

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS

OTIMIZAÇÃO DE PROJETOS LINEARES EM CONSTRUÇÃO CIVIL
ATRAVÉS DO MÉTODO ESPAÇO-TEMPO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA

JORGE EDUARDO ZEGADA CLAURE

FLORIANÓPOLIS
SANTA CATARINA - BRASIL
MARÇO - 1986

OTIMIZAÇÃO DE PROJETOS LINEARES EM CONSTRUÇÃO CIVIL ATRAVÉS
DO MÉTODO ESPAÇO-TEMPO

JORGE EDUARDO ZEGADA CLAURE

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA"

ESPECIALIDADE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, E APROVADA EM SUA FORMA
FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



O. 255. 928-9

UFSC-BU

BANCA EXAMINADORA:

PROF. ROBERT WAYNE SAMOHL Ph.D.
COORDENADOR DO CURSO

PROF. RICARDO MIRANDA BARCIA Ph.D.
PRESIDENTE

PROF. ROBERT WAYNE SAMOHL Ph.D.

PROF. ANTONIO SÉRGIO COELHO M.Eng.

PROF. CARLOS ERNANI FRIES M.Eng.

A Oscar y
Maria Teresa
Mis Padres

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Ricardo Miranda Barcia um especial agradecimento pela orientação e apoio que me concedeu na realização deste trabalho.

Aos Professores Antônio Sérgio Coelho e Robert Wayne Samohyl pelos comentários e sugestões.

A UFSC que viabilizou a realização deste trabalho.

A CAPES pelo auxílio financeiro.

A todos colegas, professores e amigos que de forma direta ou indireta auxiliaram na elaboração deste trabalho.

R E S U M O

Este trabalho foi elaborado com o objetivo de dar ao Método de Planejamento e Programação Espaço-Tempo um modelo de programação matemática que permita otimizar tempos e custos de obras de construção civil lineares através do uso de computadores.

Nele estão formuladas todas as considerações matemáticas que, com o uso de Programação Linear Inteira possibilitam a caracterização da totalidade dos projetos lineares que se apresentam na prática.

Com a finalidade de facilitar a implementação computacional do método foi elaborado um programa que gera a partir de dados básicos de projetos as variáveis, restrições e função objetivo no formato compatível com o pacote para solução de programação matemática utilizado.

A título de ilustração das técnicas propostas, são resolvidos dois exemplos de obras de porte médio.

A B S T R A C T

In this work a mathematical programming model which allows to optimize time and costs in construction linear projects is developed.

The integer linear programming approach adopted makes possible to solve all the different scheduling problems which arise in practical uses of the time space method.

A computer program which formats, from project data, constraints and objective functions in a format compatible with a mathematical programming software was developed.

Two different construction problems were used to illustrate the application of the proposed model.

S U M Á R I O

Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	vii
 CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	
1.1 - INTRODUÇÃO	1
1.2 - OBJETIVO E JUSTIFICATIVA	3
1.3 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	4
 CAPÍTULO II - PROGRAMAÇÃO DE OBRAS EM CONSTRUÇÃO CIVIL	
2.1 - INTRODUÇÃO	6
2.2 - PLANEJAMENTO E PROGRAMAÇÃO DE OBRAS EM CONSTRUÇÃO CIVIL	6
2.3 - DIAGRAMA DE BARRAS (GANTT)	8
2.4 - MÉTODOS PERT/CPM	10
2.5 - CUSTOS EM CONSTRUÇÃO CIVIL	14
2.6 - CONCLUSÃO	15
 CAPÍTULO III - MÉTODO DE PLANEJAMENTO E PROGRAMAÇÃO ESPAÇO-TEMPO	
3.1 - INTRODUÇÃO	17
3.2 - MÉTODO DE PLANEJAMENTO E PROGRAMAÇÃO E CONSTRUÇÕES LINEARES	17
3.3 - MÉTODO ESPAÇO-TEMPO	18
3.4 - CONCLUSÕES	25

CAPÍTULO IV - FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA

4.1 - INTRODUÇÃO	26
4.2 - FORMULAÇÃO ORIGINAL	26
4.3 - CONTRIBUIÇÕES À FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	34
4.4 - CONCLUSÃO	39

CAPÍTULO V - EXEMPLOS

5.1 - INTRODUÇÃO	40
5.2 - EXEMPLO 01 - EDIFÍCIO	41
5.3 - EXEMPLO 02 - COLETOR CENTRAL DE ESGOTOS	44
5.4 - CONCLUSÃO	57

CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 - CONCLUSÕES	58
6.2 - RECOMENDAÇÕES E FUTUROS TRABALHOS	59

BIBLIOGRAFIA	60
--------------------	----

APÊNDICES

APÊNDICE 1 - PROGRAMA GERADOR DE VARIÁVEIS, RESTRIÇÕES E FUN- ÇÃO OBJETIVO	63
A.1.1 - FORMATO DE DADOS EXIGIDO PELO PACOTE "LAND & POWELL" ...	64
A.1.2 - MANUAL DO USUÁRIO	68
A.1.2.1 - NOÇÕES GERAIS	68
A.1.2.2 - CARACTERÍSTICAS E LIMITES	68
A.1.2.3 - ENTRADA DE DADOS	69

APÊNDICE 2 - EXEMPLO 2. ENTRADA DE DADOS DO PROGRAMA	74
APÊNDICE 3 - EXEMPLO 2. SAÍDA DE DADOS GERADOS PELO PROGRAMA (ENTRADA DE DADOS DO "LAND AND POWELL".)	76
APÊNDICE 4 - EXEMPLO 2. SAÍDA DE RESULTADOS DO "LAND AND POWELL". SOLUÇÃO OTIMA	93

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.3.1	- EXEMPLO DIAGRAMA DE BARRAS	9
Fig. 2.4.1	- EXEMPLO REDE PERT/CPM	12
Fig. 2.5.1	- GRÁFICO DE CUSTOS	15
Fig. 3.3.1	- TAXAS DE PRODUÇÃO	20
Fig. 3.3.2	- FOLGAS DE TEMPO	21
Fig. 3.3.3a	- ATIVIDADES PROGRAMADAS COM FOLGA DE TEMPO	22
Fig. 3.3.3b	- ATIVIDADES PROGRAMADAS COM FOLGA DE DISTÂNCIA ..	22
Fig. 3.3.4	- DIAGRAMA ESPAÇO-TEMPO	23
Fig. 3.3.5a	- DIAGRAMA DE BARRAS - PROGRAMA DA CONSTRUÇÃO DE UMA ESTRADA	24
Fig. 3.3.5b	- REDE PERT/CPM DA CONSTRUÇÃO DE UMA ESTRADA	25
Fig. 3.3.5c	- DIAGRAMA ESPAÇO-TEMPO DA CONSTRUÇÃO DE UMA ES- TRADA	25
Fig. 4.2.1	- REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE UM PROCESSO CONSTRUTI- VO	27
Fig. 4.2.2	- REPRESENTAÇÃO GRÁFICA NO PLANO S x T DE UM PRO- CESSO CONSTRUTIVO	28
Fig. 5.2.1	- DIAGRAMA ESPAÇO-TEMPO DO EDIFÍCIO DE 14 ANDARES DO EXEMPLO 1. SOLUÇÃO ÓTIMA	47
Fig. 5.3.1	- DIAGRAMA ESPAÇO-TEMPO DO COLETOR CENTRAL DE ES- GOTOS DO EXEMPLO 2. SOLUÇÃO ÓTIMA	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.2.1 - TAXAS DE PRODUÇÃO DISPONÍVEIS PARA EXECUÇÃO DO EXEMPLO 1	41
Tabela 5.2.2 - QUANTIDADES DE TRABALHO NECESSÁRIAS PARA EXECUÇÃO DO EXEMPLO 1	42
Tabela 5.2.3 - TEMPOS DE INÍCIO DOS TRABALHOS DE EXECUÇÃO DAS SEÇÕES DO EXEMPLO 1. SOLUÇÃO ÓTIMA	45
Tabela 5.2.4 - EQUIPES EXECUTORAS DA OBRA DO EXEMPLO 1. SOLUÇÃO ÓTIMA	46
Tabela 5.3.1 - QUANTIDADE DE TRABALHO NECESSÁRIA PARA EXECUÇÃO DO EXEMPLO 2	49
Tabela 5.3.2 - TAXAS DE PRODUÇÃO DISPONÍVEIS E CUSTOS DIRETOS EM UNIDADES MONETÁRIAS PARA A EXECUÇÃO DO EXEMPLO 2	49
Tabela 5.3.3 - CUSTOS DE TROCA DE EQUIPES EM UNIDADES MONETÁRIAS	50
Tabela 5.3.4 - TEMPOS DE INÍCIO DOS TRABALHOS DE EXECUÇÃO DAS SEÇÕES DO EXEMPLO 2. SOLUÇÃO ÓTIMA	53
Tabela 5.3.5 - EQUIPES EXECUTORAS DA OBRA DO EXEMPLO 2. SOLUÇÃO ÓTIMA	54
Tabela 5.3.6 - CUSTOS DE TROCA. SOLUÇÃO ÓTIMA	55

C A P Í T U L O - I

INTRODUÇÃO

1.1 - INTRODUÇÃO

Muitos benefícios foram conseguidos até agora com a utilização de métodos científicos no planejamento, programação e controle de projetos de Engenharia Civil. A organização racional da produção proporciona a redução de tempos e custos na construção, como também aumenta a segurança do andamento das obras.

Dois métodos tem sido amplamente utilizados em construção civil, a saber: o Diagrama de Barras e o PERT/CPM.

O Diagrama de Barras é um excelente método visual e simples de ser entendido, motivos pelos quais é amplamente utilizado. Entretanto, ele possui limitações pelo fato de não conseguir mostrar claramente as seqüências e interdependências entre as atividades que devem ser realizadas para executar as obras, bem como, suas taxas de progresso nas diferentes seções dos projetos.

Os Métodos PERT/CPM, baseados em redes gráficas, utilizam arcos orientados e nós para representar atividades e interdependências conseguindo mostrar claramente a seqüência construtiva lógica da execução da obra. Estes métodos consideram também nivelamento e limitação de recursos otimizando custos. Atualmente existem programas que permitem o tratamento computacional destes problemas. O PERT/CPM também apresenta limitações. Quando trabalha-se em grandes projetos com muitas atividades a sua representação torna-se ininteligível proporcionando pouca informação e difí-

cil acesso a ela (20). Pode-se ainda citar como desvantagem deste método o fato de não mostrar a taxa de progresso para atividades em diferentes seções do projeto e dar maior ênfase na minimização do tempo do que no custo, o que geralmente não ocorre na construção civil (16). A forma básica da estrutura gráfica dos Métodos PERT/CPM representa as atividades do projeto como discretas com a próxima atividade iniciando quando a atual for concluída. Entretanto, em muitos projetos construtivos a seqüência das atividades não é discreta. O progresso das atividades é contínuo, em seqüência, ao longo do eixo no projeto (11). Estes são os chamados projetos lineares, projetos tais quais estradas, edifícios com andares repetitivos, redes coletoras de esgoto e distribuição de água, etc.

Como os métodos anteriormente citados não satisfazem as necessidades de planejamento, programação e controle de projetos lineares, recentemente surgiram novas técnicas orientadas para tais tipos de obras. Técnicas que receberam várias denominações "Linear Scheduling Method", "Time-Space Diagram", "Flow Lines", etc, mas que, basicamente constituem um mesmo método que lembra o "Line of Balance Method" utilizado na indústria fabril, e que nós denominamos Método Espaço-Tempo.

O novo método parte de duas considerações básicas. Primeiro, o planejamento deve permitir a definição de várias equipes, cada uma realizando um tipo de trabalho ao longo do eixo do projeto, para a execução da obra. Segundo, as quantidades de recursos disponíveis devem ser determinadas para minimizar a duração ou o custo do projeto (7).

Apesar do consenso existente quanto a maior adequação do Método Espaço-Tempo com relação às outras técnicas para o

planejamento, programação e controle de projetos lineares (20), praticamente não existem trabalhos que visem seus aspectos computacionais. Foi inclusive afirmado que a maior desvantagem do método é o fato de existir a dificuldade de implementá-lo em computador (20).

1.2 - OBJETIVO E JUSTIFICATIVA

Grande parte dos projetos de Engenharia Civil apresentam características lineares e, por este motivo, não são tratados adequadamente no seu planejamento e programação pelos métodos tradicionais. O Método Espaço-Tempo tem vantagens para construções lineares com relação a estas técnicas tradicionais pelo fato de permitir a programação das atividades em cada uma das seções dos projetos. Além do mais, por que é um método inteligível proporcionando fácil controle do andamento das obras.

Na literatura especializada tem-se apontado como a principal desvantagem do método a dificuldade do uso do computador para seu tratamento. O objetivo deste trabalho consiste em utilizar técnicas de programação matemática que permitam a fácil solução em computador do Método Espaço-Tempo. E também mostrar-se-á a aplicabilidade do método e da técnica proposta para vários tipos de projetos lineares.

Selinger (19) propôs um algoritmo baseado em programação dinâmica para a solução do método. Porém sua formulação é muito restrita, sendo aplicável só a um caso específico (20).

Barcia (2) propôs uma abordagem baseada em controle

ótimo, discretizando o problema e usando Programação Linear Inteira ele chega a uma formulação básica genérica para a solução do problema. Porém esta abordagem deixa de considerar características que se apresentam comumente nas obras bem como certos custos importantes em construção civil.

Neste trabalho se apresentarão formulações de considerações adicionais que superem as deficiências mencionadas. Assim se permitirá que o Método Espaço-Tempo possa ser utilizado para a totalidade dos projetos lineares que se apresentam na prática.

A partir desta formulação mais completa se implementará e operacionalizará o método através de um programa computacional que, a partir de dados básicos, gere as variáveis, restrições e função objetivo necessárias para a solução do problema por Programação Linear Inteira. Dado que os projetos de porte real precisam de grande número de variáveis e restrições. O programa permitirá a seleção pelo usuário de combinações de características construtivas que definam a obra, bem como a escolha entre otimização do tempo e/ou custo do projeto.

1.3 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em seis capítulos.

O presente capítulo apresenta a motivação inicial do estudo, abordando sucintamente o conteúdo da dissertação.

O segundo capítulo introduz os conceitos básicos de planejamento e programação de obras civis, bem como seu desenvolvimento.

histórico e importância. Os métodos mais utilizados até agora são brevemente descritos e analisados sob o ponto de vista da aplicação prática como os custos em construção.

No capítulo três o Método Espaço-Tempo é apresentado e suas vantagens com relação aos métodos tradicionais para o planejamento e programação de construções lineares são discutidas. Os fundamentos e características do método são abordados e analisados com a conclusão de que a sua maior limitação é a dificuldade de tratamento computacional.

No capítulo quatro a formulação matemática que viabiliza a solução do Método Espaço-Tempo, ou seja por programação linear inteira é abordado. Inicialmente a formulação básica proposta por Barcia (2) é considerada. A seguir, complementa-se esta formulação de maneira que o método possa ser utilizado na totalidade dos casos práticos.

No capítulo cinco, a título de exemplos práticos, são considerados dois projetos. O primeiro é um edifício de quatorze andares onde se otimiza o tempo de construção. O segundo projeto é um coletor central de esgotos para o qual se otimiza o custo da obra.

No capítulo seis são apresentadas as conclusões e recomendações.

O manual de utilização do programa desenvolvido que, a partir dos dados básicos do projeto gera as variáveis, restrições e função objetivo é apresentado no Apêndice 1.

C A P Í T U L O - I I

PROGRAMAÇÃO DE OBRAS EM CONSTRUÇÃO CIVIL

2.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo tem por objetivo introduzir alguns conceitos de programação de obras, a sua importância e desenvolvimento histórico. Como foi dito no capítulo anterior, na construção civil, quase que exclusivamente dois métodos são utilizados para a programação de obras, a saber, o Diagrama de Barras e o PERT/CPM. Estes dois métodos serão descritos e analisados brevemente, com considerações a sua aplicação prática.

Finalmente, serão feitas considerações sobre os custos na execução de obras.

2.2 - PLANEJAMENTO E PROGRAMAÇÃO DE OBRAS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

Na construção de obras civis, três são os principais objetivos a atingir: segurança, estética e economia. A segurança foi a primeira preocupação dos construtores desde a antiguidade. Com o decorrer do tempo e com o domínio de algumas técnicas construtivas, a estética das obras começou a ser também uma grande preocupação e, começaram a ser combinadas funções estruturais e estéticas. Nos dias de hoje o fator econômico em qualquer empreendimento tem fundamental importância. É preciso aproveitar racionalmente os recursos existentes.

Apesar do consenso cada vez maior em torno da importância do fator econômico nas construções, tem-se constatado que é mais fácil aceitar máquinas ou técnicas novas do que novos conceitos organizacionais. Ultimamente, tem-se constatado a efetividade dos conceitos organizacionais que não só garantem uma melhor relação custo/rentabilidade como também a viabilidade do empreendimento (14).

O planejamento, a programação e o controle são as três etapas de projetos que determinarão o sucesso econômico do empreendimento. O planejamento envolve um conjunto de decisões que definem os grupos de atividades que comporão a execução da obra. A programação é a ordenação estruturada de atividades e tempos indicando o início e o fim de cada atividade. O cálculo e/ou minimização de tempos e custos é realizado nesta etapa. O controle é a análise do desempenho da execução das obras comparando-o e corrigindo-o de acordo ao plano de programação inicial e/ou mudanças que se façam necessárias.

Os esforços em direção ao planejamento e a programação de obras iniciaram-se por volta de 1918 com a apresentação dos Diagramas de Gantt, hoje um método amplamente utilizado no controle de obras (Diagrama de Barras). Em 1957 Morgan Walquer, um membro da Companhia Dupont de Moure e James Kelley Jr. da Companhia Remington Rand desenvolveram e aplicaram o Método do Caminho Crítico (CPM). Paralelamente a Força Naval dos Estados Unidos em colaboração com construtores civis, desenvolvia um método de programação e controle para a produção do submarino e do míssil atômico "Polaris", que foi denominado "Program Evaluation and Review Tecnique" (PERT) (18).

2.3 - DIAGRAMA DE BARRAS (GANTT)

O Diagrama de Barras ou Diagrama de Gantt era há pouco tempo o único instrumento conhecido para a programação de obras em construção civil e, até agora continua sendo amplamente utilizado.

A utilização desta técnica pode ser descrita da seguinte maneira:

- a) Inicialmente definem-se quais as atividades¹ necessárias para a execução do projeto, estimando-se os tempos de duração de cada uma delas.
- b) Faz-se uma listagem das atividades de forma que cada uma seja representada por uma linha. Estabelece-se uma ordem de execução das atividades. Cada uma representa-se em barras, com os comprimentos em escala representando as durações das atividades. As barras são colocadas ao longo de uma escala de tempos comum para todas as atividades. (Fig. 2.3.1)
- c) Faz-se da escala de tempos uma escala de dias úteis fazendo coincidir esta escala com a data de iniciação dos trabalhos e ajusta-se as posições das barras de maneira que representem o início e o fim de cada atividade. Se a data de finalização no projeto é satisfatória o diagrama

¹ No contexto deste trabalho se denominará atividade os trabalhos que executados no seu conjunto permitirão realização total da obra.

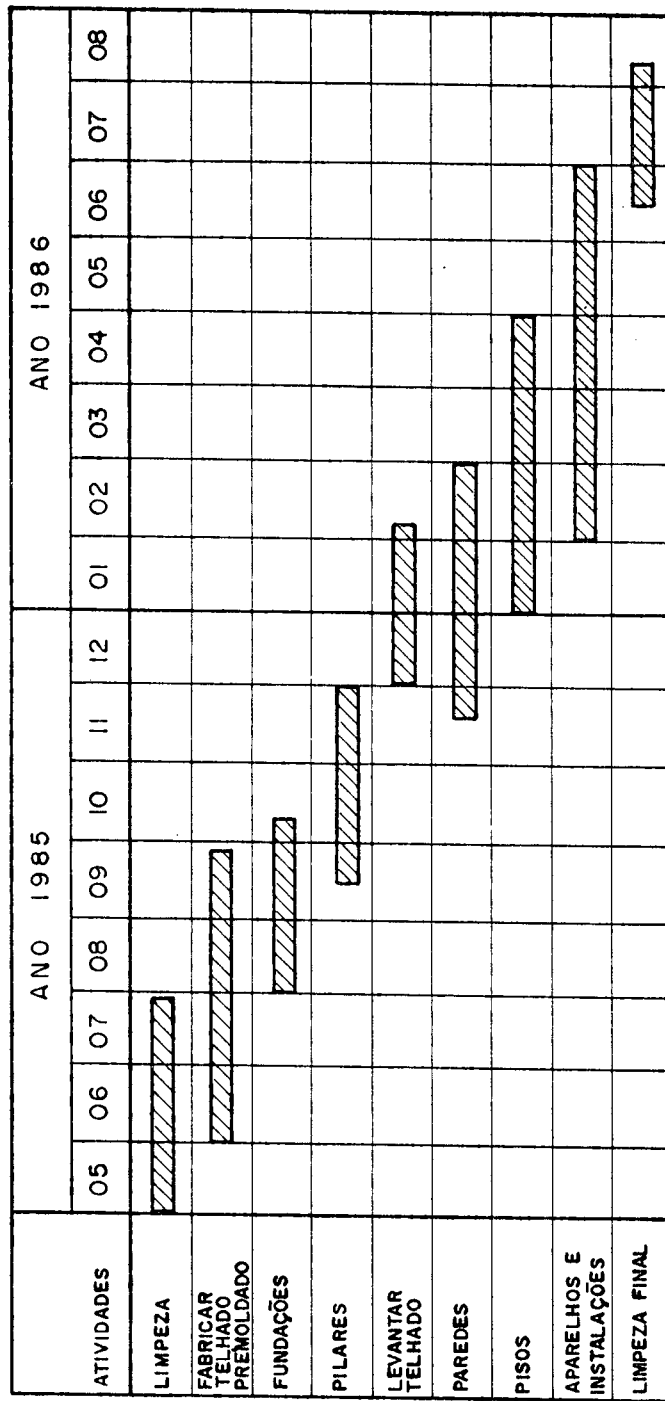


Fig. 2.3.1.1 - EXEMPLO DIAGRAMA DE BARRAS

é aceito. Caso contrário se intensificam os trabalhos de algumas atividades consequentemente reduzindo o comprimento das respectivas barras, e se deslocam barras em direção a data de início do projeto, até obter uma data de finalização da obra compatível com as exigências do projeto (18).

A partir desta estruturação gráfica, variáveis adicionais para melhorar a potencialidade do método podem ser efetuadas (16).

O Diagrama de Barras é um excelente método visual que pode ser diretamente compreendido pelo pessoal da obra. Isto porque é simples e inteligível (14). Como desvantagens, ele não mostra claramente as relações entre as atividades nem o seu seqüenciamento, suas interdependências, bem como, as suas taxas de progresso da execução (20). Não pode ser dito que, por estes motivos, o Diagrama de Barras não tenha utilidade na prática, pois ele é muito utilizado como complemento de outras técnicas mais complexas.

2.4 - MÉTODOS PERT/CPM

A partir de 1960, os métodos PERT/CPM, vem sendo extensivamente aplicados na construção civil (18) constituindo-se até o momento nos métodos mais utilizados, pela sua maior potencialidade na programação de obras.

A seguir se fará uma breve descrição da utilização do método:

- a) Inicialmente determinam-se as atividades componentes da obra, seu número e duração respectivas, podendo-se inclusive considerar, estas durações, como variáveis aleatórias. Neste caso estima-se a duração otimista, a mais provável, e a pessimista e assume-se que as durações são distribuídas de acordo com uma distribuição de probabilidade beta.
- b) Estabelecem-se as seqüências e interdependências tecnológicas e organizacionais entre as atividades.
- c) Faz-se uma representação gráfica contendo as atividades e interdependências através de arcos orientados e nós. Os nós representam as atividades e os arcos as interdependências (ou vice-versa) (Fig. 2.4.1).
- d) Faz-se uma análise de tempos e custos determinando o caminho crítico da rede e as atividades que o constituem. Estas atividades, denominadas críticas, não poderão sofrer atrasos, pois estes influiriam diretamente no tempo final de execução do projeto. As outras atividades (não críticas) podem ser executadas com folgas, isto é, poderão sofrer atrasos sem afetar o tempo final do projeto.

Além do que foi exposto acima, o método permite a análise de utilização e nivelamento de recursos. A redução da duração total do projeto pode ser feita através de uma análise de

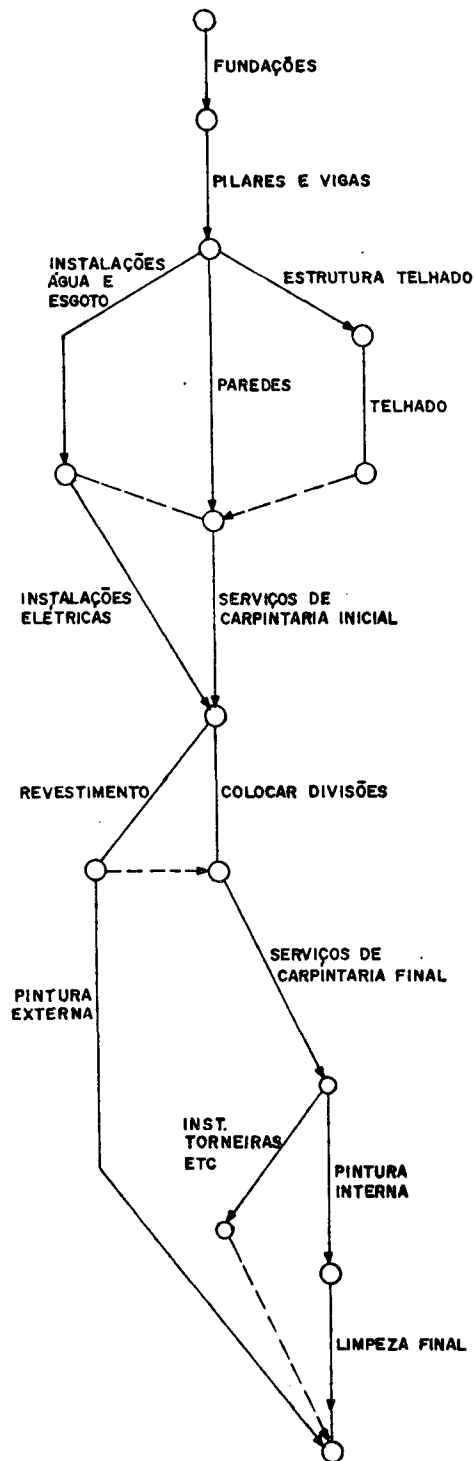


Fig. 2.4.1 - EXEMPLO REDE PERT/CPM

custo a qual indicará quais atividades devem ser aceleradas. A duração ótima do projeto, ou seja, a realização do projeto com um custo mínimo, também pode ser determinada.

Atualmente existem programas computacionais que via bilizam o tratamento destes métodos por este meio.

Os Métodos PERT/CPM são poderosos instrumentos de programação de obras, principalmente para projetos que apresentam duas características básicas: a) O número de atividades é proporcional a complexidade do projeto e b) As atividades apresentam uma clara interdependência, o que define diretamente o caminho de conclusão do projeto (7).

Existem projetos na construção que caracterizam-se por estar compostos por unidades repetitivas que não apresentam estas características básicas exigidas para a utilização prática dos Métodos PERT/CPM (7).

Quando trabalha-se em grandes projetos, a representação dos métodos PERT/CPM torna-se ininteligível proporcionando pouca informação ou difícil acesso a ela por parte dos executores da obra. Existem autores (5) que afirmam que nas duas últimas décadas a indústria de construção tentou utilizar variações do PERT/CPM obtendo resultados insatisfatórios. Isto, principalmente pela incompatibilidade da essência dos processos construtivos com a filosofia dos métodos. Além do mais, se alguns construtores utilizam o PERT/CPM, é somente para satisfazer as exigências do cliente, sendo entretanto os projetos administrados sem o uso desta ferramenta.

2.5 - CUSTOS EM CONSTRUÇÃO CIVIL

Na construção civil se consideram os custos dos produtos como compostos por duas espécies de custos: os custos indiretos e os custos diretos.

Os custos indiretos são aqueles que não tem origem diretamente na execução de uma atividade específica. Além do mais eles estão relacionados com o tempo de execução da obra. Estes custos consistem principalmente nos honorários da inspeção e direção da obra bem como no aluguel de máquinas, equipamentos, instalações e outros que a empresa construtora incorre mesmo que a obra esteja parada. A curva (a) (Fig. 2.5.1) mostra as variações dos custos indiretos com o tempo.

Os custos diretos dependem diretamente da execução de uma atividade e podem-se referir a toda a obra ou a cada atividade em particular. Estes custos caracterizam-se pelo fato de deixarem de existir sempre que a tarefa deixe de ser realizada. O custo direto geralmente cresce com a intensificação nos trabalhos para a realização da atividade, conseqüentemente com a diminuição do tempo de execução da atividade como mostra a curva (b) (Fig. 2.5.1).

O custo total da obra é o resultado da soma dos custos diretos e indiretos ocorridos na obra. Curva (c) (Fig. 2.5.1).

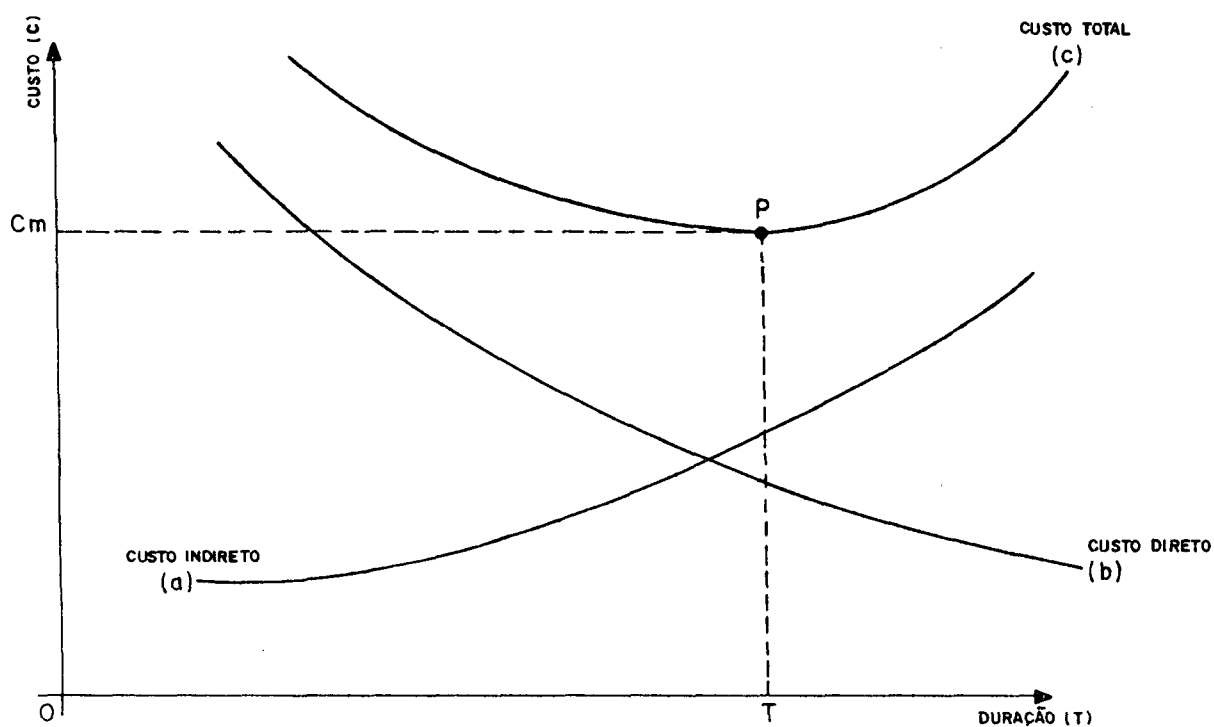


Fig. 2.5.1 - GRÁFICO DE CUSTOS

2.6 - CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentados os dois métodos mais amplamente utilizados no planejamento, programação e controle de obras de construção civil: O Diagrama de Barras e o PERT/CPM.

O Diagrama de Barras é um excelente método visual e simples de ser entendido, Mas, ao não mostrar as interdependências entre as atividades, não é o mais indicado para a efetiva programação de obras.

O PERT/CPM é o mais aprimorado dos métodos tradicionais. Quando trabalha-se projetos com muitas atividades ou com atividades repetitivas torna-se ininteligível perdendo a representatividade do processo construtivo.

No próximo capítulo um outro método que se mostra mais apropriado para certo tipo de projetos, o Método Espaço-Tempo, será apresentado.

C A P Í T U L O - I I I

MÉTODO DE PLANEJAMENTO E PROGRAMAÇÃO ESPAÇO-TEMPO

3.1 - INTRODUÇÃO

No capítulo anterior, o Diagrama de Barras e o PERT/CPM foram apresentados. Este capítulo tem por objetivo apresentar outra técnica em muitos casos mais adequada para a programação de obras com atividades repetitivas. (Ex.: Estradas, redes coletoras, etc): O Método Espaço-Tempo.

3.2 - MÉTODOS DE PLANEJAMENTO E PROGRAMAÇÃO E CONSTRUÇÕES LINEARES

Entende-se por construções lineares aquelas que podem ser executadas por várias equipes, cada uma definida e especializada em um trabalho específico, que sequencialmente realizam atividades repetitivas em cada seção do projeto. As atividades ou tarefas são progressivamente executadas pelo deslocamento das respectivas equipes ao longo do eixo imaginário do projeto. Ex.: Construção de estradas, edifícios com andares repetitivos, redes de distribuição de água, etc.

Como foi mencionado no capítulo anterior, o Diagrama de Barras apesar das suas vantagens não mostra claramente as relações tecnológicas e organizacionais entre as atividades que compõem os projetos (20). Só com a utilização do Diagrama de Barras um projeto não pode ser efetivamente programado e gerenciado. Quando trabalha-se na programação de projetos lineares, a potencialidade dos métodos PERT/CPM é reduzida, pois estes proporcionam

pouca informação do desempenho das equipes que executam as atividades repetitivas ao longo do eixo imaginário do projeto. Em projetos com muitas atividades a rede gráfica torna-se complexa e ininteligível (20). O número de atividades cresce consideravelmente quando intenta-se discretizar tarefas contínuas, desencorajando muitos construtores pelo esforço requerido para desenvolver e trabalhar redes PERT/CPM. As taxas de progresso para as atividades nas diferentes seções do projeto não são mostradas por esses métodos (11).

O fato que os métodos "tradicionais" de planejamento e programação de obras não constituem ferramentas adequadas para projetos lineares, têm levado ao recente surgimento de novas técnicas para dirigir tais atividades (3).

3.3 - MÉTODO ESPAÇO-TEMPO

A origem exata do Método Espaço-Tempo não é clara, mas lembra a filosofia básica da técnica "Line of Balance"(11). Este último método foi desenvolvido pela Força Naval dos Estados Unidos no início dos anos 50. Suas primeiras aplicações foram no controle da produção da indústria manufatureira onde o objetivo é o de programar o fluxo das linhas de produção (11).

Várias adaptações e transformações foram realizadas para aplicar o método às obras de Engenharia Civil. Estas várias adaptações foram denominadas de "Linear Scheduling Method"(11), "Time-Space Scheduling Method"(20), "Flow Lines"(3), etc. Ressalta-se que estes são diferentes nomes dados a um mesmo método que, neste trabalho, denominaremos de Método Espaço-Tempo.

Para o método ser apresentado é necessária a introdução de alguns elementos ou conceitos básicos, ou seja:

- a) Deve-se determinar as seções ou unidades repetitivas nas quais o projeto a ser programado será dividido.
- b) A análise do projeto deve permitir a definição das atividades contínuas que permitirão a total execução da obra bem como as relação as tecnológicas e organizacionais entre as equipes que irão executá-la.
- c) O método é representado graficamente por um diagrama espaço versus tempo, isto é, por um sistema de eixos cartesianos no qual a abscissa mostra os tempos e ordenada o espaço. Os pontos representados neste sistema cartesiano medem a taxa de progresso no tempo das equipes executoras do trabalho. A programação deve ser feita em unidades de tempo adequadas. Usam-se dias, semanas ou meses dependendo da duração do projeto e do nível de detalhamento exigido. A programação no tempo pode ainda ser feita baseando-se em calendário considerando feriados e fins de semana. O espaço pode ser medido de várias formas. Em edifícios, a forma mais apropriada seria considerar o eixo das distâncias perpendicular aos andares. Em outros tipos de projetos pode-se medir por unidades construtivas (ex.: Conjuntos residenciais). Em estradas, redes coletoras e redes de

distribuição de água, o eixo das distâncias acompanha o traçado do projeto.

- d) Definem-se equipes especializadas de trabalho executoras das atividades contínuas, estimando-se várias taxas de produção para as equipes disponíveis como função dos tipos de atividades, equipamentos, características, condições de trabalho, etc. A taxa de produção de uma determinada atividade r_i é utilizada para plotar o progresso desde sua localização s_1 , no tempo t_1 até sua localização final s_2 no tempo t_2 . As diversas capacidades de produção são indicadas diretamente pelas tangentes do ângulo que mede a inclinação das linhas plotadas (Fig. 3.3.1).

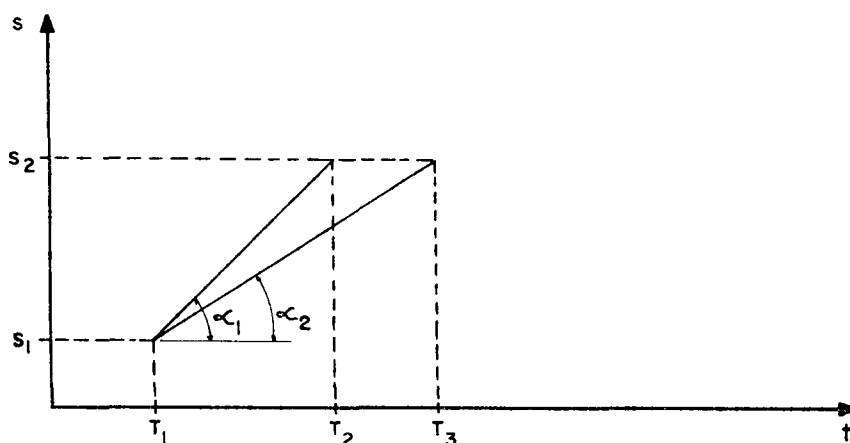


Fig. 3.3.1 - TAXAS DE PRODUÇÃO - A inclinação das linhas representa a capacidade produtiva das equipes. A capacidade α_1 é maior que α_2 pois permite executar a mesma seção (s_2) em tempo menor (t_2).

e) As taxas de produção numa mesma atividade podem variar dependendo das características do projeto. Na figura 3.3.2 a taxa de produção para a atividade i da seção 1, r_1^i , é menor que a da segunda seção r_2^i . O progresso das atividades pode ser interrompido intencionalmente criando-se folgas de tempo entre o início dos trabalhos de uma equipe em determinada seção e a finalização dos mesmos na seção anterior. Isto serve para caracterizar, por exemplo, manutenção de equipamentos, cura de concreto, etc. Na figura 3.3.2, ET_1 e ET_2 mostram graficamente esta ocorrência (11).

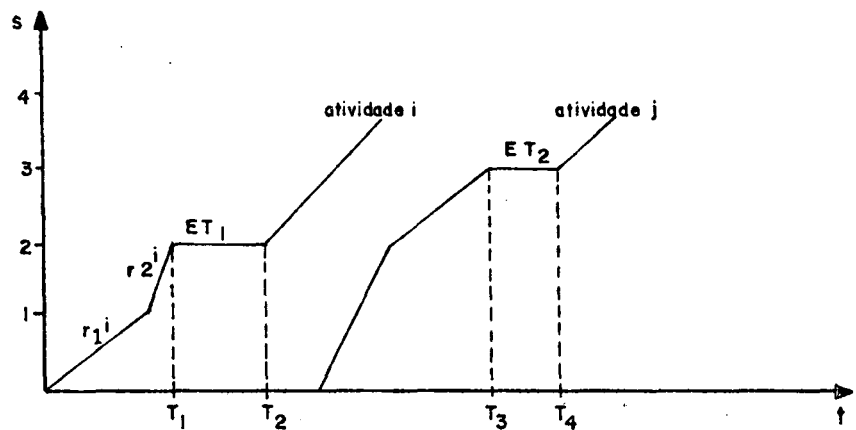
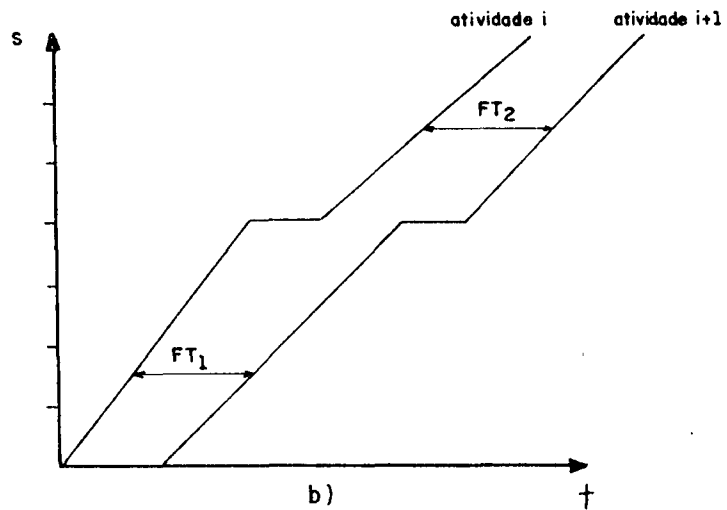


Fig. 3.3.2 - FOLGAS DE TEMPO

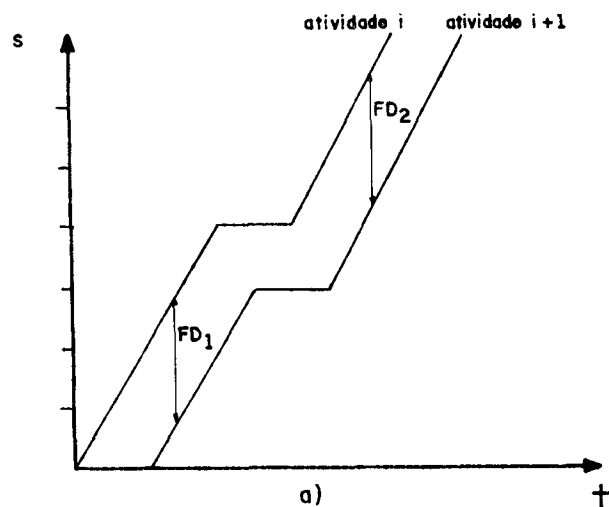
f) Folgas de tempo e/ou distância também podem ser definidas segundo as características tecnológicas e organizacionais de projeto, determinando ou regulando distâncias ou intervalos de tempo que deverão separar duas equipes consecutivas.

numa mesma seção. Na figura 3.3.3a FT_1 e FT_2 representam folgas de tempo entre as atividades i e $i+1$ e na figura 3.3.3b FD_1 e FD_2 folgas de distância (11).



FT_1 = folga de tempo entre atividades consecutivas.

Fig. 3.3.3a - ATIVIDADES PROGRAMADAS COM FOLGAS DE TEMPO(11)



FD_1 = folga de distância entre atividades consecutivas.

Fig. 3.3.3b - ATIVIDADES PROGRAMADAS COM FOLGAS DE DISTÂNCIA (11).

h) Linhas representando o desempenho das equipes em cada seção devem ser plotadas no sistema de eixos, fazendo um balanceamento de todo o processo de produção. Este balanceamento indicará a otimização do tempo ou custo da execução da obra através da escolha adequada de tempo e equipes executoras para cada atividade e seção de projeto (Fig. 3.3.4).

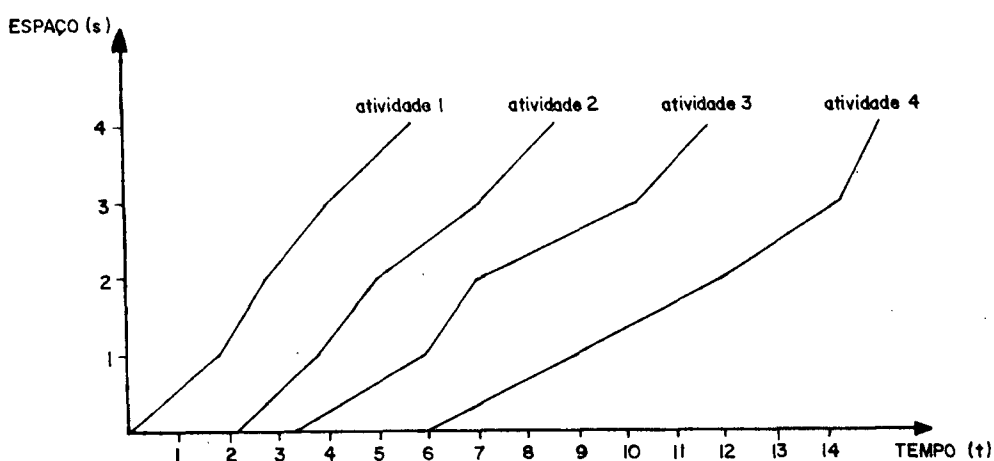


Fig. 3.3.4 - DIAGRAMA ESPAÇO-TEMPO

As vantagens do Método Espaço-Tempo são claras. Ele é simples e altamente inteligível, mostrando visualmente o andamento da obra para cada seção de projeto, bem como as interrelações entre as diferentes atividades. Ele proporciona mais informação sobre a obra do que o Diagrama de Barras (mostra interdependências). Para projetos lineares oferece mais vantagens que o PERT/CPM, principalmente sob o aspecto da visualização (16).

Os Métodos PERT/CPM são ferramentas mais poderosas em projetos com atividades discretas. Porém em atividades contínuas

o Método Espaço-Tempo é mais efetivo pois permite visualizar o processo de execução do projeto (11).

As figuras 3.3.5 representam graficamente as programações de um projeto linear simples através do Diagrama de Barras, do PERT/CPM e do Método Espaço-Tempo para construção de uma estrada. Destas representações podem-se observar claramente as vantagens representativas do método no que se refere a projetos lineares.

A maior desvantagem citada na literatura especializada para o método é a dificuldade de viabilizar seu tratamento em computadores. Selinger (19) fez o primeiro esforço para solucionar este problema propondo um modelo matemático que utiliza programação dinâmica. Porém sua formulação é muito restrita, sendo aplicável só a um caso específico.

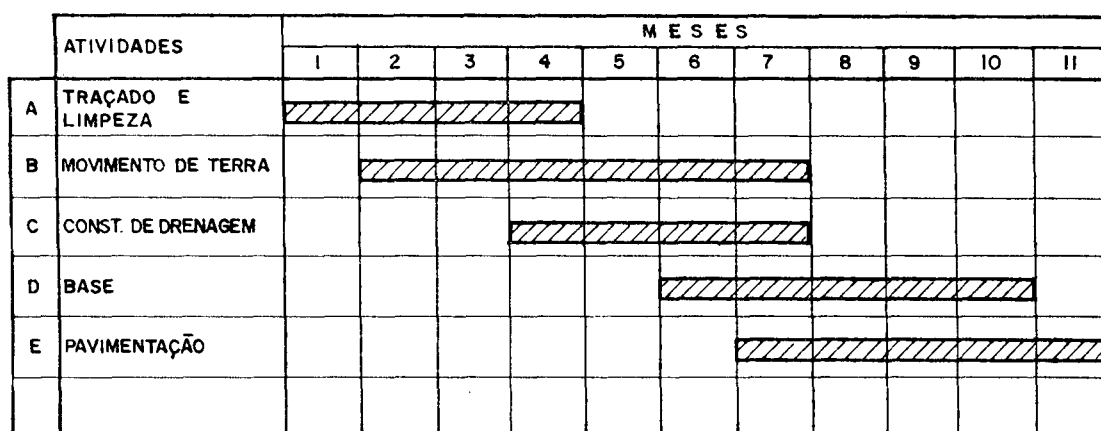


Fig. 3.3.5a - DIAGRAMA DE BARRAS-PROGRAMA DA CONSTRUÇÃO DE UMA ESTRADA

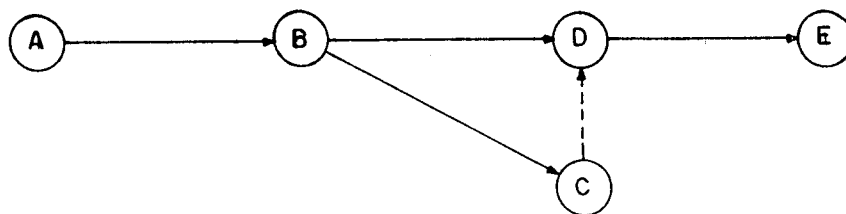


Fig. 3.3.5b - REDE PERT/CPM DA CONSTRUÇÃO DE UMA ESTRADA

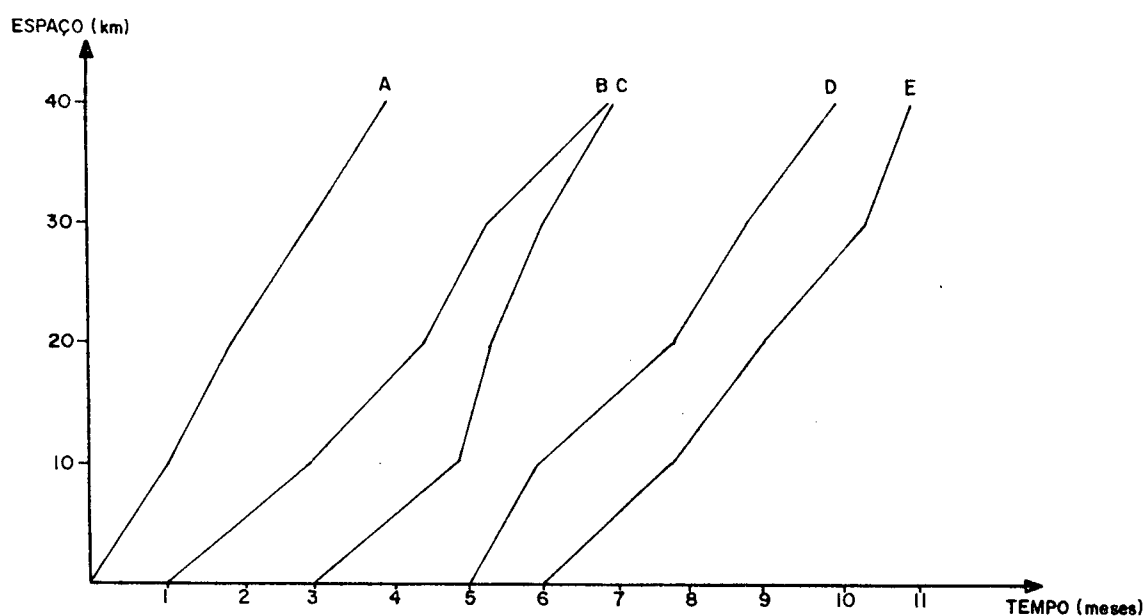


Fig. 3.3.5c - DIAGRAMA ESPAÇO-TEMPO DA CONSTRUÇÃO DE UMA ESTRADA

3.4 - CONCLUSÕES

O Método de Planejamento e Programação Espaço-Tempo tem vantagens com relação às técnicas tradicionais para o tratamento de obras civis que possuem atividades contínuas ou repetitivas. Isto porque, ele permite a programação de atividades em cada uma das seções dos projetos e além do mais é um método altamente inteligível proporcionando um fácil controle da execução de obras.

C A P Í T U L O - I V

FORMAULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA

4.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo tem por objetivo apresentar a abordagem que permite o tratamento computacional do Método Espaço-Tempo.

Inicialmente (na seção 4.2) mostra-se a formulação básica original proposta por Barcia que permite o tratamento matemático do problema. Na seção seguinte propõem-se considerações adicionais e complementares que tem por objetivo consolidar e ampliar a aplicabilidade do sistema.

4.2 - FORMULAÇÃO ORIGINAL

Barcia visualizou os processos construtivos como sistemas dinâmicos que evoluem com o tempo, evolução esta passível de modificações. Esta abordagem pode ser caracterizada graficamente plotando num sistema de eixos cartesianos, tempo (t), espaço (s) e produção acumulada (p), uma curva que representa o comportamento destas variáveis durante o desenvolvimento do processo construtivo (Fig.4.2.1). Esta curva plotada no espaço pode ser projetada no plano espaço-tempo incorporando em cada unidade de distância uma quantidade de trabalho. Isto pode ser feito pelo fato de que a quantidade de trabalho pode ser associada com a distância. Mas especificamente, dada uma distância pode-se determinar a quantidade necessária de trabalho que as equipes devem realizar até atingir

aquela distância (Fig. 4.2.2). Observe que existe a consideração de que o movimento da(s) equipe(s) de trabalho é numa só direção (a partir da origem). Então considera-se de que os elementos que afetam o tempo para atingir cada distância são as taxas de produção e as quantidades de trabalho requeridas ao longo do eixo s .

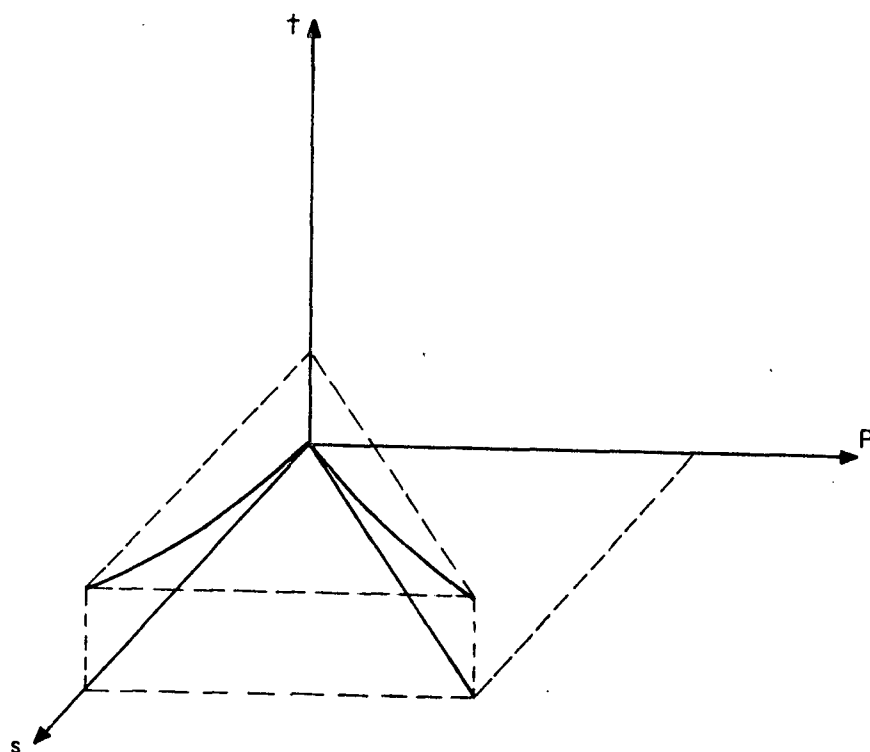


Fig. 4.2.1 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO PROCESSO CONSTRUTIVO.

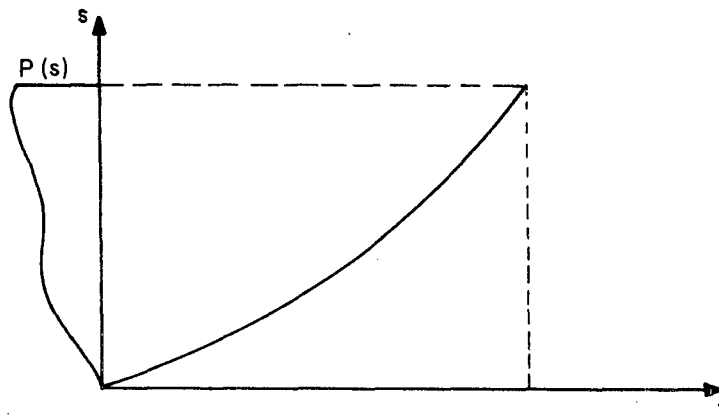


Fig. 4.2.2 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA NO PLANO $s \times t$
DE UM PROCESSO CONSTRUTIVO.

Com base na teoria do Controle Ótimo, Barcia formulou o problema com o objetivo de otimizar os recursos a serem utilizados no processo construtivo. Fazendo-se, por exemplo:

$$\text{Min} \int_{s_2}^{s_1} (C_I t(s) + C_D r(s)) ds \quad (4.1)$$

Sujeito a:

$$\frac{dt(s)}{ds} = w(s) r(s) \quad (4.2)$$

$$t(s_1) = 0 \quad (4.3)$$

$$T_{\min}(s) \leq t(s) \leq T_{\max}(s) \quad (4.4)$$

onde: s_1, s_2 representam as distâncias de início e do fim do projeto,

$t(s)$ é o tempo necessário para se atingir a distância s ;

$w(s)$ é a quantidade de trabalho a ser executada na distância s ;

$r(s)$ é a taxa de produção na distância s ;

C_I são os custos indiretos do projeto;

C_D são os custos diretos;

$t(s_1)$ é o tempo de início dos trabalhos;

$t(s_2)$ é o tempo de finalização dos trabalhos e;

$T_{\min}(s)$ e $T_{\max}(s)$ são os limites impostos ao início e ao fim da execução dos trabalhos na distância s .

A equação (4.2) é o que se chama de dinâmica do processo. Ela descreve como varia o tempo necessário a execução dos serviços com a quantidade de trabalho e taxa de produção.

A condição de que os trabalhos iniciem-se (por exemplo) no tempo 0, é dada pela equação (4.3).

A equação (4.4) estabelece restrições relacionadas com o tempo de execução (por exemplo normas construtivas que devem ser obedecidas).

Pelo fato de que os processos construtivos envolvem quantidades discretas, estes sistemas de produção são representados mais fielmente usando-se uma versão discreta do modelo acima. Fazendo-se esta discretização na variável distância obtém-se um problema de programação matemática. Para uma equipe, o problema poderá ser:

$$\text{minimizar } \sum_{k=1}^n (C_I t_N + C_D r_k) \quad (4.5)$$

Sujeito a:

$$t_{k+1} - t_k = W_k r_k$$

$$t_0 = 0$$

A partir desta formulação pode-se definir:

$$t_{k+1}^i = t_k^i + W_k^i r_k^i \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (4.6)$$

onde t_k^i representa o tempo de início dos trabalhos da equipe i na seção k , w_k^i é a quantidade de trabalho necessário para a execução de toda a seção k , a variável r_k^i é a taxa de produção a ser escolhida para a equipe i na seção k e N é o número de seções no qual o projeto será dividido.

Para alguns projetos pode ser necessário generalizar-se a equação (4.6) adicionando-se um elemento s_k^i que representa a folga de tempo entre o fim dos trabalhos na seção k e o início dos trabalhos na seção $k+1$, numa determinada atividade i , ou seja:

$$t_{k+1}^i = t_k^i + w_k^i r_k^i + S_k^i \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (4.7)$$

Para um projeto genérico poder-se-ia representar a dinâmica de todas as equipes, fazendo-se:

$$t_{k+1}^1 = t_k^1 + w_k^1 r_k + S_k \quad k = 1, 2, \dots, N$$

O início das atividades das equipes na primeira seção do projeto deve ser sequenciada com:

$$t_1^j \geq t_1^i, \quad j = i+1 \quad i = 1, 2, \dots; n-1 \quad (4.11)$$

Em alguns tipos de projetos é necessária a utilização de folgas de tempos entre as equipes de trabalho.

Estas folgas podem ser consideradas fazendo-se:

$$\begin{aligned} t_k^j - t_k^i &\geq b_k^{ij} & i = 1, 2, \dots, n-1 \\ i = j+1 & & k = 1, 2, \dots, N, \end{aligned} \quad (4.12)$$

onde b_k^{ij} é o tempo de folga mínimo requerido entre as equipes i e j para a seção k .

Os tamanhos das equipes (compostas por diferentes configurações homem-equipamentos) que realizarão os trabalhos deverão ser escolhidas dentre as diferentes disponíveis para cada tipo de atividade, a fim de otimizar o consumo de recursos. Para tal, as taxas de produção das equipes são restringidas entre os seus valores limite fazendo-se:

$$r_{\min}^i \leq r_k^i \leq r_{\max}^i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.13)$$

onde r_k^i é a taxa de produção da equipe i que pode assumir valores no intervalo $[r_{\max}^i, r_{\min}^i]$, cujos limites são respectivamente as taxas de produção máximas e mínimas.

Certos projetos podem exigir (por razões econômicas, tecnológicas, etc) que a capacidade de produção de cada

equipe seja modificada em algumas seções. Neste caso pode-se definir a equação a seguir:

$$t_{k+1}^i = t_k^i + W_k^i r_k^i + W_k^i e_k^i \quad i= 1, 2, \dots, n$$

$$k= 1, 2, \dots, N \quad (4.14)$$

onde e_k^i a troca de capacidade de produção da equipe i na seção k . Definindo como ℓ_i o número de equipes (com diferentes taxas de produção) disponíveis para a atividade i . Com o objetivo de efetuar a escolha de uma só equipe para cada atividade em cada seção tem-se as equações a seguir:

$$\delta_1^i r_k^i + \delta_2^i r_k^{i2} + \dots + \delta_{\ell_i}^i r_k^{i\ell_i} = r_k^i \quad k= 1, 2, \dots, N$$

$$\delta_1^i + \delta_2^i + \dots + \delta_{\ell_i}^i = 1 \quad i= 1, 2, \dots, n \quad (4.15)$$

onde:

$$\delta_j^i = 0 \text{ ou } 1, \forall i, j.$$

Observe que a formulação acima (4.15) faz do sistema um problema de Programação Linear Inteira.

Barcia propôs duas funções objetivo para solucionar o problema, a primeira otimiza o tempo de execução. A outra otimiza o custo da obra. Estas funções objetivo são respectivamente:

$$\text{Min } (P_N t_N^n + \sum_{i=1}^n r_i) \quad (4.16)$$

ou

$$\text{Min } (C_I t_N^n + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{\ell_i} C_{Dj}^i \delta_j^i) \quad (4.17)$$

onde P_N é uma penalidade para dar prioridade à otimização do tempo à das taxas de produção e C_{Dj}^i é o custo de execução (direto) da atividade i pela equipe j .

4.3 - CONTRIBUIÇÕES À FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

A formulação de Barcia exposta no item anterior, não considera alguns aspectos que se apresentam comumente nas obras de construção civil. Acrescente-se que ela também deixa de considerar a ocorrência de certos custos que podem se tornar determinantes na programação das obras. A seguir se formularão algumas considerações sobre estes problemas com a finalidade de ampliar e consolidar a aplicabilidade computacional do Método de Programação Espaço-Tempo.

Existem alguns tipos de obras, nas quais se apresentam equipes que devem-se deslocar ao longo do eixo das distâncias, em sentido contrário à orientação natural das outras equipes. Nos edifícios altos, por exemplo, as equipes de pintura exterior se deslocam no seu trabalho de cima para baixo em sentido contrário as outras equipes que trabalham de baixo para cima. Neste caso as equações de programação do tempo destes equipes devem ser:

$$t_{k-1}^j = t_k^j + (-w_k^j)(-r_k^j) \quad k = N, N-1, \dots, 1 \quad (4.18)$$

e

$$t_k^j \geq t_N^i$$

nas quais j é a equipe que deverá se deslocar em sentido contrário as demais. Observe que a equipe i é a que determinará o início do

trabalho da equipe j na seção N . As considerações das quantidades de trabalho e taxas de produção negativas devem ser entendidas em termos de programação matemática já que fisicamente carecem de sentido.

Muitas vezes precisa-se otimizar o custo da obra, considerando a possibilidade de troca do tamanho das equipes (isto é, taxas de produção). Barcia não considerou os custos decorrentes de trocas de equipes, por exemplo, transporte de homens e equipamentos, alteração de rotinas de trabalho, etc. Estes custos podem tornar-se determinantes na escolha da troca ou não de equipes, fato que torna sua consideração imprescindível. Para resolver este problema, duas formulações envolvendo duas técnicas diferentes são propostas neste item. Estas duas soluções alternativas tem características diferentes apresentando maiores ou menores vantagens na implantação computacional, pois elas se diferenciam na sua maior ou menor geração de variáveis e restrições.

A primeira solução está baseada numa técnica proposta por Vanelli (21) para solucionar problemas de Programação Quadrática (0-1). Suponha que se esteja analisando a troca de equipes da seção k para a seção $k+1$ para determinada atividade.

Sejam $P = 1, 2, \dots, l_i$ as equipes disponíveis para a execução da seção k .

$q = 1, 2, \dots, l_i$ as equipes disponíveis para a execução da seção $k+1$. Faça:

$$A_{kp}^i \delta_{kp}^i \geq Z_{kp}^i,$$

$$\sum_{q=1}^{\ell_i} a_{kp}^{ip} \delta_{k+1}^{iq} \geq z_{kp}^i, \quad (4.19)$$

$$\sum_{q=1}^{\ell_i} a_{kq}^{ip} \delta_{k+1}^{iq} - A_{kp}^i (1 - \delta_{kp}^i) \leq z_{kp}^i$$

onde

$$A_{kp}^i = \sum_{q=1}^{\ell_i} a_{kq}^{ip}$$

e

$$p = 1, 2, \dots, \ell_i$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$$k = 1, 2, \dots, N-1.$$

Nestas restrições a_{kq}^{ip} representa custo de troca da equipe p pela equipe q entre a seção k e a seção $k+1$ na atividade i . z_{kp}^i é a variável que assumirá o valor dos custos decorrentes da troca escolhida pelo sistema através das variáveis $\delta_k^{i\ell}$ já consideradas em formulação anterior (4.15). Sendo o objetivo minimizar os custos da obra, na função objetivo deverá ser incluído o termo a seguir:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{p=1}^{\ell_i} z_{kp}^i \quad (4.20)$$

A utilização desta técnica gera $\sum_{i=1}^n \ell_i (N-1)$ variáveis reais e $\sum_{i=1}^n (\ell_i)^2 (N-1)$ restrições a serem adicionadas as já existentes no problema sem trocas de equipe.

A segunda formulação proposta para chegar a solução do problema se baseia na utilização das propriedades dos números binários e números inteiros (0-1). Esta solução consiste em atribuir

um número com base dois a cada $\delta_k^{i\ell_i}$ e a partir das domas das combinações possíveis identificar qualquer troca de equipe efetuada juntamente com o custo desta troca.

$$\begin{aligned}
 & 2^0 \delta_k^{i1} + 2^1 \delta_k^{i2} + \dots + 2^{\ell_i-1} \delta_{k+1}^{i\ell_i} + 2^{\ell_i} \delta_{k+1}^{i1} + 2^{\ell_i+1} \delta_{k+1}^{i2} + \dots \\
 & + 2^{2\ell_i-1} \delta_{k+1}^{i\ell_i} = (2^0 + 2^{\ell_i}) \gamma_k^{i1} + (2^0 + 2^{\ell_i+1}) \gamma_k^{i2} + \dots + (2^0 + 2^{2\ell_i-1}) \gamma_k^{i\ell_i} + \\
 & + (2^1 + 2^{\ell_i}) \gamma_k^{i\ell_i+1} + \dots + (2^1 + 2^{2\ell_i-1}) \gamma_k^{i2\ell_i} + \dots + (2^{\ell_i-1} + 2^{\ell_i}) \gamma_k^{i\ell_i^2 - \ell_i} + \\
 & \dots + (2^{\ell_i-1} + 2^{2\ell_i-1}) \gamma_k^{i\ell_i^2} \tag{4.21}
 \end{aligned}$$

onde

$$\gamma_k^{i1} + \gamma_k^{i2} + \dots + \gamma_k^{i\ell_i^2} = 1$$

e

$$\gamma_k^{iu} = 0 \text{ ou } 1, \forall i, k, u$$

$$k = 1, 2, \dots, N-1, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad \text{e} \quad u = 1, 2, \dots, \ell_i^2.$$

Os valores encontrados para γ_k^{iu} (0-1) determinarão qual foi a troca ótima escolhida. Como deve-se minimizar todos os custos da obra inclui-se na função objetivo o termo:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{u=1}^{\ell_i^2} C_k^{iu} \gamma_k^{iu} \tag{4.22}$$

onde C_k^{iu} é o custo de troca das equipes.

São geradas por esta técnica $2(N-1)n$ restrições e $\sum_{i=1}^n \ell_i^2 (N-1)$ variáveis inteiras a mais do que o problema sem trocas de equipe.

Como pode ser observado, a primeira solução proposta gera mais restrições que a segunda. Por outro lado ela gera menos variáveis e só variáveis reais. Já a segunda gera variáveis inteiras (0-1).

Na otimização do tempo e/ou custo no Método de Programação Espaço-Tempo, pode ser necessário que se tenha a flexibilidade de permitir a geração automática de folgas de tempo entre o início dos trabalhos de uma seção e a finalização dos mesmos na seção anterior. Estas folgas podem significar equipes paradas durante intervalos de tempo. Isto acarretaria custo adicional a ser considerado. Neste caso, todas as equações do tipo:

$$t_{k+1}^i = t_k^i + r_k^i w_k^i \quad (4.23)$$

deve ser adicionada uma variável V_k^i e, incorporar na função objetivo o termo:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^N \sum_{u=1}^{\ell_i} C_{Pk}^{iu} V_k^i \delta_k^{iu} \quad (4.24)$$

onde C_{Pk}^{iu} é o custo da equipe u na seção k da atividade i quando não está trabalhando e V_k^i representa as folgas em questão.

4.4 - CONCLUSÃO

Neste capítulo foram desenvolvidas formulações que permitem a consideração de diversas características construtivas que aparecem numa variedade de situações práticas. Estas formulações resolvem os aspectos computacionais relacionados com o Método Espaço-Tempo.

C A P Í T U L O - V

EXEMPLOS

5.1 - INTRODUÇÃO

No capítulo anterior, foram formuladas matematicamente uma série de considerações que viabilizam a solução do Método de Programação de Obras Espaço-Tempo utilizando técnicas de programação matemática.

Neste capítulo, com o objetivo de mostrar na prática a viabilidade da solução proposta, são considerados, processados e solucionados dois projetos.

Inicialmente, é estudado o projeto de um edifício de quatorze andares. O objetivo da programação deste projeto é minimizar o tempo de execução da obra. O segundo exemplo, tem por objetivo, minimizar o custo de execução da obra de um coletor central de esgotos.

Como foi dito no capítulo anterior, a programação de uma obra através do Método Espaço-Tempo é formulada como um problema de Programação Linear Inteira. Para a solução deste problema deve ser utilizado um pacote computacional especializado no tratamento de problemas de programação matemática deste tipo.

Considerando o grande número de restrições e variáveis necessárias às formulações propostas, criou-se um programa computacional (apêndice 1) que gera, a partir de dados do projeto, as várias restrições e função objetivo num formato de entrada de

dados compatível com o exigido pelo pacote computacional escolhido (Land & Powell)(13). O programa desenvolvido permite a utilização prática das soluções propostas pois está estruturado para minimizar o trabalho de entrada de dados e para viabilizar a utilização do método por pessoas sem formação em programação matemática.

5.2 - EXEMPLO 0.1 - EDIFÍCIO

Neste exemplo, é considerado um edifício de quatorze andares. O projeto foi dividido em oito atividades que deverão ser executadas nas suas quinze seções, sequencialmente por equipes de trabalho a serem escolhidas para cada seção.

A tabela 5.2.1 mostra as equipes disponíveis para realizar cada atividade. Na tabela 5.2.2 são mostradas as atividades e as quantidades de trabalho necessárias para executar cada seção da obra.

E Q U I P E	TAXAS DE PRODUÇÃO DISPONÍVEIS		
	1	2	3
A - Estrutura	1.00	0.85	0.65
B - Alvenaria	1.10	0.80	0.60
C - Instalações Elétrica e Sanitárias	1.00	0.70	0.55
D - Revestimentos	1.00	0.80	0.65
E - Pisos	0.95	0.85	0.50
F - Aparelhos	1.00	0.65	0.45
G - Limpeza final e Detalhes	1.10	0.70	0.55
H - Pintura	1.00	0.85	0.70

Tabela 5.2.1 - TAXAS DE PRODUÇÃO DISPONÍVEIS PARA A EXECUÇÃO DO EXEMPLO 1.

ATIVIDADE	QUANTIDADE DE TRABALHO DE CADA ATIVIDADE POR ANDAR														
	Terreo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
A- Estrutura	16.30	8.70	8.70	8.70	8.70	8.70	8.70	8.70	8.70	8.70	8.70	8.70	8.70	8.70	7.50
B- Alvenaria	6.60	7.10	7.10	7.10	7.10	7.10	7.10	7.10	7.10	7.10	7.10	7.10	7.10	7.10	4.00
C- Instalações Elétricas e Sanit.	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	4.20
D- Revestimentos	5.40	5.40	5.40	5.40	5.40	5.40	5.40	5.40	5.40	5.40	5.40	5.40	5.40	5.40	2.50
E- Pisos	3.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	1.20
F- Aparelhos	1.50	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	0.50
G- Limpeza final e Detalhes	1.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	4.00
H- Pintura	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	1.80

TABELA 5.2.2 - QUANTIDADES DE TRABALHO NECESSÁRIAS PARA A EXECUÇÃO DO EXEMPLO 1.

Neste exemplo considera-se que a programação da obra deve obedecer aos critérios descritos a seguir:

- . O tempo de execução da obra deve ser minimizado.
- . A equipe que trabalhará na execução das estruturas deverá respeitar folgas de dois dias entre os andares para permitir que haja cura do concreto.
- . A equipe de pintura terá, o seu deslocamento, de cima para baixo ao contrário das outras equipes, e só poderá iniciar os seus trabalhos após a conclusão total da atividade "Limpeza Final e Detalhes".
- . As equipes só poderão ingressar numa nova seção se a sua predecessora concluiu seus trabalhos nessa seção.

O problema é formulado a seguir:

$$\text{Min } P_n t_1^8 + P_n t_{16}^7 + \sum_{i=1}^8 \sum_{k=1}^{15} r_k^i$$

Sujeito a:

$$t_{k+1}^1 = t_k^1 + r_k^1 W_k^1 + 2 \quad k = 1, 2, \dots, 16$$

$$t_{k+1}^i = t_k^i + r_k^i W_k^i \quad i = 2, 3, \dots, 7 \quad k = 1, 2, \dots, 16$$

$$t_{k-1}^8 = t_k^8 + (-r_k^8) (-W_k^8) \quad k = 16, 15, \dots, 2$$

$$t_1^1 \geq 0$$

$$t_k^{i+1} \geq t_{k+1}^i \quad i= 1, 2, \dots, 6 \quad k= 1, 2, \dots, 15$$

$$t_1^{i+1} \geq t_1^i \quad i= 1, 2, \dots, 6$$

$$\delta_k^{i1} r_k^{i1} + \delta_k^{i2} r_k^{i2} + \delta_k^{i3} r_k^{i3} = r_k^i \quad k= 1, 2, \dots, 15$$

$$i= 1, 2, \dots, 8$$

$$\delta_k^{i1} + \delta_k^{i2} + \delta_k^{i3} = 1$$

onde:

$$\delta_k^{il} = 0 \quad \text{ou} \quad 1 \quad \forall i, k, l_i \quad (5.1)$$

O número de restrições geradas por este projeto é de 480 e, o número de variáveis é de 608, das quais 360 são inteiras.

A solução obtida para o problema acima é mostrada nas tabelas 5.2.3 (onde são indicados os tempos de início dos trabalhos para cada seção) e, a tabela 5.2.4 (que indica as equipes que devem executar cada seção através das suas taxas de produção).

A figura 5.2.1 mostra graficamente os tempos de execução das diferentes atividades num Diagrama Espaço-Tempo.

5.3 - EXEMPLO 0.2 - COLETOR CENTRAL DE ESGOTOS

Este exemplo é apresentado com o objetivo de ilustrar a utilização das formulações propostas no capítulo anterior para otimizar os custos de um projeto, considerando os custos

Seção Ati- vidade	TEMPO DE INÍCIO DOS TRABALHOS PARA CADA SEÇÃO															
	T	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A	0.0	12.59	20.25	27.90	35.56	43.21	50.87	58.52	66.18	73.18	81.49	89.14	96.80	104.45	112.11	118.92
B	13.74	21.00	28.81	36.62	44.43	52.24	60.05	67.86	75.67	83.48	91.29	99.10	106.91	114.72	118.98	121.38
C	85.68	88.98	91.48	93.98	96.48	98.98	101.48	103.98	106.48	108.98	111.48	113.98	116.98	118.98	121.48	125.68
D	88.98	92.52	96.06	99.59	103.13	106.67	110.21	113.74	117.28	120.82	124.35	127.89	131.42	134.96	138.50	140.14
E	107.06	110.39	112.76	115.14	117.51	119.89	122.26	124.64	127.01	129.34	131.76	134.14	136.51	138.89	140.14	140.74
F	118.83	120.33	122.03	123.73	125.43	127.13	128.53	130.53	132.23	133.93	135.63	137.53	139.03	140.14	140.90	141.13
G	120.38	122.03	123.98	125.92	127.86	129.80	131.74	133.69	135.63	137.57	139.51	141.46	143.40	145.34	147.29	149.51
H	171.79	170.53	168.43	166.33	164.23	162.13	160.03	157.93	155.83	153.73	151.63	149.53	147.43	145.33	143.23	141.13

TABELA 5.2.3 - TEMPOS DE INÍCIO DOS TRABALHOS DE EXECUÇÃO DAS SEÇÕES DO EXEMPLO 1.
SOLUÇÃO ÓTIMA.

Seção	TAXAS DE PRODUÇÃO UTILIZADAS														Nº de Trocas		
	T	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		14	
Atividade	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	-
A- Estrutura	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1
B- Alvenaria	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	-
C- Instalações Elétricas e San.	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	-
D- Revestimentos	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	1
E- Pisos	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	2
F- Aparelhos	1.10	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	1
G- Limpeza Final Detalhes	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	-
H- Pintura																	

TABELA 5.2.4 - EQUIPES EXECUTORAS DA OBRA EXEMPLO 1. SOLUÇÃO ÓTIMA.

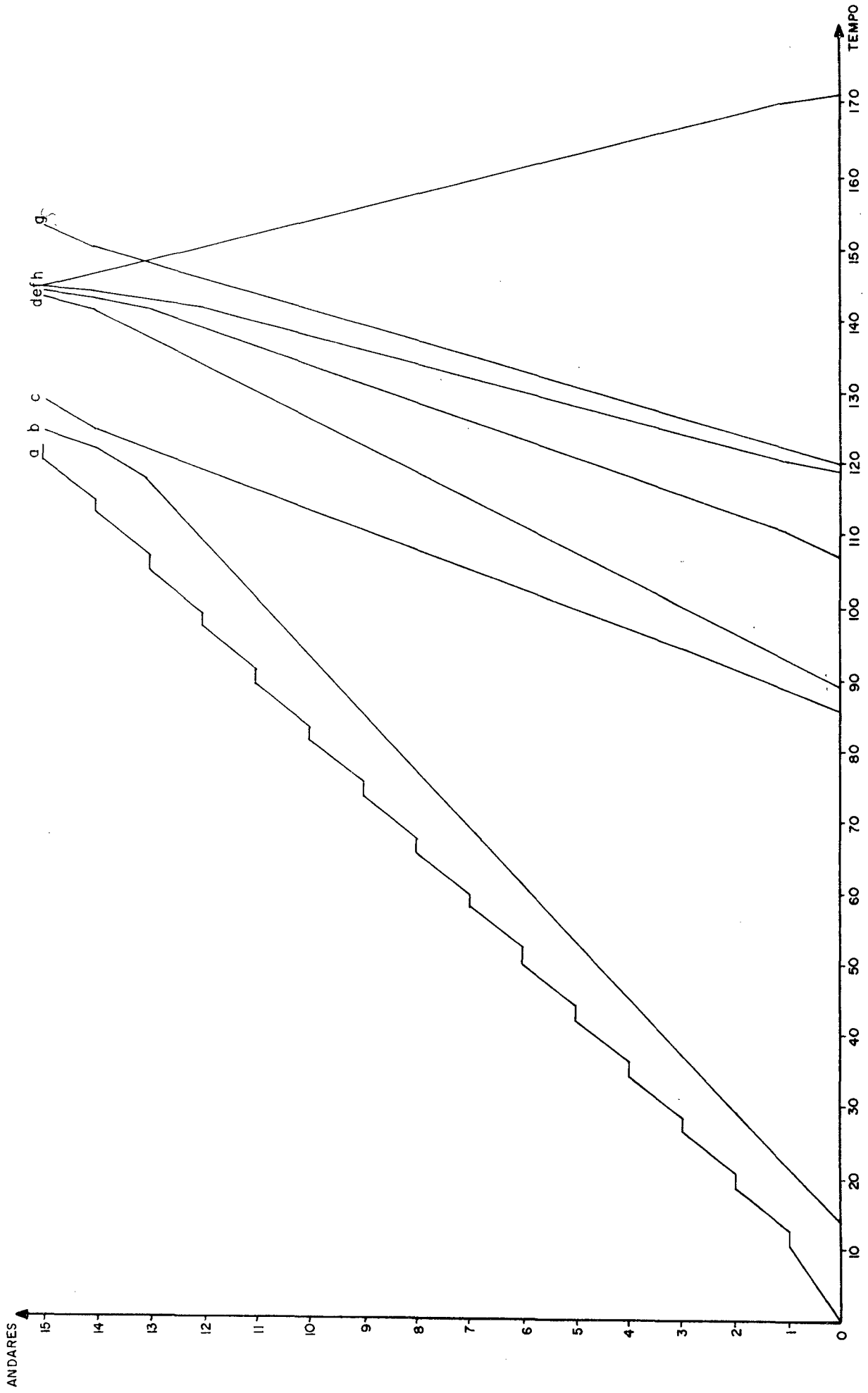


Fig. 5.2.1 - DIAGRAMA ESPAÇO-TEMPO DO EDIFÍCIO DE 14 ANDARES DO EXEMPLO 1. SOLUÇÃO ÓTIMA.

diretos, indiretos e os custos de troca de equipes. Utiliza-se a primeira das formulações propostas (Vanelli).

O coletor central de esgotos é de aproximadamente 14.500 m de extensão e atravessa solos diferentes que exigem tratamentos diferenciados na sua execução.

O projeto foi dividido em sete seções e seis atividades. As quantidades de trabalho por seção necessárias à execução da obra são mostrados na tabela 5.3.1. As equipes disponíveis para a execução de cada atividade e seus custos diretos estão indicados na tabela 5.3.2. Os custos de troca de equipes são mostrados na tabela 5.3.3.

Neste exemplo considera-se que a programação da obra deve obedecer os critérios descritos a seguir:

- . O custo de execução da obra deve ser otimizado.
- . O custo indireto da obra é de 2200 Unidades Monetárias por dia (um/dia).
- . A primeira atividade tem duas equipes alternativas disponíveis, e as demais atividades dispõem de três.
- . As equipes só poderão começar a executar uma nova seção se a sua predecessora concluiu seus trabalhos nessa seção.

O modelo de otimização que leva em conta todos estes critérios é formulado a seguir:

$$\text{Minimizar } 2200 t_7^6 + \sum_{i=1}^6 \sum_{k=1}^6 \sum_{p=1}^{2-3} z_{kp}^i + \sum_{i=1}^6 \sum_{k=1}^6 \sum_{p=1}^{2-3} C_{Dk}^{ip} \delta_{kp}^i$$

Seção Atividade	QUANTIDADE DE TRABALHO POR SEÇÃO						
	1	2	3	4	5	6	7
Locação Topográfica	3.50	2.90	4.60	2.90	3.00	2.20	3.90
Escavação	70.00	105.60	153.00	112.90	81.00	73.50	109.50
Assentamento Tubulações	25.30	30.00	35.90	20.50	25.70	10.00	22.50
Concreto	28.00	30.00	46.40	28.80	22.10	16.00	28.50
Partes Metálicas	10.00	11.50	18.00	8.00	13.70	10.20	17.00
Fechamento	7.00	11.50	19.00	12.60	9.60	10.00	15.60

TABELA 5.3.1 - QUANTIDADE DE TRABALHO NECESSÁRIO PARA A EXECUÇÃO DO EXEMPLO 2.

Equipe Atividade	EQUIPES DISPONÍVEIS					
	Taxa 1	Custos Direto(U.M.)	Taxa 2	Custo Direto(U.M.)	Taxa 3	Custos Direto(U.M.)
Locação Topográfica	1.000	75.000	0.800	96.000	-	-
Escavação	1.000	508.000	0.750	658.000	0.550	758.000
Assentamento tubulações	0.950	156.000	0.850	186.000	0.500	302.000
Concreto	1.000	202.000	0.900	238.000	0.680	288.000
Partes Metálicas	0.900	34.000	0.750	53.000	0.450	81.000
Fechamento	1.000	104.000	0.700	131.000	0.400	201.000

TABELA 5.3.2 - TAXAS DE PRODUÇÃO DISPONÍVEIS E CUSTOS DIRETOS EM UNIDADES MONETÁRIAS PARA A EXECUÇÃO DO EXEMPLO 2.

LOCAÇÃO TOPOGRÁFICA			
Equipes	1	2	3
1	0.00	8.00	-
2	8.00	0.00	-
3	-	-	-

(a)

ESCAVAÇÃO			
Equipes	1	2	3
1	0.00	20.00	33.00
2	20.00	0.00	45.00
3	33.00	45.00	0.00

(b)

ASSENTAMENTO DE TUBULAÇÕES			
Equipes	1	2	3
1	0.00	15.00	19.00
2	15.00	0.00	22.00
3	19.00	22.00	0.00

(c)

CONCRETO			
Equipes	1	2	3
1	0.00	7.00	11.00
2	7.00	0.00	15.00
3	11.00	15.00	0.00

(d)

PARTES METÁLICAS			
Equipes	1	2	3
1	0.00	3.00	5.00
2	3.00	0.00	7.00
3	5.00	7.00	0.00

(e)

FECHAMENTO			
Equipes	1	2	3
1	0.00	12.00	17.00
2	12.00	0.00	21.00
3	17.00	21.00	0.00

(f)

TABELA 5.3.3 - CUSTOS DE TROCA DE EQUIPES EM UNIDADES MONETÁRIAS

Sujeito a:

$$t_{k+1}^i = t_k^i + w_k^i r_k^i \quad k= 1, 2, \dots, 7 \quad i= 1, 2, \dots, 6$$

$$t_1^1 \geq 0$$

$$t_1^{i+1} \geq t_1^i \quad i= 1, 2, \dots, 6$$

$$t_k^{i+1} \geq t_{k+1}^i \quad k= 1, 2, \dots, 7 \quad i= 1, 2, \dots, 5$$

$$\delta_k^{11} r_k^{11} + \delta_k^{12} r_k^{12} = r_k^1 \quad k= 1, 2, \dots, 7$$

$$\delta_k^{11} + \delta_k^{12} = 1 \quad (5.2)$$

$$\delta_k^{i1} r_k^{i1} + \delta_k^{i2} r_k^{i2} + \delta_k^{i3} r_k^{i3} = r_k^i$$

$$\delta_k^{i1} + \delta_k^{i2} + \delta_k^{i3} = 1 \quad i= 2, 3, \dots, 6$$

$$k= 1, 2, \dots, 7$$

$$A_{kp}^1 = \sum_{q=1}^2 a_{kq}^{1p}$$

$$A_{kp}^1 \delta_{kp}^1 \geq Z_{kp}^1$$

$$\sum_{q=1}^2 a_{kp}^{1q} \delta_{k+1}^{1q} \geq Z_{kp}^1 \quad k= 1, 2, \dots, 6 \quad p= 1, 2$$

$$\sum_{q=1}^2 a_{kq}^{1p} \delta_{k+1}^{1q} - A_{kp}^1 (1 - \delta_{kp}^1) \leq Z_{kp}^1$$

$$A_{kp}^i = \sum_{q=1}^3 a_{kq}^{ip}$$

$$A_{kp}^i \delta_{kp}^i \geq Z_{kp}^i$$

$$\sum_{q=1}^3 a_{kp}^{ip} \delta_{k+1}^{ip} \geq Z_{kp}^i \quad \begin{array}{l} i= 2, 3, \dots 6 \\ k= 1, 2, \dots 6 \\ p= 1, 2, 3 \end{array}$$

$$\sum_{q=1}^3 a_{kp}^{ip} \delta_{k+1}^{ip} - A_{kp}^i (1 - \delta_{kp}^i) \leq Z_{kp}^i$$

O número de restrições gerado para estes exemplo é de 311 o número de variáveis é de 478, das quais 119 são inteiras. (Apêndice 3).

As tabelas 5.3.4, 5.3.5 e 5.3.6 mostram os tempos de início dos trabalhos, as equipes que foram escolhidas para executar cada seção bem como, os custos diretos e de troca associados a esta solução. No Apêndice 4 é mostrado o relatório do resultado final ótimo. O custo total ótimo da obra é de 994.989,84 U.M. A figura 5.3.2 mostra o Diagrama Espaço-Tempo do projeto otimizado.

Seção Atividade	TEMPO DE INÍCIO DOS TRABALHOS PARA CADA SEÇÃO (DIAS)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Locação Topográfica	0.00	2.80	5.70	10.51	13.20	16.20	18.40	22.30
Escavação	2.80	41.40	99.38	183.53	245.57	290.12	330.54	390.77
Assentamento Tubulações	250.74	274.77	303.27	337.38	356.85	381.27	390.54	412.15
Concreto	279.38	307.38	337.38	368.93	388.51	403.54	414.42	433.80
Partes Metálicas	369.54	378.54	388.89	405.09	412.29	424.62	433.80	441.45
Fechamento	387.11	394.11	405.61	418.98	427.73	434.45	441.45	447.69

TABELA 5.3.4 - TEMPOS DE INÍCIO DOS TRABALHOS DE EXECUÇÃO DAS SEÇÕES DO EXEMPLO 2. SOLUÇÃO ÓTIMA

Seção Atividade	TAXAS DE PRODUÇÃO UTILIZADAS EQUIPE-SEÇÃO							NÚMERO DE TROCAS
	1	2	3	4	5	6	7	
Locação Topográfica	0.800	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1
Escavação	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0
Assentamento Tubulações	0.950	0.950	0.950	0.950	0.950	0.950	0.950	0
Concreto	1.000	1.000	0.680	0.680	0.680	0.680	0.680	1
Partes Metálicas	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.450	1
Fechamento	1.000	1.000	0.700	0.700	0.700	0.700	0.400	2

TABELA 5.3.5 - EQUIPES EXECUTORAS DA OBRA DO EXEMPLO 2. SOLUÇÃO ÓTIMA

Seção Atividade	CUSTOS DE TROCA						
	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	
Locação Topográfica	8.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Escavação	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Assentamento Tubulações	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Concreto	0.00	11.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Partes Metálicas	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.00	
Fechamento	0.00	12.00	0.00	0.00	0.00	21.00	

TABELA 5.3.6 - CUSTOS DE TROCA - SOLUÇÃO ÓTIMA

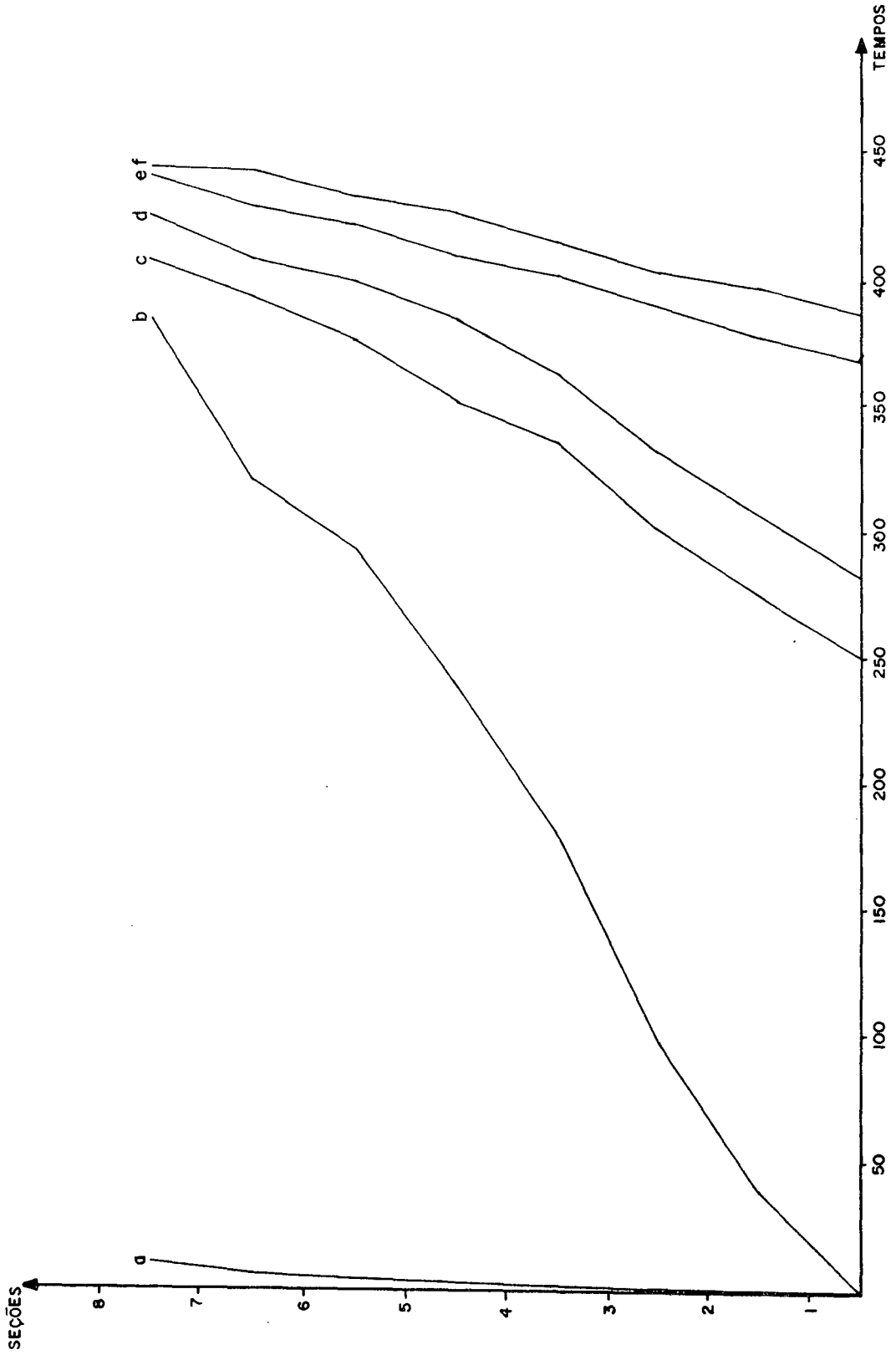


Fig. 5.3.1.1 - DIAGRAMA ESPAÇO-TEMPO DO COLETOR CENTRAL DE ESGOTOS DO EXEMPLO 2. SOLUÇÃO ÓTIMA.

5.4 - CONCLUSÃO

Os dois exemplos apresentados foram escolhidos por representarem obras típicas de porte médio em construção.

O primeiro exemplo, ilustrou uma aplicação da formulação que permite que equipes se desloquem em sentido contrário.

O segundo, é um exemplo da formulação que permite considerar trocas de equipes e custos associados a estas trocas.

Estas duas formulações que foram aqui ilustradas através dos exemplos apresentados não foram ainda consideradas na literatura.

C A P Í T U L O - I V

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 - CONCLUSÕES

As publicações especializadas que tratam do Método-Espaço-Tempo têm abordado amplamente as suas vantagens com relação aos outros métodos de planejamento, programação e controle para obras de construção civil com características lineares. A aplicação prática do método enfrentava, como maior dificuldade a não existência de um modelo matemático que permita obter um procedimento computacional para a solução do problema.

O objetivo deste trabalho foi superar este obstáculo. Barcia propôs a solução do problema com a utilização de técnicas de Controle Ótimo Discreto. Porém, ele não considerou no seu modelo certas características construtivas indispensáveis para o planejamento de obras. O problema de equipes se deslocando em sentidos contrários foi solucionado neste trabalho. Além disso resolveu-se o problema de trocas de equipes na execução de uma mesma atividade considerando os custos associados a estas trocas. Este último problema foi solucionado através de duas formulações. Cada uma, com características particulares dado que envolvem diferente número de variáveis e restrições. É opinião deste autor que a primeira solução proposta oferece mais vantagens, pois só acrescenta ao problema sem trocas variáveis reais enquanto que a segunda, também acrescenta variáveis inteiras (0-1).

A consideração que permite folgas de tempo entre o início e o fim dos trabalho entre seções de uma mesma atividade com a consideração do custo da equipe parada, também foi formulada neste trabalho dando origem a um problema de Programação Quadrática com variáveis inteiras (0-1).

Dado que para problemas práticos as formulações aqui desenvolvidas envolvem um número elevado de variáveis e restrições, desenvolveu-se também neste trabalho um programa computacional que, a partir de poucos dados básicos, gera as variáveis, função objetivo e restrições numa forma compatível com o pacote utilizado. O programa possibilita a combinação das várias características construtivas formuladas no capítulo quatro. No caso da minimização de custos com troca de equipes o programa gera a primeira das duas formulações propostas para abordar este caso.

6.2 - RECOMENDAÇÕES E FUTUROS TRABALHOS

O número de restrições e variáveis necessárias para solução de problemas reais através da técnica proposta é bastante elevado. O pacote utilizado neste trabalho não é eficiente em termos de C.P.U. Por este motivo torna-se recomendável a implementação das formulações propostas para um outro pacote de características comerciais e não acadêmicas como é o caso do "Land and Powell".

Uma outra possibilidade que se vislumbra é o desenvolvimento de algoritmos específicos usando outras técnicas de pesquisa operacional mais eficientes que Programação Inteira para a solução desta categoria de problemas.

B I B L I O G R A F I A

- (1) - ANTIL, M.J., "CPM Aplicado às Construções", Rio de Janeiro, Ed. da Universidade de São Paulo, 1968.
- (2) - BALTAR, A., "Control de la Ejecución de Proyectos por el Método del Camino Crítico (PERT)", Cuadernos del Instituto Latinoamericano de Planificación Económica y Social, Série 1, nº 4, Apuntes de Clases, Santiago de Chile, 1973.
- (3) - BARCIA, R.M., "Construction Production Planning and Optimal Control", Ph.D. Thesis University of Waterloo, Waterloo 1984.
- (4) - BENNETT, F.L., "Critical Path Resource Scheduling Algorithm", Journal of the Construction Division, ASCE, Vol. 94, nº 102, Proc. Paper 6152, Oct. 1968, p. 168 à 180.
- (5) - BIRREL, S.G., "Construction Planning - Beyond the Critical Path", Journal of the Construction Division, ASCE, Vol. 106, nº 103, Proc. Paper 15684, September, 1980. p. 389 à 407.
- (6) - BOITEUX, D.C., "Administração de Projetos PERT/CPM/ROY", Rio de Janeiro, Ed. Interciência Ltda., 1979.
- (7) - CARR, R.I. & MEYER, W.L., "Planning Construction of Repetitive Building Units", Journal of the Construction Division, ASCE, Vol. 100, nº 103, Proc. Paper 10812, Sept. 1979. p. 403 à 412.
- (8) - DIGMAN, L.A., "PERT/COB: Life Cycle Technique", The Journal of Industrial Engineering, Vol. 18, nº 2, Feb. 1967. p. 154 à 158.

- (9) - HARRIS, F.C. & WOODHEAD, R.W., "Design of Construction and Process Operations", New York, John Wiley and Sons, Inc, 1976.
- (10) - HIRSCHFELD, H., "Planejamento com PERT/CPM e Análise do Desempenho", 4 ed. São Paulo, Ed. Atlas, 1974.
- (11) - JOHNSTON, D.W., "Linear Scheduling Method for Highway Construction", Journal of the Construction Division, ASCE, Vol. 107, Proc. Paper 16289, June 1981, p. 247 à 261.
- (12) - JUREKA, W., "Network Planning in the Construction Industry", England, Ed. Maclaren and Sons, 1969.
- (13) - LAND, A.H. & POWELL, S., "Fortran Codes for Mathematical Programing: Linear, Quadratic and Discrete", England, Ed. John Wiley and Sons, 1974.
- (14) - MARTIN, W.R., "Aplicación de las Tecnicas PERT/CPM a la Planificación y Control de la Construcción", Espana, Ed. Blume, 1972.
- (15) - O'BRIEN, J.J., "VPM Scheduling for High-Rise Buildings", Journal of the Construction Division, ASCE, Vol. 101, nº 104, Proc. Paper 11773, Dec. 1975. p. 895 à 905.
- (16) - PEER, S., "Network Analysis and Construction Planning", Journal of the Construction Division, ASCE, Vol. 100, nº 103, Proc. Paper 10792, September 1974. p. 203 à 210.
- (17) - POPESW, C. & BORCHERDING, J.D., "Developments in CPM, PERT and Network Analysis", Journal of the Construction Division, ASCE. Vol. 101, nº 104, Proc. Paper 11763, Dec. 1975.p.769 à 784.

- (18) - RODRIGUEZ, C.M., "Aplicaciones en Ingenieria de Metodos Modernos de Planeación, Programación y Control de Procesos Productivos", México, 1962.
- (19) - SELINGER, S., "Construction Planning for Linear Projects", Journal of the Construction Division, ASCE, Vol. 106, n° 102, Proc. Paper 15504, June 1980. p. 195 à 205.
- (20) - STRADAL, O. & CACHA, J., "Time Space Scheduling Method", Journal of the Construction Division, ASCE, Vol. 108, n° 103, Proc. Paper 17308, September, 1982. p. 445 à 457.
- (21) - VANNELLI, A., "Solution Techniques for 0-1 Indefinite Quadratic Programming Problems with Application to Decomposition", Ph.D. Thesis, University of Waterloo, Waterloo, 1983.

APÊNDICE 1 - PROGRAMA GERADOR DE VARIÁVEIS, RESTRI-
ÇÕES E FUNÇÃO OBJETIVO

A.1.1 - FORMATO DE DADOS EXIGIDO PELO PACOTE "Land and Powell"

Cartão 1	Coluna 1	= 4 chama as subrotinas de programação linear inteira
Cartão 2	Coluna 1-10 M	Número de restrições
	11-20 N	Número total de variáveis
	21-30 NUND	Número de variáveis discretas
	31-40	= 0
	41-50	> 1 A subrotina PRINT é chamada na otimização inicial de programação linear. O número de iterações é impresso, as variáveis e os seus valores também são impressos.
Cartão 3	Coluna 1-3 J	Número de variável discreta J
	5-10 JDISC(S)	= 1 tipo de passo da variável discreta J
	11-13 J	
	15-20 JDISC(J)	
	:	
	:	
	17-73 J	
	75-80 JDISC(J)	

O cartão 3 deve ser repetido até que todas as variáveis discretas tenham sido especificadas com os seus tipos de passo. Oito por cartão.

Cartão 4	Coluna 1-10	9999999999 indicando o fim da especificação das variáveis discretas
Cartão 5	Coluna 1-10 M	Número de restrições
	11-20 N	Número de variáveis
	21-30 ISBND	Número de variáveis limitadas
	31-40 MOREPR	= 0 para imprimir os cartões de entrada e não a inversa em IPRINT.
		= 1 para imprimir os cartões de entrada e a inversa.
		= 2 para não imprimir os cartões de entrada e sim a inversa.
		= 3 para não imprimir a inversa nem os cartões de entrada.
Cartão 6	Coluna 1-3 J	Número do elemento não zero da função objetivo C
	5-10 C(J)	J-ésimo elemento da função objetivo.
	11-13 J	
	15-20 C(J)	
	.	
	.	
	71-73 J	
	75-80 C(J)	

O cartão 6 deve ser repetido até que todos os elementos não zero da função objetivo tenham sido especificados. Oito por cartão.

Cartão 7	Coluna 1-3	J	Número da variável com limite superior.
	5-10	BOUND(J)	= 1 valor do limite superior da J-ésima variável
	11-13	J	
	15-20	BOUND(J)	
		.	
		.	
	71-73	J	
	75-80	BOUND(J)	

O cartão 8 deve ser repetido até que todas as variáveis limitadas tenham sido especificadas. Oito por cartão.

Cartão 9	Coluna 1-10	9999999999	indicando o fim da especificação das variáveis limitadas.
----------	-------------	------------	---

Cartão 10	Coluna 1-3	I	Número do elemento do vetor b ou seja número da restrição.
	4	S(I)	= 0 restrição de igualdade = 1 restrição menor ou igual que = 2 restrição maior ou igual que.
	5-10	B(I)	Elemento I do vetor b, ou seja, elemento a direita do símbolo da restrição.
	11-13	I	
		14	S(I)
	15-20	B(I)	
		.	
		.	
		.	

71-73 I
 74 S(I)
 75-80 B(I)

O cartão 10 deve ser repetido até que todos os elementos do vetor b tenham sido especificados. Oito por cartão.

Cartão 11 Coluna 1-10 9999999999 indicando o fim da especificação dos elementos do vetor b .

Cartão 12 Coluna 5-10 I Número de restrição (linha da matriz A)

11-13 J Número de variável (coluna da matriz A)

15-20 A(I,J) Valor do elemento (I,J) (Elemento não zero (I,J) da matriz A)

21-23 J

25-30 A (I,J)

·
·

71-73 J

75-80 A (I,J)

As restrições devem ser especificadas em correta ordem de numeração. O cartão 12 deve ser repetido até que todas as restrições tenham sido especificadas.

Cartão 13 Coluna 1-10 9999999999 indicando o fim da especificação dos elementos da matriz A (I,J)

Cartão 14 Coluna 1-10 MORE = 0 indica a finalização do processo.

A.1.2 - MANUAL DO USUÁRIO

A.1.2.1 - NOÇÕES GERAIS

A otimização de tempo e/ou custo do Método Espaço-Tempo através do modelo proposto, exige a utilização de um pacote computacional que solucione problemas de Programação Linear Inteira. O pacote utilizado neste trabalho é o "Land & Powell" que exige a entrada de dados exposta no item anterior. A formulação matemática de projetos de porte real (exemplos do capítulo 5) e a sua estruturação de forma da entrada de dados do pacote exige a montagem de um grande número de variáveis e restrições o que dificulta o uso das formulações propostas. O objetivo deste programa é gerar as variáveis e formular a função objetivo e restrições de forma compatível com a entrada de dados requerida pelo pacote (Apêndice 3). Isto a partir de dados básicos. O programa também permite selecionar e combinar as diversas formas construtivas cujas formulações foram consideradas no capítulo 4.

A.1.2.2 - CARACTERÍSTICAS E LIMITES

- . O programa pode gerar até 999 variáveis x 999 restrições.
- . Para tratamento de custos decorrentes da troca de equipes o programa utiliza a primeira técnica proposta no capítulo 4 (Vanelli).
- . Ao se escolher a programação da obra com a possibilidade de troca de equipes de seção para seção será considerada esta alternativa para todas as atividades.

- . O programa está estruturado para formular até uma equipe que trabalha em sentido contrário à maioria delas. Esta equipe será colocada pelo programa como a última equipe, e será pedida, a definição da equipe que, como fim dos seus trabalhos permita o início dos da equipe em questão.
- . A programação otimizando custos e admitindo troca de equipes numa mesma atividade, está limitada a obras de até sete seções. Se ultrapassar, aparecerá a mensagem de erro "estouro".
- . Até quatro capacidades de produção alternativas poderão ser consideradas para cada atividade.
- . O programa oferece duas alternativas para o sequenciamento dos trabalhos entre as equipes. Se é especificado $z3 = 10$, folgas de tempo entre o início dos trabalhos entre equipes que executam atividades diferentes na mesma seção serão permitidas. Caso contrário, será considerado que uma equipe não poderá iniciar os trabalhos numa seção se a sua predecessora não concluiu nessa seção suas atividades.

A.1.2.3 - ENTRADA DE DADOS

Cartão 1	Coluna 1-10	= 2 para otimização do custos. ≠ 2 para otimização do tempo.
Cartão 2	Coluna 1-10 Z	= 1 otimização com troca de equipe de uma seção para outra. ≠ 1 otimização sem troca de equipes.

	11-20 z3	= 10 otimização com folgas de tempo entre as equipes. ≠ 10 otimização sem folgas de tempo.
	21-30 z4	= 100 existência de equipe que trabalha em sentido contrário. ≠ 100 não existência desta equipe.
Cartão 3	Coluna 1-10 N 11-20 M	Número de seções do projeto. Número de atividades do projeto.
Cartão 4	Coluna 1-10 A(I) 11-20 A(I) . . 71-80 A(I)	Quantidades necessárias de trabalho nas seções para cada atividade, formato (F10.2).

O cartão quatro deve ser repetido até que todas as seções e atividades tenham sido especificadas nas quantidades de trabalho necessárias. Oito dados por cartão e, (NxM) em número total.

Cartão 5	Coluna 1-10 L ₁	Quantidade de equipes alternativas disponíveis para cada atividade.
----------	----------------------------	---

O cartão 5 deve ser repetido até que todas as (M) atividades do projeto tenham sido especificadas. Se $Z3 \neq 1$ o cartão 5 não deve ser colocado e o cartão 6 deve continuar a sequência.

Cartão 6	Coluna 1-10	III	Tempo de início do projeto.
Cartão 7	Coluna 1-10	NFOLG	Número de folgas de tempo programadas entre o início dos trabalhos numa seção e o fim dos mesmos na seção anterior.
Cartão 8	Coluna 1-10	J	Número da interseção que tem folga programada.
	11-20	IFOLG	Tempo de folga.

O cartão oito deve ser repetido NFOLG vezes. Se NFOLG= 0 o cartão oito não deve ser colocado. O próximo cartão deve continuar a sequência.

Cartão 9	Coluna 1-10	IAMR(I)	Tempo de folga entre atividades em ordem de ocorrência.
	11-20	IAMR(I)	
	.	.	
	.	.	
	71- 8	IAMR(I)	

O cartão 9 deve ser repetido até que todas as folgas de tempo entre atividades tenham sido especificadas $((N-1) \times M)$. Se $Z3 \neq 10$ o cartão 9 não deve ser colocado e o próximo cartão deve continuar a sequência.

Cartão 10	Coluna 1-10	TCUST	Custo indireto da obra.
Cartão 11	Coluna 1-10	VCUST(I)	Custo direto de cada equipe disponível para a atividade.
	11-20	VCUST(I)	
	21-30	VCUST(I)	
	31-40	VCUST(I)	

Cartão 12 Coluna 1-10 CUST(I,J) Custo de troca de equipe
 11-20 CUST(I,J)
 .
 .
 .
 71-80 CUST(I,j)

O cartão 12 deve ser repetido até que todos os custos de troca permitidos sejam considerados.

Os cartões 11 e 12 devem ser repetidos nesta ordem M vezes até que todas as equipes tenham sido especificadas. Se $MCUST \neq 2$ estes cartões não devem ser colocados e o próximo cartão deve continuar a sequência.

Cartão 13 Coluna 1-10 I PRINT Seção que define o início dos trabalhos da equipe que se desloca em sentido contrário.

Se $Z4 \neq 100$ o cartão 13 não deve ser colocado, e o próximo cartão deve continuar na sequência.

Cartão 14 Coluna 1-10 $R_1(I)$ Taxa de produção alternativa para a execução da atividade I, formato (F10.3).

11-20 $R_1(I)$

21-30 $R_1(I)$

31-40 $R_1(I)$

O cartão 14 deve ser repetido até que todas as atividades tenham sido especificadas. Um cartão por atividade (M vezes).

Cartão 15 Coluna 1-10 Z_1 = 0 para finalizar o processo.

No apêndice dois ilustra-se a entrada de dados para o programa e no apêndice três a saída de dados gerados. Será apresentado o segundo exemplo do capítulo cinco.

APÊNDICE 2 - EXEMPLO 2. ENTRADA DE DADOS DO PROGRAMA

APÊNDICE 3 - EXEMPLO 2. SAÍDA DE DADOS GERADOS PELO
PROGRAMA (ENTRADA DE DADOS DO "LAND
AND POWELL")

FILED COLLETT I AI VM/SE REL 3.1 SUU 300

4	478	311	1195	1195	1195	1200	1
193	1194	1196	1197	1198	1199	1200	1
201	1202	1204	1205	1206	1207	1208	1
209	1210	1212	1213	1214	1215	1216	1
217	1218	1220	1221	1222	1223	1224	1
225	1226	1228	1229	1230	1231	1232	1
233	1234	1236	1237	1238	1239	1240	1
241	1242	1244	1245	1246	1247	1248	1
249	1250	1252	1253	1254	1255	1256	1
257	1258	1260	1261	1262	1263	1264	1
265	1266	1268	1269	1270	1271	1272	1
273	1274	1276	1277	1278	1279	1280	1
281	1282	1284	1285	1286	1287	1288	1
289	1290	1292	1293	1294	1295	1296	1
297	1298	1300	1301	1302	1303	1304	1
305	1306	1307	1308	1309	1310	1	1

55599555999	478	311	119	119	119	1311	1
48	-220091	-1	92	-1	94	-1	97
58	-1	99	-1100	-1101	-1102	-1103	-1105
106	-1107	-1108	-1109	-1110	-1111	-1112	-1113
114	-1115	-1116	-1117	-1118	-1119	-1120	-1121
122	-1123	-1124	-1125	-1126	-1127	-1128	-1129
130	-1131	-1132	-1133	-1134	-1135	-1136	-1137
138	-1139	-1140	-1141	-1142	-1143	-1144	-1145
146	-1147	-1148	-1149	-1150	-1151	-1152	-1153
154	-1155	-1156	-1157	-1158	-1159	-1160	-1161
162	-1163	-1164	-1165	-1166	-1167	-1168	-1169
170	-1171	-1172	-1173	-1174	-1175	-1176	-1177
178	-1179	-1180	-1181	-1182	-1183	-1184	-1185
186	-1187	-1188	-1189	-1190	-1191	-1192	-1193
194	-96195	-75196	-96197	-75198	-56199	-75200	-96201
202	-96203	-75204	-96205	-75206	-56207	-508208	-658209
210	-508211	-658212	-758213	-508214	-658215	-758216	-508217
218	-758219	-508220	-658221	-758222	-508223	-658224	-758225
226	-658227	-758228	-156229	-186230	-302231	-156232	-186233
234	-156235	-186236	-302237	-156238	-186239	-302240	-156241

242	-302243	-156244	-302246	-156247	-176248	-08249	-202
250	-238251	-289252	-238254	-288255	-202257	-238257	-269
258	-202259	-289260	-202262	-288263	-202264	-288265	-232
266	-289267	-202268	-288270	-288271	-288272	-288273	-274
274	-53275	-81276	-53278	-81279	-53280	-53281	-311
282	-34283	-53284	-34286	-53287	-81288	-34289	-343
290	-81291	-104292	-131294	-104295	-131296	-201297	-314
298	-131299	-104300	-131302	-104303	-131304	131305	-281
306	-104307	-131308	-104310	-131311	-201		
55999559999							
193	1194	1195	1197	1198	1199	1200	1
201	1202	1204	1205	1206	1207	1208	1
209	1210	1211	1212	1214	1215	1216	1
217	1218	1219	1221	1222	1223	1224	1
225	1226	1227	1229	1230	1231	1232	1
233	1234	1235	1237	1238	1239	1240	1
241	1242	1243	1245	1246	1247	1248	1
249	1250	1251	1253	1254	1255	1256	1
257	1258	1259	1261	1262	1263	1264	1
265	1266	1267	1269	1270	1271	1272	1
273	1274	1275	1277	1278	1279	1280	1
281	1282	1283	1285	1286	1287	1288	1
289	1290	1291	1293	1294	1295	1296	1
297	1298	1299	1301	1302	1303	1304	1
305	1306	1307	1309	1310	1311	1304	1
55999559999							
10	0	20	50	60	70	80	0
90	0	100	130	140	150	160	0
170	0	180	210	220	230	240	0
250	0	260	290	300	310	320	0
330	0	340	370	380	390	400	0
410	0	420	452	462	472	482	0
492	0	502	532	542	552	562	0
572	0	582	612	622	632	642	0
652	0	662	692	702	712	722	0
732	0	742	772	782	792	802	0
812	0	822	852	862	872	882	0
890	0	900	930	940	950	960	1

850	C 900	1 910	520	1 920	C 940	1 950	C 960	1
970	C 980	1 990	C1000	11010	C1020	11030	C1040	1
1050	C1060	11070	C1080	11090	C1100	11110	C1120	1
1130	C1140	11150	C1160	11170	C1180	11190	C1200	1
1210	C1220	11230	C1240	11250	C1260	11270	C1280	1
1290	C1300	11310	C1320	11330	C1340	11350	C1360	1
1370	C1380	11390	C1400	11410	C1420	11430	C1440	1
1450	C1460	11470	C1480	11490	C1500	11510	C1520	1
1530	C1540	11550	C1560	11570	C1580	11590	C1600	1
1610	C1620	11630	C1640	11650	C1660	11670	C1680	1
1690	C1700	11710	C1720	11730	C1740	11750	C1760	0
1770	C1780	81792	C1800	C1810	C1820	C1830	C1840	8
1850	C1860	01871	C1880	C1890	C1900	C1910	C1920	0
1931	81942	01952	C1960	81972	C1980	C1990	C2000	0
2012	02021	82032	C2040	C2050	C2060	C2070	C2080	8
2092	02102	02111	522122	C2130	C2140	652152	C2160	0
2171	782182	02192	C2200	532212	C2220	C2230	C2240	0
2252	02261	782272	C2280	C2290	532302	C2310	C2320	5
2332	02342	02351	782362	C2370	C2380	532392	C2400	0
2411	652422	02432	02441	782452	C2460	C2470	C2480	0
2492	02501	652512	02522	C2530	782542	C2550	C2560	53
2572	02582	02591	652602	C2610	C2620	782632	C2640	0
2651	342662	02672	02681	372692	C2700	C2710	C2720	0
2732	02741	342752	02762	C2770	372782	C2790	C2800	41
2812	02822	02831	342842	C2850	C2860	372832	C2880	0
2891	412902	02912	C2920	342932	C2940	C2950	C2960	0
2972	02981	412992	C3000	C3010	343022	C3030	C3040	37
3052	03062	03071	413082	C3090	C3100	343112	C3120	0
3131	373142	03152	C3160	413172	C3180	C3190	C3200	0
3212	03221	223232	03242	C3250	263262	C3270	C3280	18
3292	03302	03311	223322	C3320	C3340	263352	C3360	0
3371	183382	03392	C3400	223412	C3420	C3430	C3440	0
3452	03461	183472	03482	C3490	223502	C3510	C3520	26
3532	03542	03551	183562	C3570	C3580	223592	C3600	0
3611	263622	03632	C3640	183652	C3660	C3670	C3680	0
3692	03701	263712	03722	C3730	32742	C3750	C3760	10
3772	03782	03791	123802	C3810	C3820	33832	C3840	0
3851	103862	03872	03881	123892	C3900	C3910	C3920	0

FILEC CCLE1 4 AI VM/SP RHL 3.1 SLU 306

4012	04022	04031	104042	04052	04061	124012	04082
4091	84102	04112	04121	104132	04142	04151	124162
4172	04181	84192	04202	04211	104222	04232	04241
4252	04262	04271	254282	04292	04301	324312	04322
4331	384342	04352	04361	254372	04382	04391	334402
4412	04421	384432	04442	04451	254462	04472	04481
4492	04502	04511	384522	04532	04541	254512	04562
4571	334582	04592	04601	384612	04622	04631	04642
4652	04661	334672	04682	04691	384702	04712	04721
4732	04742	04751	334762	04772	04781	38	

5999999999	1	2	1 49	-3.5			
	2	3	1 50	-2.9			
	3	4	1 51	-4.6			
	4	5	1 52	-2.9			
	5	6	1 53	-3.0			
	6	7	1 54	-2.2			
	7	8	1 55	-3.9			
	8	9	1 56	-70.0			
	9	10	1 57	-105.6			
	10	11	1 58	-153.0			
	11	12	1 59	-112.8			
	12	13	1 60	-81.0			
	13	14	1 61	-72.5			
	14	15	1 62	-109.5			
	15	17	1 63	-25.3			
	16	18	1 64	-30.0			
	17	19	1 65	-35.9			
	18	20	1 66	-20.5			
	19	21	1 67	-25.7			
	20	22	1 68	-10.0			
	21	23	1 69	-22.5			
	22	25	1 70	-28.0			
	23	26	1 71	-30.0			
	24	27	1 72	-46.4			
	25	28	1 73	-28.8			
	26	29	1 74	-22.1			
	27	30	1 75	-16.0			

FILEC CCL11 5 A1 VM/SP REL 3.1 SLU 206

27	30	-1	31	1	75	-16.0
28	31	-1	32	1	76	-28.5
29	33	-1	34	1	77	-10.0
30	34	-1	35	1	78	-11.5
31	35	-1	36	1	79	-18.0
32	36	-1	37	1	80	-8.0
33	37	-1	38	1	81	-13.7
34	38	-1	39	1	82	-10.2
35	39	-1	40	1	83	-17.0
36	41	-1	42	1	84	-7.0
37	42	-1	43	1	85	-11.5
38	43	-1	44	1	86	-19.0
39	44	-1	45	1	87	-12.6
40	45	-1	46	1	88	-9.6
41	46	-1	47	1	89	-10.0
42	47	-1	48	1	90	-15.6
43	1	1				
44	2	-1	9	1		
45	3	-1	10	1		
46	4	-1	11	1		
47	5	-1	12	1		
48	6	-1	13	1		
49	7	-1	14	1		
50	8	-1	15	1		
51	9	-1	16	1		
52	10	-1	17	1		
53	11	-1	18	1		
54	12	-1	19	1		
55	13	-1	20	1		
56	14	-1	21	1		
57	15	-1	22	1		
58	16	-1	23	1		
59	17	-1	24	1		
60	18	-1	25	1		
61	19	-1	26	1		
62	20	-1	27	1		
63	21	-1	28	1		
64	22	-1	29	1		

66	24	-1	31	I			
67	25	-1	32	I			
68	26	-1	33	I			
69	27	-1	34	I			
70	28	-1	35	I			
71	29	-1	36	I			
72	30	-1	37	I			
73	31	-1	38	I			
74	32	-1	39	I			
75	33	-1	40	I			
76	34	-1	41	I			
77	35	-1	42	I			
78	36	-1	43	I			
79	37	-1	44	I			
80	38	-1	45	I			
81	39	-1	46	I			
82	40	-1	47	I			
83	41	-1	48	I			
84	1	-1	9	I			
85	9	-1	17	I			
86	17	-1	25	I			
87	25	-1	33	I			
88	23	-1	41	I			
89	193	1.000	194	0.800	49	-1	
90	193		1194	I			
91	195	1.000	196	0.800	50	-1	
92	195		1196	I			
93	197	1.000	198	0.800	51	-1	
94	197		1198	I			
95	199	1.000	200	0.800	52	-1	
96	199		1200	I			
97	201	1.000	202	0.800	53	-1	
98	201		1202	I			
99	203	1.000	204	0.800	54	-1	
100	203		1204	I			
101	205	1.000	206	0.800	55	-1	
102	205		1206	I			
103	207	1.000	208	0.750	209	0.550	56
							-1

FILEC ÇÇLE1 7 A1 VM/SP REL 3.1 SLU 306

104207	1208	1205	1	
105210	1.000211	C.750212	C.550 57	-1
106210	1211	1212	1	
107213	1.000214	C.750215	C.550 58	-1
108213	1214	1215	1	
109216	1.000217	C.750218	C.550 59	-1
110216	1217	1218	1	
111219	1.000220	C.750221	C.550 60	-1
112219	1220	1221	1	
113222	1.000223	C.750224	C.550 61	-1
114222	1223	1224	1	
115225	1.000226	C.750227	C.550 62	-1
116225	1226	1227	1	
117228	0.950229	C.850230	C.500 63	-1
118228	1229	1230	1	
119231	0.950232	C.850233	C.500 64	-1
120231	1232	1233	1	
121234	0.950235	C.850236	C.500 65	-1
122234	1235	1236	1	
123237	0.950238	C.850239	C.500 66	-1
124237	1238	1239	1	
125240	0.950241	C.850242	C.500 67	-1
126240	1241	1242	1	
127243	0.950244	C.850245	C.500 68	-1
128243	1244	1245	1	
129246	0.950247	C.850248	C.500 69	-1
130246	1247	1248	1	
131249	1.000250	C.900251	C.680 70	-1
132249	1250	1251	1	
133252	1.000253	C.900254	C.680 71	-1
134252	1252	1254	1	
135255	1.000256	C.900257	C.680 72	-1
136255	1256	1257	1	
137258	1.000259	C.900260	C.680 73	-1
138258	1259	1260	1	
139261	1.000262	C.900263	C.680 74	-1
140261	1262	1263	1	
141264	1.000265	C.900266	C.680 75	-1

FILEC CCLET1 3 A1 VM/SP REL 2.1 SLL 206

142264	1265	1266	1	
143267	1.000268	C.500269	C.680	76 -1
144267	1268	1269	1	
145270	C.900271	C.755272	C.450	77 -1
146270	1271	1272	1	
147273	C.900274	C.755275	C.450	78 -1
148273	1274	1275	1	
149276	C.900277	C.755278	C.450	79 -1
150276	1277	1278	1	
151279	C.900280	C.755281	C.450	80 -1
152279	1280	1281	1	
153282	C.900283	C.755284	C.450	81 -1
154282	1283	1284	1	
155285	C.900286	C.755287	C.450	82 -1
156285	1286	1287	1	
157288	C.900289	C.755290	C.450	83 -1
158288	1289	1290	1	
159291	1.000292	C.700293	C.400	84 -1
160291	1292	1293	1	
161294	1.000295	C.700296	C.400	85 -1
162294	1295	1296	1	
163297	1.000298	C.700299	C.400	86 -1
164297	1298	1299	1	
165300	1.000301	C.700302	C.400	87 -1
166300	1301	1302	1	
167303	1.000304	C.700305	C.400	88 -1
168303	1304	1305	1	
169306	1.000307	C.700308	C.400	89 -1
170306	1307	1308	1	
171309	1.000310	C.700311	C.400	90 -1
172309	1310	1311	1	
173193	8 91	-1		
174195	0196	8 91	-1	
175195	0196	8193	8 91	-1
176194	8 92	-1		
177195	8196	C 92	-1	
178195	8196	C194	8 92	-1
179195	8 92	-1		

180197	0198	8 52	-1	8 52	-1
181197	0198	8195	8 52	8 52	-1
182196	8 94	-1	-1	-1	-1
183197	8198	8 54	-1	8 54	-1
184197	8198	8196	8 54	8 54	-1
185197	8 95	-1	-1	-1	-1
186199	0200	8 55	-1	8 55	-1
187199	0200	8197	8 55	8 55	-1
188198	8 96	-1	-1	-1	-1
189199	8200	8 56	-1	8 56	-1
190199	8200	8198	8 56	8 56	-1
191199	8 97	-1	-1	-1	-1
192201	0202	8 57	-1	8 57	-1
193201	0202	8199	8 57	8 57	-1
194200	8 98	-1	-1	-1	-1
195201	8202	8 58	-1	8 58	-1
196201	8202	8200	8 58	8 58	-1
197201	8 99	-1	-1	-1	-1
198203	0204	8 59	-1	8 59	-1
199203	0204	8201	8 59	8 59	-1
200202	8100	-1	-1	-1	-1
201203	8204	8100	-1	8100	-1
202203	8204	8202	8100	8100	-1
203203	8101	-1	-1	-1	-1
204205	0206	8101	-1	8101	-1
205205	0206	8202	8101	8101	-1
206204	8102	-1	-1	-1	-1
207205	8206	8102	-1	8102	-1
208205	8206	8204	8102	8102	-1
209207	53102	-1	-1	-1	-1
210210	0211	8202	8102	8102	-1
211210	0211	8202	8102	8102	-1
212208	65104	-1	-1	-1	-1
213210	20211	0212	45104	45104	-1
214210	20211	0212	45208	45208	-1
215209	78105	-1	-1	-1	-1
216210	33211	45212	8105	8105	-1
217210	33211	45212	8205	8205	-1

FILE# CCLETT 10 AI VM/SP FEL 2.1 SLU 200

218210	53106	-1	20219	22106	-1
219213	0214	20219	22106	22106	-1
220213	0214	-1	45107	45107	-1
221211	65107	0219	0219	0219	-1
222213	20214	0219	0219	0219	-1
223213	20214	-1	0219	0219	-1
224212	78108	45215	0219	0219	-1
225213	33214	45215	0219	0219	-1
226213	33214	45215	0219	0219	-1
227213	53109	-1	0219	0219	-1
228216	0217	20218	0219	0219	-1
229216	0217	20218	0219	0219	-1
230214	65110	-1	0218	0218	-1
231216	20217	0218	0218	0218	-1
232216	20217	0218	0218	0218	-1
233215	78111	-1	45218	45218	-1
234216	33217	45218	45218	45218	-1
235216	33217	45218	45218	45218	-1
236216	53112	-1	0221	0221	-1
237219	0220	20221	0221	0221	-1
238219	0220	20221	0221	0221	-1
239217	65113	-1	0221	0221	-1
240219	20220	0221	0221	0221	-1
241219	20220	0221	0221	0221	-1
242218	78114	-1	45221	45221	-1
243219	33220	45221	45221	45221	-1
244219	33220	45221	45221	45221	-1
245219	53115	-1	20224	20224	-1
246222	0223	20224	20224	20224	-1
247222	0223	20224	20224	20224	-1
248220	65116	-1	0224	0224	-1
249222	20223	0224	0224	0224	-1
250222	20223	0224	0224	0224	-1
251221	78117	-1	45224	45224	-1
252222	33223	45224	45224	45224	-1
253222	33223	45224	45224	45224	-1
254222	53118	-1	20227	20227	-1
255225	0226	20227	20227	20227	-1

FILEC CCLETI 11 AI VM/SP REL 3.1 SLU 306

256225	0226	26227	32222	33118	-1
257223	65119	-1	45119	-1	
258225	20226	0227	45223	65119	-1
259225	20226	0227			
260224	78120	-1			
261225	33226	45227	C12C	-1	
262225	33226	45227	C224	78120	-1
263228	34121	-1			
264231	0232	15222	19121	-1	
265231	0232	15223	19228	34121	-1
266229	37122	-1			
267231	15232	0233	22122	-1	
268231	15232	0233	22229	37122	-1
269230	41123	-1			
270231	19232	22233	C123	-1	
271231	19232	22233	C23C	41123	-1
272231	34124	-1			
273234	0235	15236	19124	-1	
274234	0235	15236	19231	34124	-1
275232	37125	-1			
276234	15235	0236	22125	-1	
277234	15235	0236	22232	37125	-1
278233	41126	-1			
279234	19235	22226	C126	-1	
280234	19235	22236	C233	41126	-1
281234	34127	-1			
282237	0238	15239	19127	-1	
283237	0238	15239	19234	34127	-1
284235	37128	-1			
285237	15238	0239	22128	-1	
286237	15238	0239	22235	37128	-1
287236	41129	-1			
288237	19238	22239	C129	-1	
289237	19238	22239	C236	41129	-1
290237	34130	-1			
291240	0241	15242	19130	-1	
292240	0241	15242	19237	34130	-1
293238	37131	-1			

294240	15241	C242	22121	-1	37131	-1
295240	15241	C242	22238	-1	37131	-1
296239	41132	-1				
297240	19241	22242	C132	-1		
298240	19241	22242	C239	-1	41132	-1
299240	24132	-1				
300243	0244	15245	15123	-1		
301243	0244	15245	15240	-1	34132	-1
302241	27134	-1				
303243	15244	0245	22124	-1		
304243	15244	C245	22241	-1	37134	-1
305242	41135	-1				
306243	19244	22245	C135	-1		
307243	19244	22245	C242	-1	41135	-1
308243	24136	-1				
309246	0247	15248	15126	-1		
310246	0247	15248	15243	-1	34136	-1
311244	37137	-1				
312246	15247	0248	22137	-1		
313246	15247	0248	22244	-1	37137	-1
314245	41138	-1				
315246	19247	22248	C138	-1		
316246	19247	22248	C245	-1	41138	-1
317249	18139	-1				
318252	0252	7254	11139	-1		
319252	0252	7254	11249	-1	18139	-1
320250	22140	-1				
321252	7253	0254	15140	-1		
322252	7253	0254	15250	-1	22140	-1
323251	26141	-1				
324252	11252	15254	C141	-1		
325252	11252	15254	C251	-1	26141	-1
326252	18142	-1				
327255	0256	7257	11142	-1		
328255	0256	7257	11252	-1	18142	-1
329253	22142	-1				
330255	7256	0257	15143	-1		
331255	7256	0257	15253	-1	22143	-1

370267	11268	15249	0266	26156	-1
371270	8157	-1			
372273	0274	3275	5157	-1	
373273	0274	3275	5270	8157	-1
374271	10158	-1			
375273	3274	0275	7158	-1	
376273	3274	0275	7271	10158	-1
377272	12159	-1			
378273	5274	7275	0159	-1	
379273	5274	7275	0272	12159	-1
380273	8160	-1			
381276	0277	3278	5160	-1	
382276	0277	3278	5273	8160	-1
383274	10161	-1			
384276	3277	0278	7161	-1	
385276	3277	0278	7274	10161	-1
386275	12162	-1			
387276	5277	7278	0162	-1	
388276	5277	7278	0275	12162	-1
389276	8163	-1			
390279	0280	3281	5163	-1	
391279	0280	3281	5276	8163	-1
392277	10164	-1			
393279	3280	0281	7164	-1	
394279	3280	0281	7277	10164	-1
395278	12165	-1			
396279	5280	7281	0165	-1	
397279	5280	7281	0278	12165	-1
398279	8166	-1			
399282	0283	3284	5166	-1	
400282	0283	3284	5279	8166	-1
401280	10167	-1			
402282	3283	0284	7167	-1	
403282	3283	0284	7280	10167	-1
404281	12168	-1			
405282	5283	7284	0168	-1	
406282	5283	7284	0281	12168	-1
407282	8169	-1			

408285	0286	3287	5169	-1	5169
409285	0296	3287	5282	-1	5282
410283	10170	-1			
411285	3286	0287	7170	-1	7170
412285	3286	0287	7283	-1	7283
413284	12171	-1			
414285	5286	7287	C171	-1	C171
415285	5286	7287	C284	-1	C284
416285	8172	-1			
417288	0289	3290	5172	-1	5172
418288	0289	3290	5285	-1	5285
419286	10173	-1			
420288	3289	C290	7173	-1	7173
421288	3289	C290	7286	-1	7286
422287	12174	-1			
423288	5289	7290	G174	-1	G174
424288	5289	7290	C287	-1	C287
425291	29175	-1			
426294	0295	12296	17175	-1	17175
427294	0295	12296	17291	-1	17291
428292	33176	-1			
429294	12295	0296	21176	-1	21176
430294	12295	C296	21292	-1	21292
431293	38177	-1			
432294	17295	21296	C177	-1	C177
433294	17295	21296	C293	-1	C293
434294	29178	-1			
435297	0298	12299	17178	-1	17178
436297	0298	12299	17294	-1	17294
437295	33179	-1			
438297	12298	0299	21179	-1	21179
439297	12298	0299	21295	-1	21295
440296	38180	-1			
441297	17298	21299	C180	-1	C180
442297	17298	21299	C296	-1	C296
443297	29181	-1			
444300	0301	12302	17181	-1	17181
445300	0301	12302	17297	-1	17297

FILEC CCLE1 16 A1 VM/SP REL 3.1 SLU PC6

446298	33182	-1	C3C2	21182	-1	21182	-1
447300	12301		C3C2	21298		21298	1
448300	12301		C3C2				
449299	38182	-1					
450300	17301	21302		C182	-1	38182	-1
451300	17301	21302		C299			
452300	29184	-1					
453303	0304	12305		17184	-1	29184	-1
454303	0304	12305		17300			
455301	33185	-1					
456303	12304	C3C5		21185	-1	33185	-1
457303	12304	C3C5		21301			
458302	38186	-1					
459303	17304	21305		C186	-1	38186	-1
460303	17304	21305		C3C2			
461303	29187	-1					
462306	0307	12308		17187	-1	29187	-1
462306	0307	12308		17302			
464304	33188	-1					
465306	12307	C3C8		21188	-1	33188	-1
466306	12307	C3C8		21304			
467305	28189	-1					
468306	17307	21308		C189	-1	28189	-1
469306	17307	21308		C3C5			
470306	29190	-1					
471309	0310	12311		17190	-1	29190	-1
472309	0310	12311		17306			
473307	33191	-1					
474309	12310	0311		21191	-1	33191	-1
475309	12310	0311		21307			
476308	38192	-1					
477309	17310	21311		C192	-1	38192	-1
478309	17310	21311		C3C8			

655955599

0

APÊNDICE 4 - EXEMPLO 2. SAÍDA DE RESULTADOS DO
"LAND AND POWELL". SOLUÇÃO ÓTIMA.

