.938,51	8.938,51
I26	Armadura das Lajes	12.773,09	12.773,09
I27	Concreto da laje	12.321,86	12.321,86
I28	Desforma	529,89	529,89
I29	Laje pré fabricada (rampa)	3.222,27	3.222,27
	SUPERIOR		
I31	Forma dos pilares	1.629,58	1.629,58
I32	Armadura dos pilares	1.754,31	1.754,31
I33	Concreto dos pilares	1.156,56	1.156,56
I34	Forma das vigas	3.226,90	3.226,90
I35	Armadura das vigas	5.386,16	5.386,16
I36	Concreto das vigas	4.225,91	4.225,91

Continuação da Tabela			
Item	Atividade	Data de Início (I_j)	Data de Término
I37	Escoramento em Madeira	6.248,53	6.248,53
I38	Forma das lajes	8.938,51	8.938,51
I39	Armadura das Lajes	21.829,52	21.829,52
I40	Concreto da laje	12.455,31	
	Concreto usinado e bombeado (Modo 3)		13.390,58
I41	Desforma	583,54	583,54
	FORRO		
I43	Forma das vigas	4.485,39	4.485,39
I44	Armadura das vigas	3.936,32	
	Ferro cortado e dobrado de fábrica (Modo 3)		4.486,59
I45	Concreto das vigas	3.647,63	3.647,63
I46	Escoramento em Madeira	6.248,53	6.248,53
I47	Forma das lajes	6.608,69	6.608,69
I48	Armadura das lajes	4.653,99	
	Ferro cortado e dobrado de fábrica (Modo 3)		5.304,59
I49	Concreto usinado e bombeado (Modo 3)	9.119,07	9.803,82
I50	Desforma	469,29	469,29
	PAREDES E PAINEIS		
I52	Alvenaria a cutelo terreo	8.949,49	8.949,49
I53	Alvenaria Tijolo de 6 furos	8.949,49	
	Alvenaria Tijolo de 8 furos (Modo 2)		9.287,72
I54	Elemento vazado tipo 1/ tijolo invertido	2.417,37	2.417,37
I55	Brise	1.289,24	1.289,24
	INSTALAÇÕES ELÉTRICAS		
I57	Tubulações laje do terreo	6.387,88	6.387,88
I58	tubulações laje superior	6.387,88	6.387,88
	INSTALAÇÕES HIDROSSANITÁRIAS		
I60	Tubulações laje do terreo	2.064,51	2.064,51
I61	tubulações laje superior	2.064,51	2.064,51
	DIVERSOS E LIMPEZA		
I63	Limpeza final	1.646,25	1.646,25
A - Custo de Projeto Normal (M_{ij} = 1)		414.470,45	
B - Custo de Projeto Comprimido (CMA_{ij} x d_{ij})			509.510,60
C - Custo de Compressão do Projeto (A – B)		95.040,15	

Tabela 4.8 – Resultado em relação aos custos de compressão; Fonte: Autor, 2012.

Como o tempo de execução do projeto, após a compressão, ficou igual ao tempo licitado, não houve aplicação de multa por atraso. A Tabela 4.9 apresenta um resumo dos custos totais do projeto.

Projeto: Construção do Prédio do ITEC	
Duração do Projeto Normal ($M_{ij} = 1$)	144 dias
Custo de Projeto Normal ($M_{ij} = 1$)	R\$ 414.470,45
Duração do Projeto Comprimido	120 dias
Multa por Atraso	R\$ 0,00
Custo de Compressão + Multa	R\$ 95.040,15
Custo de Projeto Comprimido + Multa	R\$ 509.510,60

Tabela 4.9 – Tabela Resumo do Projeto em estudo; Fonte: Autor, 2012.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

Nesta dissertação foi apresentado um modelo de programação linear para compressão ótima de tempos e custos de projetos de engenharia civil, utilizando como ferramenta computacional o *Solver* do *Microsoft Excel*®, portanto a pesquisa está inserida na área de Planejamento de Projetos da Construção Civil.

O modelo concebido pode ser utilizado por construtoras para obras de qualquer porte, devido à eficiência e à efetividade dos resultados, bem como pela facilidade e simplicidade da execução computacional. O modelo pode ser considerado genérico, uma vez que é passível de aplicação em qualquer tipo de indústria para otimização de seus processos.

O modelo proposto foi aplicado em uma obra pública em que a construtora estava com problema de planejamento, pois seu cronograma encontrava-se com prazo de execução igual a 144 dias, superior ao prazo de contrato que é de 120 dias.

Após a aplicação do modelo proposto, o resultado obtido, em relação à duração do projeto, foi de 120 dias. Com isso, foi atingido o prazo de contrato, evitando com que a empresa fosse multada. Em outras palavras, não seria compensador, do ponto de vista de custos, atrasar o projeto.

No que diz respeito aos custos do projeto, o custo do projeto normal, ou seja, com todas as atividades em seus modos de produção normal é de R\$ 414.470,45 (quatrocentos e quatorze mil quatrocentos e setenta reais e quarenta e cinco centavos). Após a aplicação do modelo proposto, o custo do projeto comprimido ficou em R\$ 509.510,60 (quinhentos e nove mil quinhentos e dez reais e sessenta centavos).

Com isso, pode-se verificar que houve um incremento de R\$ 95.040,15 (Noventa e cinco mil quarenta reais e quinze centavos), ou seja, o custo de compressão do projeto, representando valor menor do que se houvesse incremento de multa por atraso. Esse custo corresponde a utilização de novos modos de produção, como por exemplo, a mobilização de 2 (dois) bate estacas, a utilização de equipamentos como martetele pneumático e de materiais como tijolo de 8 (oito) furos.

Verifica-se que o modelo proposto cumpriu o objetivo deste trabalho de compressão ótima de tempo e custo de projeto de Construção civil, uma vez que indicou a alteração nos

modos de produção para que o prazo desejado fosse alcançado, bem como o custo da compressão, levando em consideração a multa que seria aplicada em caso de atraso.

O modelo proposto também implica em vantagem para os gerenciadores de projeto por evidenciar opções de aplicações de novos modos construtivos, como a alocação da mão de obra nas etapas do projeto e a utilização de ferramentas e equipamentos em algumas atividades, com isso otimizando a duração do projeto.

O modelo foi aplicado com sucesso no projeto de Construção Civil e pode resolver os problemas de planejamento em obras públicas e privadas, de qualquer porte, que estiveram com o prazo de execução superior ao acordado com o cliente, em qualquer etapa da construção em que for necessária compressão.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Ao curso do desenvolvimento dessa pesquisa, surgiram ideias relevantes que não foram abordadas por não serem do objetivo desta dissertação.

Dentre elas, está a utilização do modelo proposto em outra ferramenta computacional que não tenha limitações quanto às restrições e variáveis, o que deixa de limitar o tamanho do projeto, como acontece no caso do *Solver* no *Microsoft Excel*® que tem limitação de 100 restrições e 200 variáveis. Vale ressaltar que o *Microsoft Excel*® foi escolhido por ser o *software* que a grande parte das empresas locais dispõe.

Outra ideia é a utilização de modelo proposto em outras áreas e empreendimentos de Construção Civil, como em hidrelétricas, estradas, saneamento e sistemas de infraestrutura urbana.

Por último, sugere-se o incremento de novas variáveis com reconfiguração do problema, como, por exemplo, a inclusão de bônus ou o custo de antecipação do prazo de conclusão da obra em contrato, o risco em geral – financeiro e econômico –, criação de cenários diferentes, tempos de *Setup* e/ou questões ambientais.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTILL, J.; WOODHEAD, R. W. **CPM aplicado as Construções**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1971

ARENALES, M. N.; ARMENTANO, V. A.; MORABITO, R.; YANASSE, H. H.: **Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro: Campus; Elsevier, 2007.

CODAS, M. M. B. **Gerência de projetos – uma reflexão histórica**. Revista de administração de empresas. Rio de Janeiro: v. 27, n. 1, p. 33-37, jan/mar 1987.

ICHIHARA, J. A. **Um método de solução heurístico para a programação de edifícios dotados de múltiplos pavimentos-tipo**. Tese de Doutorado, UFSC, 1998.

ICHIHARA, J. A. **O problema de programação de projetos com restrições de recursos**. XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Curitiba, 2002.

FERREIRA, A.B.H. **Novo dicionário da língua portuguesa**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 2010.

FERREIRA, P. A. V. **Planejamento e análise de sistemas de produção**. Campinas, 2006. 128 p. Disponível em <http://www.dt.fee.unicamp.br/~valente/capt1_044.pdf> Acesso em: 21 de março de 2011.

FIGUEIREDO, A. M. de; SOUZA, S. R. G de. **Como elaborar projetos, monografias, dissertações e teses: da redação científica à apresentação do texto final**. Rio de Janeiro: Lumen Juris, 2010.

GOLDBARG, M.; LUNA, H. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. Rio de Janeiro: Campus, 2000.

HIRSCHFELD, Henrique. **Planejamento com PERT-CPM e análise do desempenho**. Rio de Janeiro: Atlas, 1969.

LIMA, M. B. da F.; SILVA, L. B. da; GOMES, G. S. R. **Custos e projetos de sistemas na indústria da construção civil**. Revista Gestão Empresarial. Paraná: v. 04, n. 03, p. 50-63, 2008.

LIMMER, C. V. **Planejamento, orçamentação e controle de projetos e obras**. Rio de Janeiro: LTC, 1997.

LISBOA, E.F.A. **Pesquisa Operacional**. Apostila do curso de pesquisa operacional. Rio de Janeiro, 2002.

MODER, J.J.; PHILIPS, C.R. *Project Management with CPM and PERT*. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1970.

NAKASHIMA, P. H. R., **Otimização de processos de produção de petróleo via injeção contínua de gás**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFSC. Florianópolis, 2004.

NOCÊRA, R. J. **Planejamento e controle de obras residenciais com o MS-PROJECT® 2007**. São Paulo: Ed. do autor, 2009.

OLIVEIRA, A. M. K. **Potencial da logística ferroviária para a movimentação de açúcar para exportação no Estado de São Paulo: recomendações de localização para armazéns intermodais concentradores de carga**. Dissertação (Mestrado)- Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2005.

PRADO, D. S. do. **Programação linear**. Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 2010.

PUCCINI, A. de L. **Introdução à Programação Linear**. Rio de Janeiro, Ao Livro Técnico, 1972.

PUCCINI, A. de L.; PIZZOLATO, N. D. **Programação Linear**. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1987.

RODRIGUEZ, L. A. O. **Modelo de tomada de decisão integrando teoria das restrições, programação linear inteira e simulação: estudo de caso numa Indústria Siderúrgica**. Dissertação (Mestrado) –Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. São Paulo, 2009.

SANTOS, M. P. **Pesquisa Operacional**. Apostila -Departamento de Matemática Aplicada Instituto de Matemática e Estatística. Rio de Janeiro: UFRJ, 2003.

SANTOS, M. T. S.; MOCELLIN, J. V. **O projeto da produção e a programação integrados a um sistema de administração da produção voltado para a construção civil.** In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 1999, Rio de Janeiro. Anais do XIX ENEGEP. Rio de Janeiro, 1999.

SISK, T.; *History of Project Management*, 1998. Disponível em <<http://office.microsoft.com/downloads/9798/projhistory.aspx>>. Acessado em 14/03/2011.

APÊNDICE