

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA


RACIONALIZAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DA  
SUPERESTRUTURA FERROVIÁRIA E  
CAMADA FINAL DE TERRAPLENAGEM

POR

JOSÉ JULIO PRATA GOMES

TESE SUBMETIDA  
COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
MESTRE EM CIÊNCIAS  
EM TRANSPORTES

Assinatura do Orientador da Tese



---

MARIA CRISTINA FOGLIATTI DE SINAY, Ph.D.

Rio de Janeiro

Março, 1984

À minha mãe  
Lucia

## AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Militar de Engenharia (IME) e à Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes (GEIPOT), pela realização do Programa de Pós-Graduação em Transportes.

À Seção de Engenharia de Construção (SE/2 - IME).

Ao Eng<sup>o</sup> Elianô Moreira de Souza, Presidente da EN GEFER que, grande incentivador do aperfeiçoamento de seus engenheiros, indicou-me para o Curso de Pós-Graduação do IME.

À Prof<sup>a</sup> Maria Cristina Fogliatti de Sinay pelo apoio e orientação correta e segura no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Eng<sup>o</sup> Sergio Misse pela significativa orientação no desenvolvimento do tema, experiência e estímulo demonstrado em todas as fases deste Curso, sendo como professor ou como co-orientador.

Aos Eng<sup>os</sup> Fernando L.C. Mac Dowell da Costa e Carlos Alceu Rodrigues pela contribuição na elucidação de dúvidas e conceitos relativos ao tema deste trabalho.

Ao Eng<sup>o</sup> José Figueiredo de Castro, pela demonstração de confiança, em me propor como candidato ao Curso.

Aos Eng<sup>os</sup>. Horácio Madureira e Norton da Costa Chaves pelo apoio no decorrer do Curso.

Aos companheiros Eng<sup>os</sup> Osiris Fernandes e Heitor -  
Moreira, pelo incentivo e pela motivação.

Ao Eng<sup>o</sup> Sergio Stopatto, grande mestre da Superestrutura Ferroviária, pelo exemplo e conhecimento.

Aos companheiros da ENGEFER pelo interesse, vibração, estímulo e apoio técnico.

Aos amigos do GEIPOT pelo incentivo, colaboração e empréstimo de seus acervos pessoais no interesse de enriquecer este trabalho.

Aos colegas da CVRD pela contribuição dada no levantamento da bibliografia e dados necessários.

Aos funcionários das Bibliotecas da ENGEFER, RFFSA, CVRD e GEIPOT pela ajuda sempre interessada e amável durante as pesquisas bibliográficas.

À Srta Mari Reis de Moraes da ENGEFER, Lelivaldo Marques Barreto do IME e José Carlos Gotelip Feijó de Melo da ENGEFER pela presteza e qualidade na datilografia e desenhos deste e de todos os outros trabalhos desenvolvidos ao longo do Curso.

A meus amigos e colegas de Curso pela união, identidade e companheirismo.

Aos professores e funcionários da Seção de Engenharia de Construção - SE/2 - CPTRAN.

E a todos aqueles, e que são muitos, que contribuíram positivamente, direta e indiretamente para a realização deste trabalho, o meu reconhecimento e gratidão.

## SINOPSE

O presente trabalho tem por objetivo fornecer ao meio técnico um instrumento prático para racionalizar o dimensionamento do conjunto superestrutura ferroviária e camada final de terraplenagem, independente da metodologia empregada para determinação do custo total anual e para o cálculo dos esforços e pressões que atuam nesse conjunto, associando os aspectos técnicos aos econômicos.

Para atingir esse objetivo foi criado um modelo matemático de dimensionamento e um procedimento de racionalização das etapas envolvidas nesse processo e foi desenvolvido um programa para computador em linguagem Fortran que, empregando as técnicas de otimização de Hooke e Jeeves associado ao Método das Penalidades, permite a resolução numérica.

Para demonstrar a utilização do modelo e procedimento foram desenvolvidas duas aplicações práticas, uma para ferrovia de transporte metropolitano e outra de carga.

Finalmente conclusões sobre as potencialidades do trabalho foram extraídas assim como sugestões para futuros estudos apresentadas.

## ABSTRACT

The purpose of this work is to develop a rational scheme to dimension the so-called "track structure and foundation" set, that would be of practical use for technicians in this area. The proposed scheme would have to be independent of the methodologies selected to represent the total annual cost in services and materials and to determine the stresses and would have to associate technical and economical aspects.

To achieve that purpose a mathematical model and a procedure to rationalize the steps involved in dimensioning were created and a computer program in Fortran language was developed. With this, associating the Hooke and Jeeves optimization technique with the Penalty Method numerical results were obtained for specific problems.

Two practical applications were developed, one for metropolitan and the other for cargo railways.

Finally, conclusions about the work potentialities were made as well as suggestions for future studies were presented.

## LISTA DE QUADROS

|            |  |    |
|------------|--|----|
| QUADRO 1:  | Características Operacionais   | 36 |
| QUADRO 2:  | Características Planimétricas  | 37 |
| QUADRO 3:  | Características Altimétricas   | 37 |
| QUADRO 4:  | Características dos Materiais Seleccionados para a Camada Final de Teraplenagem e Sub-lastro | 38 |
| QUADRO 5:  | Versões do Programa Penal  | 42 |
| QUADRO 6:  | Dados de Entrada - PENALIN   | 44 |
| QUADRO 7:  | Resultados - PENAL 1   | 52 |
| QUADRO 8:  | Resultados - PENAL 2   | 53 |
| QUADRO 9:  | Resultados - PENAL 3   | 54 |
| QUADRO 10: | Características Operacionais   | 56 |
| QUADRO 11: | Características Planimétricas  | 56 |
| QUADRO 12: | Características Altimétricas   | 57 |
| QUADRO 13: | Características dos Materiais Seleccionados para a Camada Final de Teraplenagem e Sub-lastro | 57 |



|            |  |    |
|------------|--|----|
| QUADRO 14: | Condições Iniciais   | 58 |
| QUADRO 15: | Restrições de Projeto                                      | 58 |
| QUADRO 16: | Dados de Entrada - PENALIN                                 | 61 |
| QUADRO 17: | Resultados - PENAL 1                                       | 62 |
| QUADRO 18: | Resultados - PENAL 2                                       | 63 |
| QUADRO 19: | Resultados - PENAL 3                                       | 64 |
| QUADRO 20: | Versões do Programa Penal                                  | 80 |
| QUADRO 21: | Arquivo PENALIN  | 84 |
| QUADRO 22: | Resultados Parciais - PENALOUT                             | 88 |
| QUADRO 23: | Custos Unitários - Transporte<br>Ferroviário Metropolitano | 90 |
| QUADRO 24: | Custos Unitários - Transporte<br>Ferroviário de Carga      | 93 |
| QUADRO 25: | Avaliação da Vida Útil do Materiais<br>e Serviços          | 96 |

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Pressões Geradas pelo Lastro nas Camadas Subjacentes | 16 |
| Figura 2: Fluxograma do Procedimento                           | 30 |
| Figura 3: Seção Transversal tipo - Trem Metropolitanano        | 40 |
| Figura 4: Seção Transversal tipo - Trem de Carga               | 59 |
| Figura 5: Programa Penal - Diagrama de Blocos                  | 81 |

## SIMBOLOGIA

|         |   |
|---------|---|
| ENGEFER | - Empresa de Engenharia Ferroviária S.A.            |
| RFESA   | - Rede Ferroviária Federal S.A.                     |
| CVRD    | - Companhia Vale do Rio Doce S.A.                   |
| IME     | - Instituto Militar de Engenharia                   |
| ENEFER  | - Enefer - Consultoria e Projetos Ltda              |
| AREA    | - American Railway Engineering Association          |
| GEIPOT  | - Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes |
| Cr\$    | - Cruzeiros   |
| km      | - Quilômetro  |
| m       | - Metro   |
| cm      | - Centímetro  |
| mm      | - Milímetro   |
| v       | - Velocidade  |
| h       | - Hora  |
| lb      | - Libra   |

jd - Jarda

un - Unidade

t - Tonelada

kg - Quilograma

MTBA - Milhões de toneladas brutas americanas ("short-ton")

MTB - Milhões de toneladas brutas

% - Porcentagem

TUE - Trem Unidade Elétrico

## INDICE

|   |     |
|---|-----|
| SUMÁRIO   | v   |
| ABSTRACT  | vi  |
| LISTA DE QUADROS  | vii |
| LISTA DE ILUSTRAÇÕES                                      | ix  |
| SIMBOLOGIA  | x   |
| <br>  |     |
| I - INTRODUÇÃO  | 1   |
| 1.1 - Considerações Gerais e Objetivo                     | 1   |
| 1.2 - Descrição do Trabalho                               | 3   |
| <br>  |     |
| II - A SUPERESTRUTURA FERROVIÁRIA                         | 6   |
| 2.1 - Considerações Gerais                                | 6   |
| 2.2 - O Dimensionamento da Superestrutura                 | 6   |
| 2.2.1 - Cálculo dos Esforços que Atuam na Via             | 7   |
| 2.2.2 - Dimensionamento do Lastro e Sub-Lastro            | 11  |
| 2.2.2.1 - Lastro  | 11  |
| 2.2.2.2 - Sub-lastro e Camada Final de Terra-<br>plenagem | 14  |
| 2.3 - Considerações Finais                                | 18  |
| <br>  |     |
| III - O MODELO  | 19  |
| 3.1 - Considerações Preliminares                          | 19  |
| 3.2 - O Modelo  | 20  |

|  |    |
|--|----|
| 3.2.1 - Variáveis de Decisão                                       | 20 |
| 3.2.2 - Condições de Contorno                                      | 20 |
| 3.2.3 - Estrutura do Modelo  | 24 |
| 3.2.4 - Algoritmo Numérico   | 26 |
| 3.2.4.1 - Método das Penalidades                                   | 27 |
| 3.2.4.2 - O Programa Penal   | 27 |
| 3.3 - O Procedimento   | 28 |
| 3.3.1 - Identificação das Condicionantes Básicas do Projeto        | 30 |
| 3.3.2 - Análise das Disponibilidades de Mercado                    | 31 |
| 3.3.3 - Identificação das Disponibilidades do Sítio de Implantação | 31 |
| 3.3.4 - Estabelecimento das Condições Iniciais                     | 31 |
| 3.3.5 - Seleção das Metodologias                                   | 32 |
| 3.3.6 - Elaboração das Alternativas                                | 33 |
| 3.3.7 - Aplicação do Modelo  | 33 |
| 3.3.8 - Avaliação dos Resultados                                   | 33 |
| <br>   |    |
| IV - APLICAÇÃO PRÁTICA   | 35 |
| 4.1 - Considerações Preliminares                                   | 35 |
| 4.2 - Desenvolvimento dos Exemplos                                 | 35 |
| 4.2.1 - Trem Metropolitano   | 35 |
| 4.2.1.1 - Identificação das Condicionantes Básicas do Projeto      | 36 |
| 4.2.1.2 - Identificação das Disponibilidades de Mercado            | 37 |

|  |        |
|--|--------|
| 4.2.1.3 - Identificação das Disponibilidades<br>do Sítio de Projeto      | 38     |
| 4.2.1.4 - Estabelecimento das Condições Iniciais                         | 39     |
| 4.2.1.5 - Seleção das Metodologias                                       | 39     |
| 4.2.1.6 - Elaboração das Alternativas                                    | 42     |
| 4.2.1.7 - Aplicação do Modelo  | 43     |
| 4.2.1.8 - Avaliação dos Resultados                                       | 51     |
| 4.2.2 - Trem de Carga  | 55     |
| 4.2.2.1 - Identificação das Condicionantes Básicas do Projeto            | 55     |
| 4.2.2.2 - Identificação das Disponibilidades<br>do Sítio de Projeto      | 57     |
| 4.2.2.3 - Estabelecimento das Condições Iniciais                         | 58     |
| 4.2.2.4 - Elaboração das Alternativas                                    | 58     |
| 4.2.2.5 - Aplicação do Modelo  | 60     |
| 4.2.3 - Considerações Finais   | 60     |
| <br>V - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES                                       | <br>66 |
| 5.1 - Conclusões   | 66     |
| 5.2 - Recomendações  | 68     |
| <br>APÊNDICE A - Listagem do Programa Penal                              | <br>69 |
| <br>APÊNDICE B - Programa Penal  | <br>79 |
| <br>APÊNDICE C - Custos Unitários - Transporte Ferroviário Metropolitano | <br>90 |

|  |     |
|--|-----|
| APÊNDICE D - Custos Unitários - Transporte Ferro-<br>viário de Carga | 93  |
| APÊNDICE E - Avaliação da Vida Útil dos Materiais<br>e Serviços      | 96  |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS   | 101 |



## CAPITULO I

### INTRODUÇÃO

#### 1.1 - Considerações Gerais e Objetivo

A base de todo planejamento está fundamentada nos preceitos técnicos e econômicos para determinação de projetos viáveis que representem o menor custo de implantação, manutenção e operação ao longo de sua vida útil.

No contexto atual de recessão e escassez de recursos, as entidades de financiamento tornam-se cada vez mais exigentes na avaliação dos projetos que lhes são submetidos, fazendo com que o fator custo seja de primordial importância nas decisões que levam a implementação dos mesmos.

Os conceitos para a elaboração de um projeto de engenharia evoluíram. As técnicas tornaram-se mais apuradas. Processos e métodos foram implementados para garantir a otimização dos meios empregados. A adequação do projeto às condicionantes econômicas e financeiras tornou-se então imperiosa. Diante disso, as soluções de aproveitamento máximo dos recursos naturais disponíveis em cada sítio de implantação, com vistas a redução do custo total do empreendimento, passaram a ser obrigatórias.

Na área dos transportes, particularmente na ferro

viária, os investimentos iniciais são de grande vulto e de inversão a longo prazo. Em vista disso, atenção especial tem sido dedicada a todas as atividades envolvidas na construção, manutenção e operação com o intuito de aumentar a eficácia do empreendimento na recuperação do investimento realizado. Com esse procedimento, o setor ferroviário passa a ter maiores possibilidades de disputar mais competitivamente os recursos alocados no setor dos transportes.

A engenharia ferroviária no Brasil tem experimentado sensível aprimoramento a partir do ressurgimento dessa atividade em fins da década de 60: a tecnologia estrangeira foi assimilada e vem sendo convenientemente adaptada às características nacionais.

Entretanto, alguns sub-sistemas, como o de projeto da superestrutura ferroviária, ainda carecem de estudos mais aprofundados com vistas a adequação dos procedimentos de dimensionamento ao novo conceito de otimização.

Considerando que todas as metodologias para dimensionamento da superestrutura ferroviária são processos diretos de cálculo de esforços e de reações, torna-se necessário que os engenheiros de projeto ou planejadores disponham de uma ferramenta técnica que os auxilie na tarefa de racionalizar a aplicação dessas metodologias levando em conta os aspectos econômicos envolvidos.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um instrumento capaz de associar os aspectos técnicos aos econômicos do dimensionamento do conjunto superestrutura ferroviária e camada final de terraplenagem através de um modelo matemático.

O tema escolhido também justifica-se pelas seguintes razões:

- se enquadrar na linha de pesquisa "Racionalização dos Sistemas de Transportes Ferroviário de Carga", atualmente em desenvolvimento no IME;

- estar em concordância com as diretrizes do III PBDCT, TRANSPORTES, as quais recomendam a "realização de estudos e pesquisas para o desenvolvimento de técnicas e metodologias de projeto, implantação, melhoria e conservação de vias e rotas, visando a redução de custos e de consumo de combustíveis (...)"

- e atender a preocupação da ENGEFER, empresa dedicada ao estudo, projeto e implantação de obras ferroviárias, no que se refere à qualidade e precisão dos projetos.

## 1.2 - Descrição do Trabalho

O trabalho é desenvolvido em cinco capítulos e cinco apêndices cujos conteúdos descrevem-se a seguir:

No Capítulo II, é apresentada uma revisão bibliográfica relativa às metodologias de dimensionamento da superestrutura ferroviária e os principais elementos e esforços que atuam nesse sistema são descritos.

No Capítulo III, é apresentado o modelo matemático que formaliza o processo do dimensionamento do conjunto superestrutura ferroviária e camada final de terraplenagem. Esse modelo, associado a um algoritmo de resolução, proporciona a determinação dos valores das variáveis de decisão do dimensionamento que conduzem à configuração de menor custo total anual de investimento e manutenção para o conjunto superestrutura ferroviária e camada final de terraplenagem.

Para consolidar a aplicação desse modelo, no mesmo capítulo é formulado um procedimento para racionalização das etapas envolvidas no projeto desse conjunto. É recomendado um algoritmo assim como apresentado um programa de computador para aplicações práticas do modelo.

Para compreensão do mesmo e do procedimento, no Capítulo IV, são desenvolvidas duas aplicações práticas, sendo uma para trem metropolitano e outra para trem de carga.

No último capítulo apresentam-se as conclusões sobre o trabalho e, complementarmente, algumas sugestões e recomendações para futuros estudos.

Nos apêndices são apresentados a listagem e descrição do programa desenvolvido, a composição de custos unitários e a determinação da vida útil dos materiais empregados na aplicação prática.

## CAPÍTULO II

### A SUPERESTRUTURA FERROVIÁRIA

#### 2.1 - Considerações Gerais

Como pretende-se desenvolver um modelo para racionalização do dimensionamento do conjunto superestrutura ferroviária e camada final de terraplenagem com base nas teorias de distribuição de esforços e pressões do sistema, neste capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica sucinta do tema "Dimensionamento da Superestrutura Ferroviária". Serão apresentadas algumas das mais importantes metodologias de cálculo em face de não se pretender esgotar o assunto como tampouco ser específico e detalhista na descrição daquelas.

Quanto a simbologia e unidades das equações apresentadas procurar-se-á manter a compatibilidade com a nomenclatura adotada na respectiva referência bibliográfica.

#### 2.2 - O Dimensionamento da Superestrutura

Inúmeras são as metodologias ou processos para o dimensionamento da superestrutura ferroviária. Formuladas a partir da análise teórica do sistema ou através da verificação prática ou experimental a diversidade dos resultados obtidos da aplicação dessas metodologias refletem o comportamento quasi-aleatório dos seus elementos.

Como pode-se verificar na prática o dimensionamento da superestrutura está dividido em duas fases distintas:

- a primeira consta da determinação dos esforços e reações que atuam no sub-conjunto trilho-dormente tais como o momento fletor que atua no trilho, a deformação provocada na grade e a pressão gerada na interface dos dormentes com o lastro;

- a segunda consta da determinação das pressões transmitidas às camadas subjacentes ao lastro e da verificação de que esses valores não ultrapassem as pressões máximas admissíveis pelos materiais de que são constituídas.

Apresentam-se a seguir os principais teorias e equações empregadas nessas duas fases do dimensionamento da superestrutura ferroviária.

### 2.2.1 - Cálculo dos Esforços que Atuam na Via

A primeira tentativa para cálculo dos esforços que atuam na superestrutura da via surgiu com ZIMMERMANN<sup>1</sup>, no final do século passado, a partir da hipótese formulada por WINKLER<sup>1</sup> sobre a proporcionalidade existente entre a aplicação de uma pressão, P, e o respectivo recalque, y, traduzido pelo coeficiente de lastro, C, ou coeficiente de WINKLER, ou seja:

$$C = \frac{P}{y} \quad (1)$$

ZIMMERMANN<sup>1</sup> supõe em seu modelo que o trilho esteja repousado sobre uma viga longitudinal (dormente longitudinal) de largura  $b$  sobre apoios elásticos e discretos, espaçados uniformemente, sob a ação de uma carga pontual  $Q$ .

Alguns anos depois, TIMOSHENKO<sup>1</sup> com base nesse modelo inicial, adaptou as expressões deduzidas por ZIMMERMANN para a situação de trilhos apoiados sobre dormentes transversais, estabelecendo a equivalência entre a área de apoio do dormente longitudinal e o transversal.

Essas novas expressões, são apresentadas a seguir:

. Momento Fletor do Trilho,  $M$

$$M = \frac{Q \cdot L}{4} \cdot e^{-\frac{x}{L}} \left[ \cos \frac{x}{L} - \operatorname{sen} \frac{x}{L} \right] \quad (2)$$

. Deformação Elástica da Via,  $y$

$$y = \frac{Q \cdot d}{2F_d \cdot C \cdot L} \cdot e^{-\frac{x}{L}} \left[ \cos \frac{x}{L} + \operatorname{sen} \frac{x}{L} \right] \quad (3)$$

. Pressão na Face Inferior do Dormente,  $P_o$

$$P_o = \frac{Q \cdot d}{2F_d \cdot L} \cdot e^{-\frac{x}{L}} \left[ \cos \frac{x}{L} + \operatorname{sen} \frac{x}{L} \right] \quad (4)$$

sendo

$d$  = o espaçamento entre eixos dos dormentes;



$F_d$  = a área sob um apoio do dormente;

$x$  = a distância das cargas vizinhas do ponto de aplicação da carga considerada;

$L$  = o comprimento da viga elástica;

sendo

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI_d}{C \cdot F_d}} \quad (5)$$

$E$  = o módulo de elasticidade do aço;

$I$  = o momento de inércia do trilho.

Ao final da segunda década deste século iniciaram-se os trabalhos de pesquisas e instrumentação da via do "Special Committee on Stresses in Railroad Track"<sup>2</sup>, sob a direção do Professor A.N. TALBOT para estudar o comportamento da superestrutura ferroviária.

TALBOT<sup>2</sup> iniciou os seus estudos a partir do levantamento do estado da arte. Tomando como base o modelo de Zimmermann da via sobre dormentes longitudinais e a expressão (1), TALBOT criou o conceito do Módulo da Via.

O Módulo da Via,  $U$ , representa a carga linear, uniformemente distribuída por unidade de comprimento,  $P$ , que atua sobre o trilho e que provoca um recalque,  $y$ , neste igual a um valor unitário de comprimento, ou seja:

$$U = \frac{P}{y} \quad (6)$$

Analogamente a Zimmermann, Talbot<sup>2</sup> deduziu as seguintes expressões:

. Momento Fletor do Trilho, M

$$M = Q \cdot \sqrt[4]{\frac{E \cdot I}{64U}} \cdot e^{\frac{-x}{L}} \cdot \left[ \cos \frac{x}{L} - \operatorname{sen} \frac{x}{L} \right] \quad (7)$$

. Deformação Elástica da Via, y

$$y = \frac{Q}{\sqrt[4]{64 E \cdot I \cdot U^3}} \cdot e^{\frac{-x}{L}} \cdot \left[ \cos \frac{x}{L} + \operatorname{sen} \frac{x}{L} \right] \quad (8)$$

. Carga Distribuída sobre o Dormente,  $q_0$

$$q_0 = Q \cdot \sqrt[4]{\frac{U}{64 E \cdot I}} \cdot e^{\frac{-x}{L}} \cdot \left[ \cos \frac{x}{L} + \operatorname{sen} \frac{x}{L} \right] \quad (9)$$

estando L definido por:

$$L = \sqrt[4]{\frac{4E \cdot I}{U}} \quad (10)$$

Da equação (9) pode-se deduzir a pressão produzida na face inferior do dormente,  $P_0$ ,

$$P_0 = \frac{Q \cdot d}{F_d} \sqrt[4]{\frac{U}{64E \cdot I}} \cdot e^{\frac{-x}{L}} \cdot \left[ \cos \frac{x}{L} + \operatorname{sen} \frac{x}{L} \right] \quad (11)$$

## 2.2.2 - Dimensionamento do Lastro e Sub-Lastro

### 2.2.2.1 - Lastro

Na constituição da superestrutura da via o lastro responde por uma das mais importantes parcelas na função fundamental de distribuir os esforços e de estabelecer o grau de rigidez da via.

Por este papel significativo do comportamento do lastro, várias teorias com base nas mais diferentes correlações, quer estruturais, quer geotécnicas, foram elaboradas para explicar, através de modelos, a sua mecânica.

Alinham-se a seguir algumas das equações mais representativas para a avaliação da taxa de distribuição da pressão transmitida pelo lastro à camada subjacente a partir da pressão gerada na interface dormente-lastro.

SCHRAMM<sup>3</sup> admite que as pressões no lastro se propagam segundo uma linha de espraiamento inclinada a um ângulo  $\epsilon$  a partir do eixo vertical do plano vertical que secciona a via nos sentidos transversal e longitudinal. O valor de  $\epsilon$  é estabelecido segundo o tipo, estado e condições de umidade do lastro, sendo:

$\epsilon = 40^\circ$  para lastro grosso, áspero e seco;

$\epsilon = 30^\circ$  para lastro fino, liso e úmido.

Como valor médio é recomendado adotar  $\epsilon = 36^\circ$ .

A pressão,  $P_h$ , transmitida pela altura  $h$  de lastro à plataforma, é uma função da carga máxima sobre um apoio do trilho,  $S$ , do comprimento  $L$ , e largura,  $b$ , do dormente e da distância entre eixos dos trilhos,  $s$ , e é dada pela expressão:

$$P_h = \frac{1,5S}{[3(L-s) + b] h + \tan \epsilon} \quad (12)$$

. A ÁREA<sup>4</sup> recomenda as seguintes equações para a determinação de pressão transmitida pelo lastro:

a) TALBOT

$$P_h = \frac{53,87 P_o}{h^{1,25}} \quad (13)$$

b) JAPAN NATIONAL RAILWAYS - J.N.R.

$$P_h = \frac{50 P_o}{10 + h^{1,35}} \quad (14)$$

c) BOUSSINESQ

$$P_h = \frac{3Q_o}{2\pi h^2} = \frac{0.477 Q_o}{h^2} \quad (15)$$

sendo  $Q_o$  a carga concentrada aplicada sobre metade do dormente.

d) LOVE

$$P_h = P_o \left[ 1 - \frac{1}{1 + \frac{r^2}{h^2}} \right]^{3/2} \quad (16)$$

sendo  $r$  o raio do círculo equivalente a área retangular efetiva de apoio do dormente sob um trilho, em cm.

Observação: as fórmulas (13) e (14) são válidas para unidades métricas.

. EISENMANN<sup>5</sup> em sua teoria de distribuição de pressões em um sistema bicapa propõe para o cálculo da pressão sobre a plataforma a utilização da seguinte equação:

$$P_h = \frac{2P_o}{\pi} \left( \text{arc tan } \frac{a}{h} + \frac{a \cdot h}{a^2 + h^2} \right) \quad (17)$$

sendo  $a = \frac{b}{2}$  = semi-largura do dormente

$$h = 0,9 \times h_o \times \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}} \quad (18)$$

onde  $h$  - a altura equivalente do lastro devido a teoria do espaço elástico;

$h_o$  - altura efetiva de lastro;

$E_1$  e  $E_2$  - módulos de elasticidade do lastro e da fundação respectivamente.

#### 2.2.2.2 - Sub-lastro e Camada Final de Terraplenagem

O sub-lastro e camada final de terraplenagem constituem a fundação de toda a via permanente assente sobre maciço terroso. Considerada por muitos como o limite superior da infra-estrutura, a camada final de terraplenagem ou subleito, representa o componente de maior responsabilidade pelo sucesso do comportamento da superestrutura ferroviária.

A perfeita identificação das características geotécnicas e mecânicas do material a ser utilizado na confecção da camada final de terraplenagem e sub-lastro proporcionará um dimensionamento adequado do sistema fundação.

O tratamento a ser dado ao dimensionamento do sublastro será o mesmo da camada final de terraplenagem em face de suas semelhanças granulométricas e mecânicas.

#### . Determinação da Pressão Admissível

A determinação da pressão admissível dos materiais que compõem a camada final de terraplenagem e o sublastro pode ser feita com base em:

- ensaios triaxiais de carga cíclica;

- CBR;
- módulo de elasticidade.

A pressão admissível será determinada pelas correlações estabelecidas por Heukelom<sup>6,7</sup>:

$$\sigma_p = \frac{0.006 E_d}{1 + 0.7 \log N} \quad (19)$$

sendo

$$E_d = 100 \text{ CBR} \quad (20)$$

onde

$\sigma_p$  - a pressão admissível do material;

$E_d$  - o módulo de elasticidade dinâmico do material e

$N$  - o número de toneladas brutas anuais<sup>5</sup>.

OBS: Eisemann<sup>1,8</sup> adota  $N = 2 \cdot 10^6$

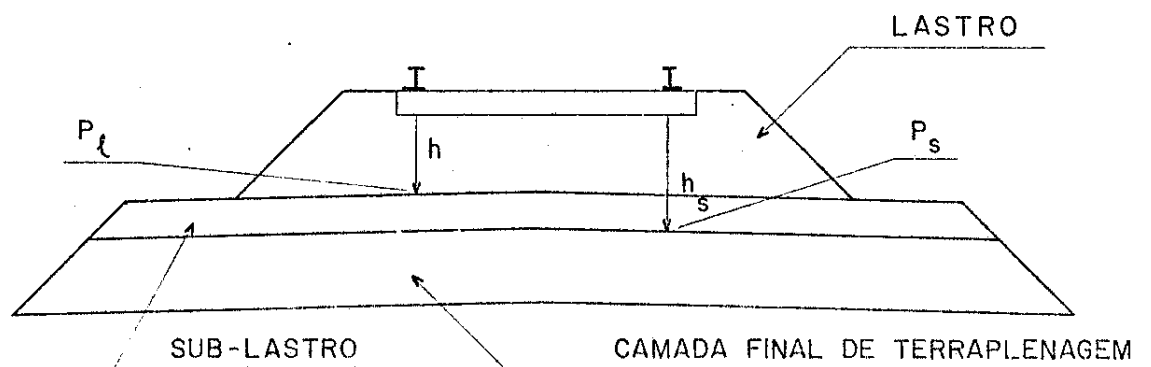
#### . Distribuição dos Esforços na Fundação

Várias teorias da mecânica dos solos podem ser aplicadas ao estudo da distribuição dos esforços na fundação da superestrutura. Em particular pode-se adotar a Teoria Elástica de Boussinesq<sup>9</sup> para a avaliação das pressões geradas ao longo do conjunto formado pelo sub-lastro e camada final de terraplenagem.

Esta teoria quando aplicada a este caso assume que o conjunto seja um espaço semi-infinito, elástico, homogêneo e isótropo solicitado por uma pressão transmitida por uma camada de lastro de altura  $h$ .

Assim, tem-se, conforme mostrado na Figura 1, uma pressão  $P_\ell$  atuando a uma profundidade  $h$  sobre o sub-lastro e outra  $P_s$  solicitando a camada final de terraplenagem a uma profundidade  $h_s$  da mesma origem.

Figura 1: Pressões geradas pelo lastro nas camadas subjacentes



Aplicando-se a Teoria Elástica de Boussinesq obtêm-se a seguinte relação:

$$\frac{P_\ell}{P_s} = \frac{h_s^2}{h^2} \quad (21)$$

Admitindo-se que as pressões geradas sejam equi-



valentes às admissíveis pelos extratos subjacentes e adotando-se a formulação de Heukelom<sup>6,7</sup> obtêm-se:

$$P_{\ell} = \sigma_{P_s} \quad (22)$$

e

$$P_s = \sigma_{P_{cft}} \quad (23)$$

sendo

$\sigma_{P_s}$  = pressão admissível do sub-lastro e

$\sigma_{P_{cft}}$  = pressão admissível da camada final de terraplenagem.

Como para a determinação da pressão admissível do sub-lastro e da camada final de terraplenagem o valor de  $N$  é o mesmo, a relação  $P_{\ell}/P_s$  pode ser escrita como:

$$\frac{CBR_s}{CBR_{cft}} = \frac{h_s^2}{h^2} \quad (24)$$

sendo

$CBR_s$  - o índice suporte do sub-lastro e

$CBR_{cft}$  - o índice suporte da camada final de terraplenagem.

### 2.3 - Considerações Finais

Sobre o tema Superestrutura Ferroviária vale ressaltar os seguintes comentários:

. o estado da arte da superestrutura da via está fundamentada em estudos e pesquisas realizadas essencialmente em ferrovias de bitola normal (1435 mm).

. todas as teorias e equações representativas do comportamento da superestrutura da via são formuladas a partir de hipóteses ideais para caracterizar o sistema. Os valores obtidos da aplicação dessas teorias não são medidas exatas dos eventos que se está avaliando sendo, no entanto, suficientemente válidos para representar o comportamento mecânico do sistema.

## CAPÍTULO III

### O MODELO

#### 3.1 - Considerações Preliminares

Como foi mencionado no Capítulo I o meio técnico carece de um instrumento racional que lhe permita otimizar o dimensionamento do conjunto superestrutura ferroviária e camada final de terraplenagem com base na associação dos aspectos técnicos aos econômicos envolvidos nesse processo.

Por otimização do dimensionamento desse conjunto entende-se aquele que, além de satisfazer restrições que dizem respeito às condições técnicas impostas para o projeto, proporcione a minimização do custo total anual por unidade de comprimento,  $C_t$ , relativo ao investimento e manutenção dos materiais e serviços que o compõem.

Será objetivo deste capítulo formular um modelo matemático representativo do dimensionamento do conjunto superestrutura ferroviária e camada final de terraplenagem que, associado a um procedimento de racionalização das etapas envolvidas nesse trabalho, permita ao projetista determinar a configuração de menor custo total anual a partir da representação analítica da função custo desejada. Para a consecução desse objetivo torna-se necessário que as variáveis de decisão e as condições de contorno que modelam o dimensionamento sejam identificadas e equacionadas.

### 3.2 - O Modelo

#### 3.2.1 - Variáveis de Decisão

A função custo a ser otimizada dependerá de variáveis independentes chamadas de decisão. Como pretende-se formular o modelo a partir das teorias de esforços e pressões no sistema e independente da metodologia empregada, foram escolhidos como variáveis de decisão os seguintes parâmetros:

- . espaçamento dos dormentes ( $d$ ): medida entre eixos de dois dormentes consecutivos;

- . área de apoio do dormente ( $F_d$ ): área pela qual é transmitida ao lastro as pressões geradas pelo carregamento;

- . capacidade de suporte da fundação (CBR): índice que caracteriza a capacidade de suporte dos materiais das camadas final de terraplenagem e sub-lastro.

A decisão recaiu nessas variáveis por elas serem comuns a todas as metodologias apresentadas no Capítulo II, por serem variáveis básicas do dimensionamento e fundamentalmente por influenciarem diretamente no custo anual dos materiais e serviços.

#### 3.2.2 - Condições de Contorno

As condições de contorno que regulam o dimensioname

mento do conjunto superestrutura ferroviária e camada final de terraplenagem podem ser classificadas em:

. Restrições Mecânicas - aquelas que caracterizam o comportamento mecânico do sistema em termos de distribuição de esforços e,

. Restrições Estruturais - aquelas que definem estruturalmente a configuração do sistema de assentamento lastro/sub-lastro/camada final de terraplenagem.

Apresentam-se a seguir as principais condições de contorno que intervêm no dimensionamento da via.

. Restrições Mecânicas

A pressão atuante sob o dormente, é função de diversas variáveis e, como pode ser visto no Capítulo II, ela pode ser representada, independentemente da metodologia empregada por

$$P_o = g (Q_d, d, F_d, C, E, I) \quad (25)$$

sendo

$$Q_d = f (Q_i, k, \mu_i) \quad (26)$$

onde

$Q_d$  = carga dinâmica por roda;

$Q_i$  = carga estática, por roda, de ordem  $i$  do trem-tipo de projeto;

$k$  = coeficiente de impacto dinâmico determinado a partir da velocidade máxima operacional;

$\mu_i$  = hiperestático referente a posição da carga  $i$ ;

$C$  = coeficiente de lastro ou módulo de via ( $U$ );

$E$  = módulo de elasticidade do aço;

$I$  = momento de inércia do trilho.

Como para cada alternativa a ser estudada os parâmetros  $Q_d$ ,  $C$ ,  $E$  e  $I$  são pré-estabelecidos tem-se:

$$P_o = g (d, F_d) \quad (27)$$

onde  $g$  expressa a relação existente entre  $P_o$  e  $d$  e  $F_d$ .

A pressão sob o lastro também é função de duas variáveis, podendo ser representada em termos gerais por:

$$P_h = p(P_o, h) \quad (28)$$

A pressão admissível  $\sigma_p$  do sub-lastro pode ser expressa por uma relação do tipo:

$$\sigma_p = q (\text{CBR}) \quad (29)$$

Como o dimensionamento será feito de modo que as pressões transmitidas nas interfaces sejam iguais as admissíveis pelas camadas subjacentes deve-se ter:

$$P_h = \sigma_p \quad (30)$$

de onde de (28), (27) e (29)

$$P_h = q \text{ (CBR)} \quad (31)$$

A deflexão de grade é função direta de  $P_o$ , isto é:

$$D_g = r(P_o) \quad (32)$$

$$\text{ou de (27) } D_g = s(d, F_d) \quad (33)$$

#### . Restrições Estruturais

A altura do lastro satisfaz uma relação do tipo

$$h = w(P_o, P_h) \quad (34)$$

ou por (27) e (31)

$$h = v(d, F_d, \text{CBR}) \quad (35)$$

e a altura do sub-lastro uma do tipo

$$H_s = t(P_h, \sigma_p, h) \quad (36)$$

ou de (28), (29) e (35)

$$H_s = m(d, F_d, \text{CBR}) \quad (37)$$

sendo que  $\sigma_p$  e CBR neste caso representam a pressão

admissível e a capacidade de suporte da camada final de terraplenagem, respectivamente.

Comprova-se pela descrição das condições de contorno dadas por (27), (29), (31), (33) e (35) a dependência destas com as variáveis de decisão escolhidas no item anterior.

### 3.2.3 - Estrutura do Modelo

O objetivo do modelo será atingido então, se for possível determinar o conjunto de valores  $d$ ,  $F_d$  e  $CBR$ , dentro dos seus domínios de validade definidos pela prática, características do material ou ensaios de laboratório, que minimizam uma função custo total anual.

O problema então consiste em determinar  $\{d_o, F_{d_o}, CBR_o\}$  tal que

$$C_t(d_o, F_{d_o}, CBR_o) = \sum_m \left[ C_m(d_o, F_{d_o}, CBR_o) \cdot X_m(d_o, F_{d_o}, CBR_o) \right] \quad (38)$$

seja mínimo para  $d_o$ ,  $F_{d_o}$  e  $CBR_o$  dentro dos respectivos domínios de  $d$ ,  $F_d$  e  $CBR$ .

sendo

$C_m(d, F_d, CBR)$  = custo anual por unidade de comprimento relativo ao material ou serviço  $m$  da infra ou superestrutura;



$X_m(d, F_d, CBR)$  = quantidade do elemento m por unidade de comprimento de via.

e satisfazendo-se as seguintes restrições:

$$P_o \leq \varepsilon, \quad (39)$$

$$\delta_1 \leq h \leq \delta_2 \quad (40)$$

$$D_g \leq \omega \quad (41)$$

onde  $\varepsilon$ ,  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  e  $\omega$  são os limites aceitáveis para a pressão transmitida ao lastro, para a variação da altura do mesmo e para a deflexão máxima da grade respectivamente.

As expressões (39), (40) e (41) devem ser substituídas pelas definições (27), (35) e (33).

Cabe ressaltar que cada uma das parcelas constitutivas da função custo total anual deve ser analiticamente expressa como função das variáveis de decisão. Como tal representação depende do projeto considerado esta etapa ficará bem compreendida com os exemplos apresentados no Capítulo seguinte.

Convém observar que os limites impostos às condições de contorno ( $\varepsilon$ ,  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  e  $\omega$ ), serão fixados pelo projetista ou planejador em função de normas, recomendações técnicas ou mesmo da própria experiência pessoal advinda do acompanhamento do comportamento da via em projetos se-

melhantes.

Finalmente deve ser observado também que a representação analítica das restrições (27), (35) e (33) depende da escolha por parte do projetista da metodologia a ser empregada.

#### 3.2.4 - Algoritmo Numérico

Dependendo do projeto em questão e das metodologias empregadas, a função custo assume uma ou outra representação analítica, mas pode-se esperar que a mesma dependa não linearmente das variáveis de decisão. Por outro lado estas variáveis deverão satisfazer restrições do tipo (39), (40) e (41).

Por estes dois fatores e decorrente do fato de se ter disponível um programa em linguagem Fortran<sup>10</sup>, que poderia vir a ser empregado depois de sofrer algumas modificações, foi escolhido o Método das Penalidades associado a um processo de busca direta de Hooke e Jeeves para resolver numericamente qualquer aplicação do modelo descrito.

De fato este método só pode ser empregado se a função objetivo a ser otimizada for unimodal, isto é, se a mesma apresentar um único mínimo no campo de variação dos domínios das variáveis. Sendo a função custo relação de três variáveis independentes, muitas vezes torna-se difícil poder mostrar que esta propriedade é satisfeita. Caso

isto não possa ser demonstrado ou analiticamente ou geometricamente, uma forma de solucionar esta deficiência seria aplicar o algoritmo escolhendo pontos de partida espalhados no campo de variação dos domínios das variáveis. Se o processo convergir para um mesmo ponto poder-se-ia ter a certeza da unimodalidade, caso contrário divide-se o campo em vários sub-campos de variação e onde a função se apresentar unimodal, otimiza-se a mesma em cada um deles e escolhe-se como resultado ótimo aquele que der o menor custo.

#### 3.2.4.1 - Método das Penalidades

O Método das Penalidades<sup>10,11</sup>, converte a função objetivo original e suas restrições em uma função auxiliar denominada função resposta através da conjugação de uma função formada pelas restrições existentes, chamada penalidade, e a função objetivo inicial.

À essa nova função objetivo é aplicado o processo de busca direta de Hooke e Jeeves<sup>10,11</sup>, para a determinação dos valores das variáveis de decisão do problema que a minimizam dentro da região viável definida pela restrições impostas à função original.

#### 3.2.4.2 - O Programa Penal

O Programa Penal é elaborado a partir do programa de referência (10) para aplicação do modelo desenvolvi

do para a racionalização do dimensionamento do conjunto superestruturada ferroviária e camada final de terraplenagem.

Tendo em vista que o programa original foi concebido para a otimização de funções compostas de elementos homogêneos, isto é, variáveis de mesma natureza, várias adaptações se fizeram necessárias para sua utilização específica neste trabalho.

Nos Apêndices A e B são apresentados a listagem do programa fonte, a estrutura do programa e as instruções para sua utilização.

### 3.3 - O Procedimento

Considerando que a aplicação do modelo desenvolvido é uma atividade meio dentro do processo de dimensionamento do conjunto superestrutura ferroviária e camada final de terraplenagem, faz-se necessário a implementação de um procedimento de caráter amplo que contribua para a racionalização das demais atividades que caracterizam esse processo.

Este procedimento está subdividido nas seguintes etapas:

- identificação das condicionantes básicas do projeto;

- análise das disponibilidades de mercado;
- identificação das disponibilidades do sítio de projeto;
- estabelecimento das condições iniciais;
- seleção das metodologias;
- elaboração das alternativas;
- aplicação do modelo;
- avaliação dos resultados

As três primeiras etapas representam a análise e caracterização do problema a ser estudado. As duas seguintes representam as hipóteses a serem consideradas, ou seja, são estabelecidas premissas básicas e são selecionadas as metodologias que permitirão avaliar as diversas alternativas. As demais interagem com as outras segundo a sistemática do procedimento apresentado no fluxograma da Figura 2.

O procedimento poderá ser aplicado nas seguintes fases do projeto de engenharia segundo a disponibilidades dos dados em cada etapa:

- anteprojeto;
- projeto básico;
- projeto executivo.

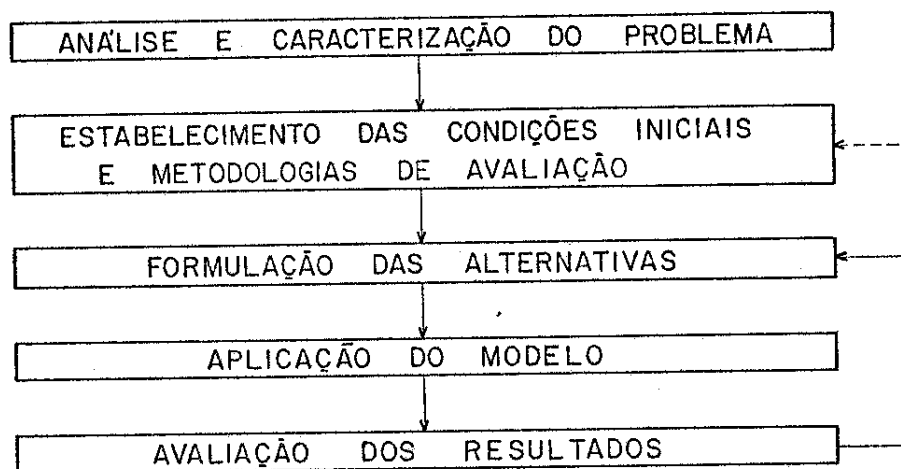


Figura 2: Fluxograma do Procedimento

### 3.3.1 - Identificação das Condicionantes Básicas do Projeto

Esta etapa se constitui da identificação dos parâmetros ou características estabelecidas para o projeto que sejam de importância para o dimensionamento do conjunto superestrutura ferroviária e camada final de terraplenagem.

Tais condicionantes são:

- volume bruto anual de transporte;
- natureza do transporte;
- carga por eixo do veículo tipo;
- velocidade máxima operacional;
- descrição plani-altimétrica do traçado;
- tipo da bitola.

### 3.3.2 - Análise das Disponibilidades de Mercado

Por meio de uma pesquisa de mercado devem ser levantadas as disponibilidades do mesmo quanto a trilhos, dormentes, fixações e outros materiais acessórios, no que se refere a tipos, características técnicas, custos de aquisição, custos de transporte, custo de implantação e demais serviços.

### 3.3.3 - Identificação das Disponibilidades do Sítio de Implantação

Com base nos dados coligidos dos estudos geológicos e geotécnicos sobre os materiais em disponibilidade no sítio de projeto deverão ser identificados e selecionados aqueles que atendendo às especificações técnicas do projeto (CBR, Los Angeles, Limites de Attemberg e outros) possam ser utilizados na confecção da:

- camada final de terraplenagem;
- sub-lastro;
- lastro.

Procedida a seleção deverão ser estimados os custos de escavação, carga, transporte e execução para cada tipo de material.

### 3.3.4 - Estabelecimento das Condições Iniciais

Nesta etapa o projetista deverá estabelecer as con

dições iniciais para o dimensionamento otimizado procedendo a determinação dos seguintes elementos:

- perfil comercial mínimo do trilho que atenda a carga dimensionante;
- tipos de dormentes e respectivas faixas de variação da área de apoio que poderão ser adotados na configuração da superestrutura;
- custo de oportunidade do capital para a avaliação dos custos anuais de cada material ou serviço;
- coeficiente de lastro ou módulo da via estimado para a configuração do conjunto superestrutura ferroviária e camada final de terraplenagem;
- seção transversal tipo de projeto para cortes e aterros;
- altura mínima do sub-lastro a ser considerada para fins de construção;
- coeficiente de impacto para majoração da carga estática.

### 3.3.5 - Seleção das Metodologias

Como se fez ver no Capítulo II várias metodologias podem ser utilizadas para dimensionar os esforços e elementos do conjunto superestrutura ferroviária e camada final de terraplenagem. Nesta etapa deve ser realizada a seleção



da metodologia que será empregada no dimensionamento do conjunto assim como a metodologia para a determinação do custo anual e avaliação da vida útil dos materiais e serviços.

### 3.3.6 - Elaboração das Alternativas

Esta etapa se caracteriza pela definição das restrições que serão impostas a alguns parâmetros de decisão e as condições de contorno que modelam cada alternativa a ensaiar. Estas são responsáveis pela adequação dos resultados obtidos ao padrão de qualidade estabelecido para o projeto como um todo. Assim, em conformidade com o tipo de transporte que o projeto destina-se a atender, essas restrições serão estabelecidas de acordo com as razões descritas na apresentação do modelo.

### 3.3.7 - Aplicação do Modelo

Selecionadas as metodologias conforme o item 3.3.5, as condições de contorno e a função de custo total anual são explicitamente definidas em relação às variáveis de decisão e o problema então é numericamente resolvido com o auxílio do programa PENAL.

### 3.3.8 - Avaliação dos Resultados

Obtidos os resultados que caracterizam a configuração de mínimo custo total anual o projetista passa à etapa de avaliação da alternativa ensaiada. Tendo em vista que

este procedimento de racionalização tem caráter iterativo outras alternativas poderão ser formuladas a partir da primeira através da redefinição das restrições impostas, seleção de outras metodologias de dimensionamento e até mesmo do estabelecimento de novas constantes de inicialização do ensaio.

## CAPÍTULO IV

### APLICAÇÃO PRÁTICA

#### 4.1 - Considerações Preliminares

Com o intuito de ilustrar a sistemática do procedimento e do modelo desenvolvidos, foram elaborados dois exemplos práticos aplicados a dois tipos de ferrovias (transporte metropolitano e de carga), cujos sítios de implantação localizam-se em regiões distintas do País.

Os dados do projeto, bem como as disponibilidades dos sítios de implantação e de mercado, são hipotéticos. Os custos unitários apresentados nos Apêndices C e D referentes aos materiais e serviços utilizados nos exemplos, foram estimados com base em preços de mercado de julho de 1983.

#### 4.2 - Desenvolvimento dos Exemplos

##### 4.2.1 - Trem Metropolitano

Pretende-se aplicar o procedimento e o modelo de racionalização desenvolvidos neste trabalho para dimensionar o conjunto superestrutura ferroviária e camada final de terraplenagem de um trecho a ser implantado para operação de trens metropolitanos. Com esta finalidade e de posse das especificações do projeto as etapas defini-

das no item 3.3 serão detalhadas.

#### 4.2.1.1 - Identificação das Condicionantes Básica do Projeto

As condicionantes básicas do projeto podem ser classificadas em características operacionais e de traçado.

As características operacionais do projeto são apresentadas no Quadro 1.

QUADRO 1: Características Operacionais

|                               |                |
|-------------------------------|----------------|
| Volume Anual de Tráfego       | 12 MTB         |
| Velocidade Operacional Máxima | 80 km/h        |
| Trem/Tipo                     | 4 carros (TUE) |
| Carga por eixo                | 20 t           |
| Bitola                        | 1.60 m         |

A descrição dos dados planimétricos e altimétricos do traçado, tais como as faixas de variação dos raios de curvatura, declividades do greide de projeto e respectivas extensões, encontram-se apresentados nos Quadros 2 e 3.

QUADRO 2: Características Planimétricas

| Variação do Raio<br>em m | Extensão Total do Trecho<br>em m |
|--------------------------|----------------------------------|
| 3492                     | 5606                             |
| 499 - 388                | 1150                             |
| 388 - 317                | 755                              |
| 317 - 268                | 1084                             |
| 268 - 233                | 4564                             |
| Extensão Total           | 13159                            |

QUADRO 3: Características Altimétricas

| Variação da Rampa<br>em % | Extensão Total do Trecho<br>em m |
|---------------------------|----------------------------------|
| 0.0 - 0.5                 | 1927                             |
| 0.5 - 1.0                 | 1897                             |
| 1.0 - 1.5                 | 7015                             |
| 1.5 - 2.0                 | 2320                             |

## 4.2.1.2 - Identificação das Disponibilidades de Mercado

Por meio de uma pesquisa foram levantados os tipos de trilhos, dormentes e fixações disponíveis para a

compra no mercado e que satisfaçam a condições condições básicas do projeto, bem como quantificados os custos unitários de aquisição e de transporte para o sítio de implantação. Pela extensão do material coletado os dados levantados não serão apresentados.

#### 4.2.1.3 - Identificação das Disponibilidades do Sítio de Projeto

Com base nos estudos geológicos e geotécnicos do sítio de implantação, selecionaram-se dois dos materiais ensaiados que atendem às especificações do projeto para utilização como sub-lastro. As características desses e do material escolhido para a camada final de terraplenagem encontram-se especificadas no Quadro 4.

QUADRO 4: Características dos Materiais Selecionados para a Camada Final de Terraplenagem e Sub-lastro

| Tipo                          | CBR |
|-------------------------------|-----|
| Camada Final de Terraplenagem | 12  |
| Sub-lastro I                  | 22  |
| Sub-lastro II                 | 28  |

#### 4.2.1.4 - Estabelecimento das Condições Iniciais

Foram estabelecidas as seguintes condições:

- utilização de trilhos TR 57 de Aço Carbono fabricado pela CSN;

- dormentes com as seguintes especificações para a variação da área de um apoio

$(1920 \leq F_d \leq 2250) \text{ cm}^2$  para dormentes de madeira,

$(2250 \leq F_d \leq 2500) \text{ cm}^2$  para dormentes de concreto bi-bloco e

$(2500 \leq F_d \leq 3000) \text{ cm}^2$  para dormentes de concreto monobloco;

- taxa de mercado para o custo de oportunidade do capital de 15% a.a.;

- coeficiente de lastro estimado em  $10 \text{ kg/cm}^3$ ;

- altura mínima de 10 cm para o sub-lastro devido a restrições construtivas;

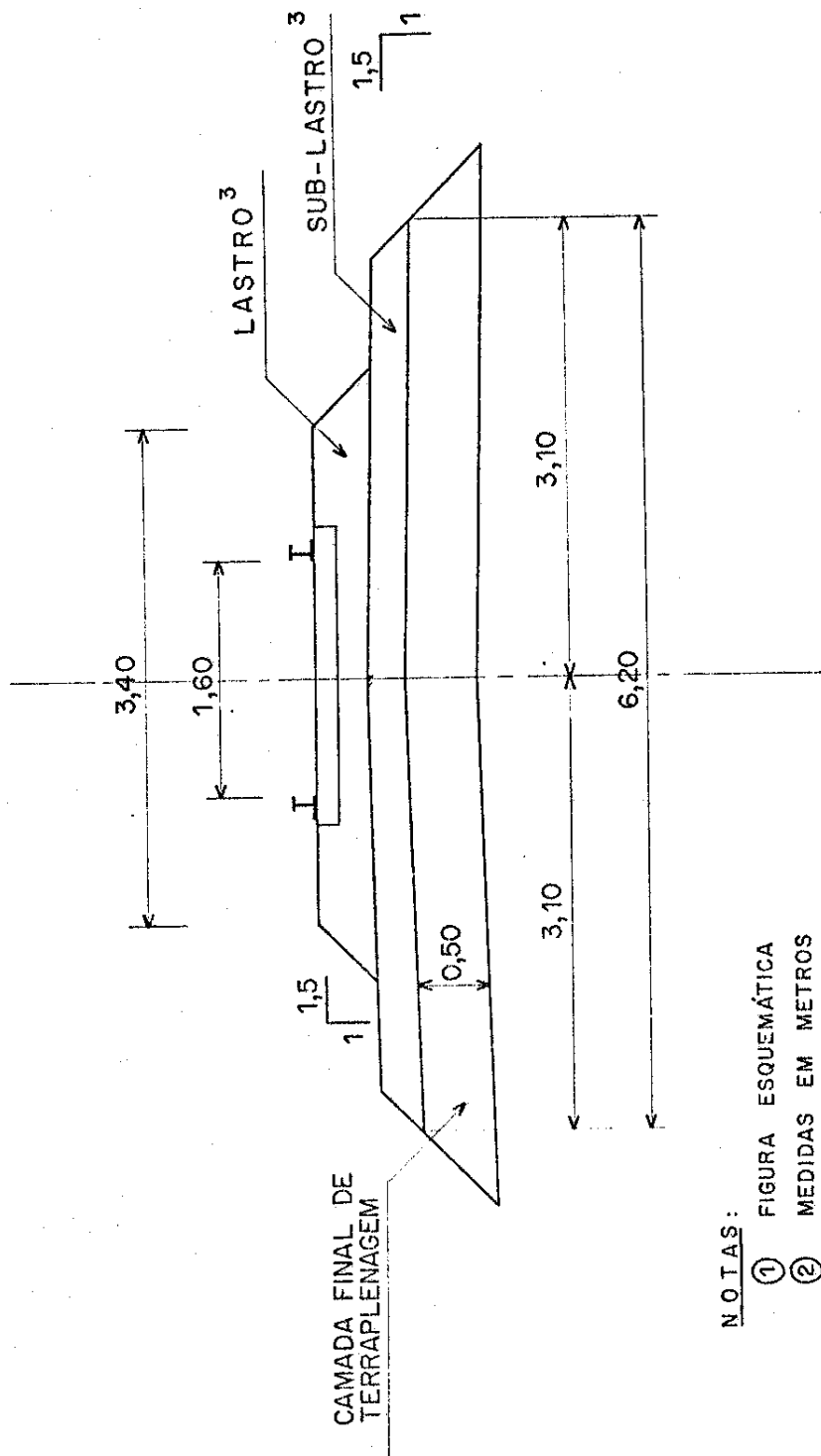
- coeficiente de impacto igual a 2;

- seção transversal tipo segundo a Figura 3.

#### 4.2.1.5 - Seleção das Metodologias

- . Função Custo Total Anual

A metodologia escolhida que permitirá a formula-



NOTAS:  
 ① FIGURA ESQUEMÁTICA  
 ② MEDIDAS EM METROS  
 ③ ALTURA A SER DETERMINADA

SEÇÃO TRANSVERSAL TIPO — TREM METROPOLITANO

FIGURA 3: Seção Transversal Tipo - Trem Metropolitano



ção da função custo total anual dos materiais e serviços será a desenvolvida por Rodrigues<sup>1 2</sup>.

Essa metodologia estima o custo total anual da superestrutura ferroviária a partir dos seus dispêndios mais relevantes determinados em função da vida útil dos materiais e serviços que o compõem.

A vida útil desses materiais e serviços é avaliada em função das características da via e operação, peculiares a cada trecho ferroviário, a partir de um produto de constantes  $K_i$  que quantificam a influência dos seguintes parâmetros: carga por eixo, velocidade operacional, geometria plani-altimétrica, trem-tipo e bitola.

Como a metodologia é flexível quanto a sua utilização procedeu-se a algumas adaptações na composição das parcelas relativas a infra e superestrutura.

Tendo em vista que se pretende determinar a configuração de custo mínimo a partir dos materiais e serviços essenciais a implantação do conjunto superestrutura ferroviária e camada final de terraplenagem, alguns itens considerados complementares, como por exemplo, a capina química, aparelhos de mudança de via e outros, não foram incluídos na função custo total.

Por outro lado, julgando-se conveniente, inclu-

iu-se uma parcela relativa a materiais e serviços não convencionais tais como imprimação, geotêxteis e outros.

#### . Dimensionamento Estrutural

Para o dimensionamento estrutural serão consideradas as três composições de metodologias adotadas nas versões do programa Penal conforme o Apêndice B.

QUADRO 5: Versões do Programa PENAL

| Denominação | Metodologias Empregadas |
|-------------|-------------------------|
| PENAL 1     | Zimmermann (4)          |
|             | J.N.R. (14)             |
|             | Heukelom (19), (20)     |
| PENAL 2     | Zimmermann (4)          |
|             | Love (16)               |
|             | Heukelom (19), (20)     |
| PENAL 3     | Talbot (11), (13)       |
|             | Heukelom (19), (20)     |

#### 4.2.1.6 - Elaboração das Alternativas

Complementando os dados necessários a caracterização da alternativa base a ser ensaiada definem-se as restrições que deverão ser impostas ao dimensionamento pa

ra atender ao padrão de qualidade estabelecido para o projeto.

Uma alternativa para o projeto em questão se traduz com as seguintes restrições:

- o espaçamento dos dormentes deve variar entre

$$50\text{cm} \leq d \leq 60 \text{ cm}$$

- a pressão admissível sob o dormente não deve exceder

$$P_o \leq 3.5 \text{ kg/cm}^2$$

- a altura do lastro deve variar entre os seguintes limites

$$25 \text{ cm} \leq h \leq 30 \text{ cm}$$

- e a deflexão máxima admissível para a grade deve ser

$$D_g \leq 0.635 \text{ cm}$$

Apresenta-se no Quadro 6 estas informações de caracterização da alternativa na formatação do arquivo de dados Penalin

#### 4.2.1.7 - Aplicação do Modelo

Para a resolução numérica do modelo é necessário

QUADRO 6: Dados de Entrada - PENALIN

|      | TESE DE MESTRADO | IME       | TRANSPORTE FERROVIÁRIO |
|------|------------------|-----------|------------------------|
| 100  |                  |           |                        |
| 200  | 3                | 0.1       | .1                     |
| 300  | 50.              | 50.       | 60.                    |
| 400  | 1920.            | 1920.     | 3000.                  |
| 500  | 12.              | 12.       | 28.                    |
| 600  | 20000.           | 57.       | 2730                   |
| 700  | 9.               | 0.15      |                        |
| 800  | 1.5              | 1.5       | 1.5                    |
| 900  | 10.              | 2100000.  | 3.40                   |
| 1000 | 2250.            | 2500.     | 6.2                    |
| 1100 | 269370.          | 15000000. | 0.                     |
| 1200 | 4750.            | 4500.     | 3200.                  |
| 1300 |                  |           | 4900.                  |
| 1400 | 26.              | 3.8       | 0.                     |
| 1500 | 30.              | 44.2      | 30.                    |
| 1600 | 3.5              | 25.       | 30.                    |
|      |                  |           | 12000000               |
|      |                  |           | 12525.                 |
|      |                  |           | 17170.                 |
|      |                  |           | 3064600.               |
|      |                  |           | 10.6                   |
|      |                  |           | 25.                    |
|      |                  |           | 0.635                  |
|      |                  |           | 7960.                  |
|      |                  |           | 20280.                 |
|      |                  |           | 18.8                   |
|      |                  |           | 2                      |
|      |                  |           | 0.5                    |
|      |                  |           | 22.                    |

explicitar a função custo assim como as condições de contorno de acordo com as metodologias escolhidas.

### . Função Custo Total Anual

A função de Custo Total Anual,  $C_t$ , relativa à materiais e serviços pode ser decomposta em duas parcelas

$$C_t = CI + CS \quad (42)$$

onde (CI) e (CS) representam os custos anuais relativos a materiais e serviços referentes a Infra e Superestrutura respectivamente.

Por sua vez o Custo Anual da Infraestrutura pode se decompor assim:

$$CI = \sum_{i=1}^3 CI_i \quad (43)$$

sendo

$CI_1$ ,  $CI_2$  e  $CI_3$  os custos anuais de investimento na camada final de terraplenagem, sublastro e serviços não convencionais respectivamente.

Cada uma dessas parcelas é apresentada a seguir conforme a metodologia escolhida:

$$CI_1 = C_1 \cdot V_1 \text{ FRC } (i, n) \quad (44)$$

onde

$C_1$  = custo unitário da camada final de terraplenagem por  $m^3$

$V_1$  = volume por m

$$V_1 = H_c \cdot B_1 \quad (45)$$

$H_c$  = altura da camada final de terraplenagem

$B_1$  = base média

FRC(i,n) = fator de recuperação de capital

$$FRC(i,n) = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} = FRC_n \quad (46)$$

$i$  = custo de oportunidade do capital

$n$  = vida útil do material ou serviço

$$CI_2 = C_2 \cdot V_2 \cdot FRC(i,n) \quad (47)$$

onde

$C_2$  = custo unitário do sub-lastro por  $m^3$

$V_2$  = volume por m

$$V_2 = H_s \cdot B_2 \quad (48)$$

sendo a altura do sub-lastro  $H_s = H_s(\text{CBR})$  a partir de (21) e (24), como pode ser deduzido.

$B_2$  = base média

$$e \quad CI_3 = ISNC \cdot FRC (i, n) \quad (49)$$

sendo

ISNC = investimento em materiais e serviços não convencionais.

Por outro lado o Custo Anual de Superestrutura pode se decompor como segue:

$$CS = \sum_{j=1}^6 CS_j \quad (50)$$

sendo

$CS_1$  = custo anual do trilho;

$CS_2$  = custo anual do dormente;

$CS_3$  = custo anual do nivelamento, alinhamento e socaria;

$CS_4$  = custo anual do lastro;

$CS_5$  = custo anual de outros materiais;

$CS_6$  = custo anual dos outros serviços de manutenção da superestrutura.

Cada uma dessas parcelas pode ser representada segundo a metodologia empregada, como segue:

$$CS_1 = 1,12 (C_3 \cdot 2P + C_4) \cdot FRC (i, n) \quad (51)$$

onde

$C_3$  = custo unitário do trilho por t

$P$  = peso do trilho em kg/m

$C_4$  = custo de soldas por km

$$CS_2 = C_5 \cdot N_d \cdot FRC(i,n) \quad (52)$$

onde

$C_5$  = custo unitário do dormente

$N_d$  = nº de dormentes por km, sendo

$$N_d = 10^6/d \quad (53)$$

$$CS_3 = 1.12 \cdot CNA \cdot FRC(i,n) \quad (54)$$

onde

$CNA$  = custo dos alinhamentos, nivelamento e soca-  
ria por km

$$CS_4 = C_6 \cdot V_3 \cdot FRC(i,n) \quad (55)$$

onde

$C_6$  = custo unitário do lastro por  $m^3$

$V_3$  = volume por m

$$V_3 = h \cdot B_3 \quad (56)$$



sendo a altura  $h = h(d, F_d, CBR)$  como pode ser mostrado na equação (34) e (35). A formulação final será apresentada com a formalização das condições de contorno.

$B_3$  = base média

$$CS_5 = IMS \cdot FRC(i,n) \quad (57)$$

onde  $IMS$  = investimento em materiais e serviços

$$e \quad CS_6 = 0.08 \sum_{i=1}^5 CS_i \quad (58)$$

Assim a função Custo Anual será representada por:

$$\begin{aligned} C_t = & C_1 \cdot H_c \cdot B_1 \cdot FRC_1 + \underline{C_2 \cdot H_s(CBR) \cdot B_2 \cdot FRC_2} + \\ & + ISNC \cdot FRC_3 + 1,08 \left[ 1.12(C_3 \cdot 2P + C_4) FRC_4 + \underline{C_5 \cdot 10^6/d} \right. \\ & \left. + \underline{FRC_5} + 1.12 CNA \cdot FRC_6 + \underline{C_6 \cdot h(d, F_d, CBR) \cdot B_3 \cdot FRC_7} \right. \\ & \left. + IMS \cdot FRC_8 \right] \quad (59) \end{aligned}$$

As parcelas sublinhadas são aquelas que dependem diretamente das variáveis de decisão. Para se determinar o mínimo de  $C_t$  basta minimizar o somatório dessas três parcelas.

### . Condições de Contorno

Como as condições de contorno definidas no item 3.2.2 se referem às restrições que deverão ser satisfeitas por  $P_o$ ,  $h$  e  $D_g$ , estas deverão ser descritas em função das variáveis de decisão.

Procede-se à descrição destas condições de contorno a uma das três composições de metodologias selecionadas no item 4.2.1.5.

Tem-se então aplicando-se as teorias de Zimmermann<sup>1</sup>, J.N.R<sup>4</sup> e Heukelom<sup>6,7</sup>:

. Empregando (4) a pressão  $P_o$  será dada por

$$P_o = \frac{Q}{2.828} \cdot \sqrt[4]{\frac{C}{EI} \cdot \left(\frac{d}{F_d}\right)^3} \quad (60)$$

. Explicitando  $h$  em (14), satisfazendo a condição de equilíbrio definida por (30) e (31) em (19) e (20) obtém-se a seguinte expressão para a altura do lastro

$$h = \left[ \frac{83.33 P_o (1 + 0.7 \text{ Log } N)}{\text{CBR}} - 10 \right]^{0.741} \quad (61)$$

Substituindo (60) em (61)  $h$  será dado por

$$h = \left[ \frac{29.47 Q (1+0.7 \text{ Log } N)}{\text{CBR}} \cdot \sqrt[4]{\frac{C}{EI} \cdot \left(\frac{d}{F_d}\right)^3} - 10 \right]^{0.741} \quad (62)$$

. De (3) a deflexão da grade  $D_g$  é

$$D_g = \frac{Q}{2.828} \cdot \sqrt[4]{\frac{I}{EIC^3} \cdot \left(\frac{d}{F_d}\right)^3} \quad (63)$$

Da aplicação do modelo por meio do programa Penal são obtidos os resultados para a configuração de menor custo apresentados nos Quadros 7, 8 e 9.

#### 4.2.1.8 - Avaliação dos Resultados

De posse desses resultados, novas alternativas poderão ser formuladas e ensaiadas. Como exemplos de modificações que podem ser processadas na alternativa base para avaliação de outras configurações de custo total anual mínimo, alinham-se:

- substituição do material selecionado para a camada final de terraplenagem por outro de igual disponibilidade, mas de CBR diferente;
- o mesmo procedimento em relação aos materiais para sub-lastro;
- adoção de um perfil de trilho maior do que o mínimo necessário;
- utilização de dormentes com especificações de áreas de apoio diferentes;

QUADRO 7 : Resultados - PENAL 1

TESE DE MESTRADO - IME - TRANSPORTE FERROVIÁRIO

VALORES ÓTIMOS DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES

D = 60.

FD = 3000.

CBR = 12.

NÚMERO DE ITERAÇÕES 51

CUSTO TOTAL ANUAL Cr\$ 22945967.813 POR KM

VALOR DO INVESTIMENTO = Cr\$ 115053139.600 POR KM

RESULTADOS

PRESSÃO SOB OS DORMENTES 2.43 KG/CM<sup>2</sup>

ALTURA DO LASTRO 29. CM

ALTURA DO SUBLASTRO 0. CM

DEFLEXÃO DA GRADE 0.243 CM

DADOS

CARGA POR RODA 20000. KG TRILHO 57. KG/M

RESTRIÇÕES

PRESSÃO SOB OS DORMENTES 3.5 KG/CM<sup>2</sup>

ALTURA DE LASTRO VARIANDO ENTRE 25. A 30. CM

DEFLEXÃO MÁXIMA DA GRADE 0.635 CM

QUADRO 8 : Resultados - PENAL 2

TESE DE MESTRADO - IME - TRANSPORTE FERROVIÁRIO

VALORES ÓTIMOS DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES

D = 60.

FD = 1920.

CBR = 22.

NÚMERO DE ITERAÇÕES 72

CUSTO TOTAL ANUAL Cr\$ 23119548.552 POR KM

VALOR DO INVESTIMENTO = Cr\$ 116789007.600 POR KM

RESULTADOS

PRESSÃO SOB OS DORMENTES 3.40 KG/CM<sup>2</sup>

ALTURA DO LASTRO 25. CM

ALTURA DO SUBLASTRO 10. CM

DEFLEXÃO DA GRADE 0.340 CM

DADOS

CARGA POR RODA 20000. KG TRILHO 57. KG/M

RESTRIÇÕES

PRESSÃO SOB OS DORMENTES 5.5 KG/CM<sup>2</sup>

ALTURA DE LASTRO VARIANDO ENTRE 25. A 30. CM

DEFLEXÃO MÁXIMA DA GRADE 0.635 CM

QUADRO 9 : Resultados - PENAL 3

TESE DE MESTRADO - IME - TRANSPORTE FERROVIÁRIO

VALORES ÓTIMOS DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES

D = 60.

FD = 2887.

CBR = 24.

NÚMERO DE ITERAÇÕES 131

CUSTO TOTAL ANUAL Cr\$ 23146408.879 POR KM

VALOR DO INVESTIMENTO = Cr\$ 117066434.946 POR KM

RESULTADOS

PRESSÃO SOB OS DORMENTES 2.50 KG/CM<sup>2</sup>

ALTURA DO LASTRO 25. CM

ALTURA DO SUBLASTRO 10. CM

DEFLEXÃO DA GRADE 0.251 CM

DADOS

CARGA POR RODA 20000. KG TRILHO 57. KG/M

RESTRICÇÕES

PRESSÃO SOB OS DORMENTES 3.5 KG/CM<sup>2</sup>

ALTURA DE LASTRO VARIANDO ENTRE 25. A 30. CM

DEFLEXÃO MÁXIMA DA GRADE 0.635 CM

- variação da taxa adotada para o custo de oportunidade do capital;

- alteração das condições de contorno degradando ou melhorando o padrão de projeto.

À exceção dos dois últimos itens, tais modificações acarretarão numa nova quantificação dos custos unitários visto que as especificações iniciais foram mudadas.

#### 4.2.2 - Trem de Carga

Em face da aplicação do procedimento e modelo a este exemplo ser bastante semelhante ao anterior, apresentar-se-ão de forma sucinta e simplificada somente as etapas que contiverem características diferentes das correspondentes a aplicação para trem metropolitano.

As etapas 4.2.1.2, 4.2.1.5, 4.2.1.7 e 4.2.1.8 não serão apresentadas por elas serem idênticas as correspondentes no exemplo anterior.

A seguir apresentam-se os dados referentes às demais etapas que caracterizam a particularidade do projeto em estudo.

##### 4.2.2.1 - Identificação das Condicionantes Básicas do Projeto

## QUADRO 10: Características Operacionais

|                               |                    |
|-------------------------------|--------------------|
| Volume Anual de Tráfego       | 40 MTB             |
| Velocidade Operacional Máxima | 60 km/h            |
| Trem-Tipo                     | 4 Loco + 92 vagões |
| Carga por eixo                | 32 t               |
| Bitola                        | 1.60 m             |

## QUADRO 11: Características Planimétricas

| Variação do Raio<br>em m | Extensão Total do Trecho<br>em m |
|--------------------------|----------------------------------|
| 3492                     | 37180                            |
| 3492 - 1164              | 7700                             |
| 1164 - 698               | 19120                            |
| Extensão Total           | 64000                            |



QUADRO 12: Características Altimétricas

| Variação da Rampa<br>em % | Extensão Total do Trecho<br>em m |
|---------------------------|----------------------------------|
| 0.0 - 0.5                 | 12420                            |
| 0.5 - 1.0                 | 51580                            |

#### 4.2.2.2 - Identificação das Disponibilidades do Sítio de Projeto

QUADRO 13: Características dos Materiais Selecionados para a Camada Final de Terraplenagem e Sub-Lastro

| Tipo                          | CBR |
|-------------------------------|-----|
| Camada Final de Terraplenagem | 8   |
| Sub-lastro I                  | 34  |
| Sub-lastro II                 | 67  |

## 4.2.2.3 - Estabelecimento das Condições Iniciais

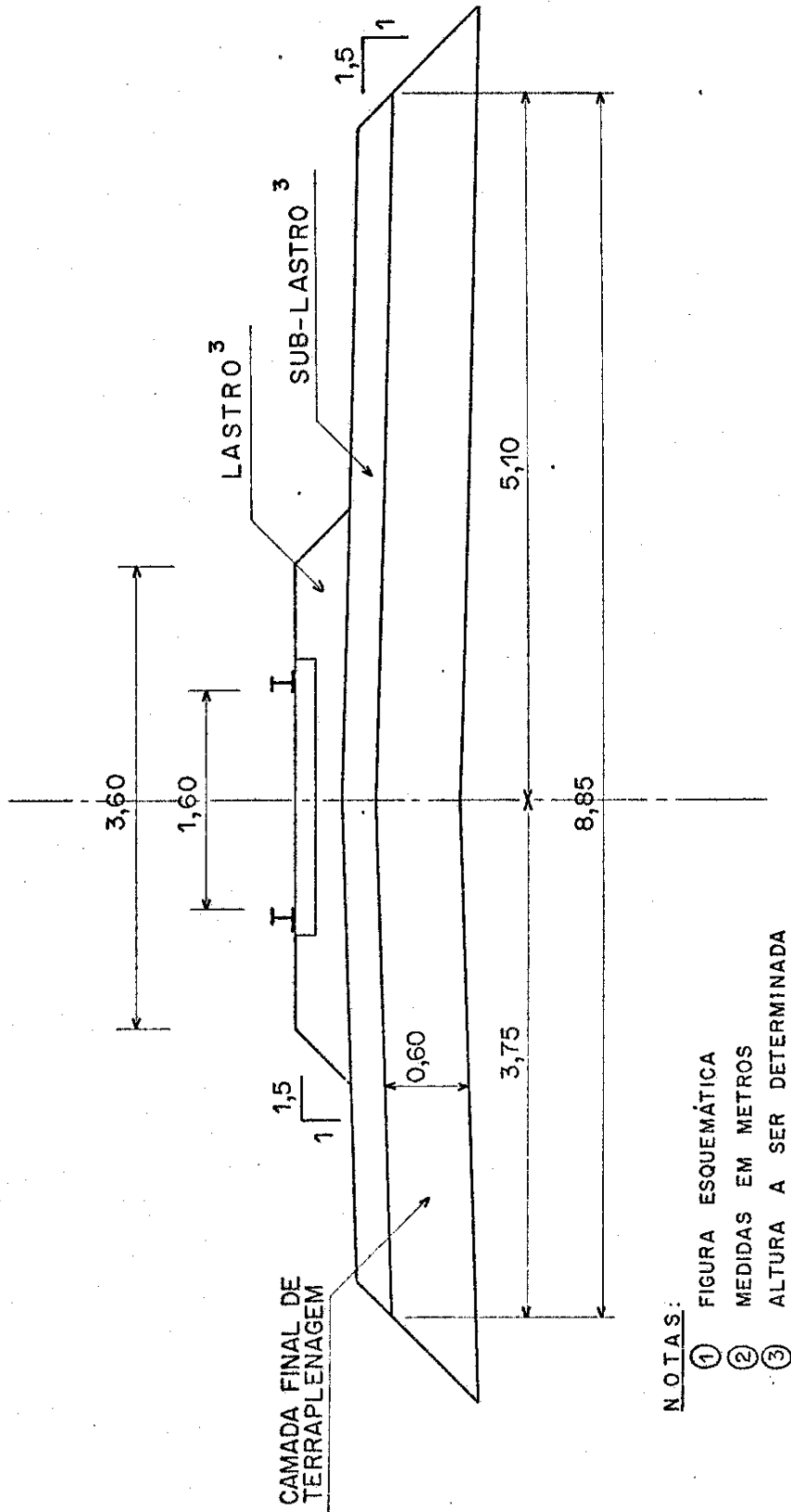
QUADRO 14: Condições Iniciais

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| Trilhos (Niobrás - CSN)          | TR 68                                    |
| Área de Apoio dos Dormentes      |  |
| - madeira                        | $(1800 \leq F_d \leq 2400) \text{ cm}^2$ |
| - concreto bi-bloco              | $(2400 \leq F_d \leq 2600) \text{ cm}^2$ |
| - concreto monobloco             | $(2600 \leq F_d \leq 3200) \text{ cm}^2$ |
| Custo de Oportunidade do Capital | 12% a.a.                                 |
| Coeficiente de Lastro            | 5 kg/cm <sup>3</sup>                     |
| Altura mínima do Sub-lastro      | 10 cm                                    |
| Coeficiente de Impacto           | 2  |
| Seção Transversal Tipo           | Figura 4                                 |

## 4.2.2.4 - Elaboração das Alternativas

QUADRO 15: Restrições de Projeto

|                           |                                  |
|---------------------------|----------------------------------|
| Espaçamento dos dormentes | $(50 \leq d \leq 60) \text{ cm}$ |
| Pressão Máxima admissível | $P_o \leq 4.5 \text{ kg/cm}^2$   |
| Altura do Lastro          | $(25 \leq h \leq 35) \text{ cm}$ |
| Deflexão Máxima da Grade  | $D_g \leq 0.635 \text{ cm}$      |



SEÇÃO TRANSVERSAL TIPO — TREM DE CARGA

FIGURA 4: Seção Transversal Tipo - Trem de Carga

No Quadro 16 são apresentadas as informações de caracterização da alternativa na formatação do arquivo de dados Penalin.

#### 4.2.2.5 - Aplicação do Modelo

Da aplicação do modelo por meio do programa Penalin são obtidos os resultados apresentados nos Quadros 17, 18 e 19.

#### 4.2.3 - Considerações Finais

Vale destacar os seguintes aspectos gerais da análise dos resultados da aplicação do modelo proposto a esses dois casos distintos:

. apesar de cada uma das versões representar uma composição de metodologias de dimensionamento de características diferentes quanto a avaliação dos esforços e pressões no corpo do sistema, os resultados demonstram que, no conjunto, as distintas tendências de cada metodologia conduzem a valores da função custo total anual próximos como pode ser visto pela composição dos Quadros 7, 8 e 9 e 17, 18 e 19;

. é interessante notar que a influência do valor do CBR dos materiais destinados a execução do sub-lastro é relativa sob o ponto de vista estrutural, do que se depreende que, da escolha das disponibilidades para esta camada poder-se-ia ter utilizado materiais menos nobres

QUADRO 16: Dados de Entrada - PENALIN

|      | TESE DE MESTRADO  | IME    | TRANSPORTE FERROVIÁRIO |
|------|-------------------|--------|------------------------|
| 100  |                   |        |                        |
| 200  | 3 0.1             | .1     | .1                     |
| 300  | 50. 50. 60.       |        |                        |
| 400  | 1800. 1800. 3200. |        |                        |
| 500  | 8. 8. 67.         |        |                        |
| 600  | 32000. 68.        | 3950   | 40000000               |
| 700  | 9 0.12            |        |                        |
| 800  | 1.5 1.5           | 1.5    | 2 0.6                  |
| 900  | 5. 2100000.       | 3.60   | 8.85 34.               |
| 1000 | 2400. 2600.       |        |                        |
| 1100 | 351224. 10000000. | 0.     | 12120. 6680.           |
| 1200 | 11094. 5000.      | 2450.  | 23642. 28389.          |
| 1300 |                   | 11208. | 2125110.               |
| 1400 | 8.6 1.8           | 0.     | 6.0 9.0                |
| 1500 | 30. 13.           | 30.    | 25.                    |
| 1600 | 4.5 25.           | 35.    | 0.635                  |

QUADRO 17: Resultados - PENAL 1

TESE DE Mestrado - IME - TRANSPORTE FERROVIÁRIO

VALORES ÓTIMOS DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES

D = 60.

FD = 3193.

CBR = 14.

NÚMERO DE ITERAÇÕES 75

CUSTO TOTAL ANUAL Cr\$ 31760200.708 POR KM

VALOR DO INVESTIMENTO = Cr\$ 152396157.547 POR KM

RESULTADOS

PRESSÃO SOB OS DORMENTES 2.85 KG/CM<sup>2</sup>

ALTURA DO LASTRO 29. CM

ALTURA DO SUBLASTRO 10. CM

DEFLEXÃO DA GRADE 0.569 CM

DADOS

CARGA POR RODA 32000. KG TRILHO 68. KG/M

RESTRIÇÕES

PRESSÃO SOB OS DORMENTES 4.5 KG/CM<sup>2</sup>

ALTURA DE LASTRO VARIANDO ENTRE 25. A 35. CM

DEFLEXÃO MÁXIMA DA GRADE 0.635 CM

QUADRO 18 : Resultados - PENAL 2

TESE DE MESTRADO - IME - TRANSPORTE FERROVIÁRIO

VALORES ÓTIMOS DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES

D = 60.

FD = 3172.

CBR = 23.

NÚMERO DE ITERAÇÕES 222

CUSTO TOTAL ANUAL Cr\$ 32352327.552 POR KM

VALOR DO INVESTIMENTO = Cr\$ 158404263.963 POR KM

RESULTADOS

PRESSÃO SOB OS DORMENTES 2.86 KG/CM<sup>2</sup>

ALTURA DO LASTRO 25. CM

ALTURA DO SUBLASTRO 17. CM

DEFLEXÃO DA GRADE 0.572 CM

DADOS

CARGA POR RODA 32000. KG TRILHO 68. KG/M

RESTRIÇÕES

PRESSÃO SOB OS DORMENTES 4.5 KG/CM<sup>2</sup>

ALTURA DE LASTRO VARIANDO ENTRE 25. A 35. CM

DEFLEXÃO MÁXIMA DA GRADE 0.635 CM

QUADRO 19: Resultados - PENAL 3

TESE DE MESTRADO - IME - TRANSPORTE FERROVIÁRIO

VALORES ÓTIMOS DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES

D = 58.

FD = 2787.

CBR = 32.

NÚMERO DE ITERAÇÕES 76

CUSTO TOTAL ANUAL Cr\$ 33399178.323 POR KM

VALOR DO INVESTIMENTO = Cr\$ 166944514.385 POR KM

RESULTADOS

PRESSÃO SOB OS DORMENTES 3.10 KG/CM<sup>2</sup>

ALTURA DO LASTRO 25. CM

ALTURA DO SUBLASTRO 25. CM

DEFLEXÃO DA GRADE 0.599 CM

DADOS

CARGA POR RODA 32000. KG TRILHO 68. KG/M

RESTRIÇÕES

PRESSÃO SOB OS DORMENTES 4.5 KG/CM<sup>2</sup>

ALTURA DE LASTRO VARIANDO ENTRE 25. A 35. CM

DEFLEXÃO MÁXIMA DA GRADE 0.635 CM



e portanto mais baratos para obter-se o mesmo resultado;

. corroborando a fundamentação teórica do processo de racionalização do dimensionamento do conjunto super estrutura ferroviária e camada final de terraplenagem, o item custo que está diretamente associado ao nível de escassez ou disponibilidade dos materiais no sítio de implantação ou no mercado, atua como fator de essencial importância na determinação dos valores das variáveis de decisão.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

#### 5.1 - Conclusões

Este trabalho, embora não tenha caráter definitivo nem pretenda ser isento de falhas, buscou contribuir positivamente para o crescimento da bagagem científica e tecnológica do País, no campo da engenharia ferroviária, no estabelecimento das bases de uma filosofia conceitual de racionalização aplicada.

O objetivo de desenvolver um instrumento de auxílio ao projetista capaz de associar os aspectos técnicos aos econômicos do dimensionamento do conjunto superestrutura ferroviária e camada final de terraplenagem, por esse não existir no meio técnico até o presente, foi atingido como pode ser observado dos resultados numéricos obtidos nas aplicações apresentadas no Capítulo IV.

Este objetivo, alcançado com a elaboração de um modelo de racionalização de meios e investimentos, coerente e compatível com a realidade econômica que atravessa o contexto nacional, demonstra que processos para a determinação de soluções eficazes e de custo mínimo são factíveis e de fácil aplicação.

Da análise do modelo e procedimento desenvolvidos

e de sua aplicação a projetos de ferrovias metropolitanas ou de transporte de carga, pode-se concluir que:

- a experiência do projetista e seu conhecimento das disponibilidades do sítio de implantação e do mercado são fatores de primordial importância na obtenção da configuração de menor custo total anual;

- a estrutura do modelo permite a inclusão de novas variáveis de forma simples. Parâmetros tais como o tipo e inércia do trilho assumidos como constantes na formulação do modelo, poderão ser escolhidos como variáveis de decisão para fins de uma racionalização mais ampla do dimensionamento desde que os mesmos entrem na composição da função custo;

- o modelo independe das metodologias empregadas para dimensionamento estrutural e para a formulação da função custo total anual, isto é, a escolha das mesmas deve ser feita pelo projetista em questão;

- a análise da sensibilidade do custo total anual com a variação de qualquer parâmetro constante pode ser feita a partir dos resultados obtidos da aplicação sucessiva do modelo;

- em situações particularmente especiais imposições de natureza política, gerencial, ecológica e financeira poderão contribuir com custos exógenos ao contexto do projeto que inviabilizem qualquer solução de custo mí-

nimo fundamentada em critérios eminentemente técnicos.

## 5.2 - Recomendações

Como recomendações para desenvolvimento de futuros trabalhos com continuidade com este, sugere-se:

- elaborar um modelo que considere simultaneamente o dimensionamento da camada final de terraplenagem e sub-lastro;

- desenvolver um estudo para adequar o modelo às recentes teorias de determinação da pressão admissível da fundação para solicitações dinâmicas de carregamento a partir do módulo de elasticidade estático do material;

- realizar uma pesquisa de campo para avaliar o desempenho da aplicação de geotêxteis em fundações de baixa capacidade de suporte e elevado grau de saturação;

- avaliar o efeito da repetição da carga por eixo na vida útil dos materiais do conjunto superestrutura ferroviária e camada final de terraplenagem;

- reavaliar a geometria padronizada dos dormentes de madeira para as bitolas de 1.00 m e 1.60 m, de modo a tornar a sua utilização mais adequada às várias classes de ferrovias, aumentando-se assim a sua competitividade com os dormentes de concreto.

APENDICE A

LISTAGEM DO PROGRAMA FONTE

|      |   |
|------|---|
| 100  | SRESET FREE   |
| 200  | FILE 2(KIND=DISK, TITLE='PENALIM', FILETYPE=7)                      |
| 300  | FILE 6(KIND=DISK, TITLE='PENALOU', FILETYPE=7, PROTECTION=SAVE)     |
| 400  | C   |
| 500  | C   |
| 600  | C   |
| 700  | C   |
| 800  | C   |
| 900  | C   |
| 1000 | DIMENSION X(10), I(10), LE(10), XPN(10), XS                         |
| 1100 | COMMON N,EFS,DDD,AFAS,JCIN,LE,IMP,K(15),VIDA(10),FRC(10),XPN(10),XS |
| 1200 | ATRT(10),XMX(10),RESI,FR1,FR2,MI,MS,ES,E6,N6,Z,HS,HC,A8,C,II,E,6D,N |
| 1300 | *N,MI,22,M33,JUR,AA,TRILH,NIVEL,CUTRC,DORPT,LASTR,SULAS,FIYAC,CFT   |
| 1400 | *EM,CUTRUC),FPS,FR3,F44,XINY,UI,CZ,NI                               |
| 1500 | REAL P5,M6,N8,JUR,NIVEL,LASTR                                       |
| 1600 | C   |
| 1700 | C   |
| 1800 | C   |
| 1900 | C   |
| 2000 | C   |
| 2100 | C   |
| 2200 | FILE CLY = TITULO GERAL   |
| 2300 | N = NUMERO DE VARIAVEIS INDEPENDENTES                               |
| 2400 | EFS = PRECISAO DAS ITERACOES  |
| 2500 | DDD = PASSO INICIAL   |
| 2600 | LIM = INDICADOR DE ACESSO LE FIMVIZACAO (-1)                        |
| 2700 | XPN(10) = LIMITE INFERIOR DO INTERVALO DE VARIACAO                  |
| 2800 | DC ESPECIFIC DO CORNENES  |
| 2900 | XPN(10) = LIMITE SUPERIOR DO INTERVALO DE VARIACAO                  |
| 3000 | DC ESPECIFIC DOS CORNENES   |

|      |    |  |  |
|------|----|--|--|
| 3100 | CC | XSTRT(1) - VALOR INICIAL PARA O PROCESSO DE BUSCA NO INTERVALO |  |
| 3200 | CC | DEFINICAO PARA O ESPACAMENTO DOS DORMENTES                     |  |
| 3300 | CC | AREA DE APLICACAO PARA DORMENTES DE MADEIRA                    |  |
| 3400 | CC | AREA DE APLICACAO PARA DORMENTES DE CONCRETO                   |  |
| 3500 | CC | VALOR INICIAL PARA O PROCESSO DE BUSCA NO INTERVALO            |  |
| 3600 | CC | DEFINICAO PARA O ESPACAMENTO DOS DORMENTES                     |  |
| 3700 | CC | AREA DE APLICACAO PARA DORMENTES DE MADEIRA                    |  |
| 3800 | CC | AREA DE APLICACAO PARA DORMENTES DE CONCRETO                   |  |
| 3900 | CC | VALOR INICIAL PARA O PROCESSO DE BUSCA NO INTERVALO            |  |
| 4000 | CC | DEFINICAO PARA O ESPACAMENTO DOS DORMENTES                     |  |
| 4100 | CC | AREA DE APLICACAO PARA DORMENTES DE MADEIRA                    |  |
| 4200 | CC | AREA DE APLICACAO PARA DORMENTES DE CONCRETO                   |  |
| 4300 | CC | VALOR INICIAL PARA O PROCESSO DE BUSCA NO INTERVALO            |  |
| 4400 | CC | DEFINICAO PARA O ESPACAMENTO DOS DORMENTES                     |  |
| 4500 | CC | AREA DE APLICACAO PARA DORMENTES DE MADEIRA                    |  |
| 4600 | CC | AREA DE APLICACAO PARA DORMENTES DE CONCRETO                   |  |
| 4700 | CC | VALOR INICIAL PARA O PROCESSO DE BUSCA NO INTERVALO            |  |
| 4800 | CC | DEFINICAO PARA O ESPACAMENTO DOS DORMENTES                     |  |
| 4900 | CC | AREA DE APLICACAO PARA DORMENTES DE MADEIRA                    |  |
| 5000 | CC | AREA DE APLICACAO PARA DORMENTES DE CONCRETO                   |  |
| 5100 | CC | VALOR INICIAL PARA O PROCESSO DE BUSCA NO INTERVALO            |  |
| 5200 | CC | DEFINICAO PARA O ESPACAMENTO DOS DORMENTES                     |  |
| 5300 | CC | AREA DE APLICACAO PARA DORMENTES DE MADEIRA                    |  |
| 5400 | CC | AREA DE APLICACAO PARA DORMENTES DE CONCRETO                   |  |
| 5500 | CC | VALOR INICIAL PARA O PROCESSO DE BUSCA NO INTERVALO            |  |
| 5600 | CC | DEFINICAO PARA O ESPACAMENTO DOS DORMENTES                     |  |
| 5700 | CC | AREA DE APLICACAO PARA DORMENTES DE MADEIRA                    |  |
| 5800 | CC | AREA DE APLICACAO PARA DORMENTES DE CONCRETO                   |  |
| 5900 | CC | VALOR INICIAL PARA O PROCESSO DE BUSCA NO INTERVALO            |  |
| 6000 | CC | DEFINICAO PARA O ESPACAMENTO DOS DORMENTES                     |  |
| 6100 | CC | AREA DE APLICACAO PARA DORMENTES DE MADEIRA                    |  |
| 6200 | CC | AREA DE APLICACAO PARA DORMENTES DE CONCRETO                   |  |
| 6300 | CC | VALOR INICIAL PARA O PROCESSO DE BUSCA NO INTERVALO            |  |
| 6400 | CC | DEFINICAO PARA O ESPACAMENTO DOS DORMENTES                     |  |
| 6500 | CC | AREA DE APLICACAO PARA DORMENTES DE MADEIRA                    |  |
| 6600 | CC | AREA DE APLICACAO PARA DORMENTES DE CONCRETO                   |  |
| 6700 | CC | VALOR INICIAL PARA O PROCESSO DE BUSCA NO INTERVALO            |  |
| 6800 | CC | DEFINICAO PARA O ESPACAMENTO DOS DORMENTES                     |  |
| 6900 | CC | AREA DE APLICACAO PARA DORMENTES DE MADEIRA                    |  |
| 7000 | CC | AREA DE APLICACAO PARA DORMENTES DE CONCRETO                   |  |
| 7100 | CC | VALOR INICIAL PARA O PROCESSO DE BUSCA NO INTERVALO            |  |
| 7200 | CC | DEFINICAO PARA O ESPACAMENTO DOS DORMENTES                     |  |
| 7300 | CC | AREA DE APLICACAO PARA DORMENTES DE MADEIRA                    |  |
| 7400 | CC | AREA DE APLICACAO PARA DORMENTES DE CONCRETO                   |  |
| 7500 | CC | VALOR INICIAL PARA O PROCESSO DE BUSCA NO INTERVALO            |  |
| 7600 | CC | DEFINICAO PARA O ESPACAMENTO DOS DORMENTES                     |  |

|       |   |  |                      |
|-------|---|--|----------------------|
| 7760  | C | VIDA(6) - VIDA LITIL DE SUB-LASTRE (ANOS)                    |                      |
| 7800  | C | VIDA(7) - VIDA LITIL DAS FAZCULES (ANOS)                     |                      |
| 7900  | C | VIDA(8) - VIDA LITIL DA CAMADA FINAL DE CCRETO (ANOS)        | TERRAPLENAGEM (ANOS) |
| 8000  | C | VIDA(9) - VIDA LITIL DOS CORMENTES DE CCRETO (ANOS)          | CCCRETO (ANOS)       |
| 8100  | C | K11 - LIMITE DA PRESSAG TRANSMITIDA PELOS DORMENTES (KG/CM2) |                      |
| 8200  | C | K22 - LIMITE INFERIOR DA ALTURA DO LASTRE (CM)               |                      |
| 8300  | C | K42 - LIMITE SUPERIOR DA ALTURA DO LASTRE (CM)               |                      |
| 8400  | C | K44 - LIMITE DA DEFLEXAO MAXIMA DO LASTRE (CM)               |                      |
| 8500  | C |  |                      |
| 8600  | C |  |                      |
| 8700  | C |  |                      |
| 8800  | C |  |                      |
| 8900  | C |  |                      |
| 9000  | C |  |                      |
| 9100  | C |  |                      |
| 9200  | C |  |                      |
| 9300  | C |  |                      |
| 9400  | C |  |                      |
| 9500  | C |  |                      |
| 9600  | C |  |                      |
| 9700  | C |  |                      |
| 9800  | C |  |                      |
| 9900  | C |  |                      |
| 10000 | C |  |                      |
| 10100 | C |  |                      |
| 10200 | C |  |                      |
| 10300 | C |  |                      |
| 10400 | C |  |                      |
| 10500 | C |  |                      |
| 10600 | C |  |                      |
| 10700 | C |  |                      |
| 10800 | C |  |                      |
| 10900 | C |  |                      |
| 11000 | C |  |                      |
| 11100 | C |  |                      |
| 11200 | C |  |                      |
| 11300 | C |  |                      |
| 11400 | C |  |                      |
| 11500 | C |  |                      |
| 11600 | C |  |                      |
| 11700 | C |  |                      |
| 11800 | C |  |                      |
| 11900 | C |  |                      |
| 12000 | C |  |                      |
| 12100 | C |  |                      |
| 12200 | C |  |                      |
| 12300 | C |  |                      |
| 12400 | C |  |                      |
| 12500 | C |  |                      |
| 12600 | C |  |                      |
| 12700 | C |  |                      |
| 12800 | C |  |                      |
| 12900 | C |  |                      |
| 13000 | C |  |                      |





```

17100 20 R=I*2.0
17110 30 CALL HECRE(F,X,FUNC2)
17120 40 I=1
17130 50 I=I+1
17140 32 FOR Y=1 TO 32: GOTO 17150
17150 35 GOTO 17160
17160 38 FOR X=1 TO 32: GOTO 17170
17170 40 GOTO 17180
17180 42 FOR J=1 TO 32: GOTO 17190
17190 45 GOTO 17200
17200 48 GOTO 17210
17210 50 GOTO 17220
17220 52 GOTO 17230
17230 55 GOTO 17240
17240 58 GOTO 17250
17250 60 GOTO 17260
17260 62 GOTO 17270
17270 65 GOTO 17280
17280 68 GOTO 17290
17290 70 GOTO 17300
17300 72 GOTO 17310
17310 75 GOTO 17320
17320 78 GOTO 17330
17330 80 GOTO 17340
17340 82 GOTO 17350
17350 85 GOTO 17360
17360 88 GOTO 17370
17370 90 GOTO 17380
17380 92 GOTO 17390
17390 95 GOTO 17400
17400 98 GOTO 17410
17410 100 GOTO 17420
17420 102 GOTO 17430
17430 105 GOTO 17440
17440 108 GOTO 17450
17450 110 GOTO 17460
17460 112 GOTO 17470
17470 115 GOTO 17480
17480 118 GOTO 17490
17490 120 GOTO 17500
17500 122 GOTO 17510
17510 125 GOTO 17520
17520 128 GOTO 17530
17530 130 GOTO 17540
17540 132 GOTO 17550
17550 135 GOTO 17560
17560 138 GOTO 17570
17570 140 GOTO 17580
17580 142 GOTO 17590
17590 145 GOTO 17600
17600 148 GOTO 17610
17610 150 GOTO 17620
17620 152 GOTO 17630
17630 155 GOTO 17640
17640 158 GOTO 17650
17650 160 GOTO 17660
17660 162 GOTO 17670
17670 165 GOTO 17680
17680 168 GOTO 17690
17690 170 GOTO 17700
17700 172 GOTO 17710
17710 175 GOTO 17720
17720 178 GOTO 17730
17730 180 GOTO 17740
17740 182 GOTO 17750
17750 185 GOTO 17760
17760 188 GOTO 17770
17770 190 GOTO 17780
17780 192 GOTO 17790
17790 195 GOTO 17800
17800 198 GOTO 17810
17810 200 GOTO 17820
17820 202 GOTO 17830
17830 205 GOTO 17840
17840 208 GOTO 17850
17850 210 GOTO 17860
17860 212 GOTO 17870
17870 215 GOTO 17880
17880 218 GOTO 17890
17890 220 GOTO 17900
17900 222 GOTO 17910
17910 225 GOTO 17920
17920 228 GOTO 17930
17930 230 GOTO 17940
17940 232 GOTO 17950
17950 235 GOTO 17960
17960 238 GOTO 17970
17970 240 GOTO 17980
17980 242 GOTO 17990
17990 245 GOTO 18000
18000 248 GOTO 18010
18010 250 GOTO 18020
18020 252 GOTO 18030
18030 255 GOTO 18040
18040 258 GOTO 18050
18050 260 GOTO 18060
18060 262 GOTO 18070
18070 265 GOTO 18080
18080 268 GOTO 18090
18090 270 GOTO 18100
18100 272 GOTO 18110
18110 275 GOTO 18120
18120 278 GOTO 18130
18130 280 GOTO 18140
18140 282 GOTO 18150
18150 285 GOTO 18160
18160 288 GOTO 18170
18170 290 GOTO 18180
18180 292 GOTO 18190
18190 295 GOTO 18200
18200 298 GOTO 18210
18210 300 GOTO 18220
18220 302 GOTO 18230
18230 305 GOTO 18240
18240 308 GOTO 18250
18250 310 GOTO 18260
18260 312 GOTO 18270
18270 315 GOTO 18280
18280 318 GOTO 18290
18290 320 GOTO 18300
18300 322 GOTO 18310
18310 325 GOTO 18320
18320 328 GOTO 18330
18330 330 GOTO 18340
18340 332 GOTO 18350
18350 335 GOTO 18360
18360 338 GOTO 18370
18370 340 GOTO 18380
18380 342 GOTO 18390
18390 345 GOTO 18400
18400 348 GOTO 18410
18410 350 GOTO 18420
18420 352 GOTO 18430
18430 355 GOTO 18440
18440 358 GOTO 18450
18450 360 GOTO 18460
18460 362 GOTO 18470
18470 365 GOTO 18480
18480 368 GOTO 18490
18490 370 GOTO 18500
18500 372 GOTO 18510
18510 375 GOTO 18520
18520 378 GOTO 18530
18530 380 GOTO 18540
18540 382 GOTO 18550
18550 385 GOTO 18560
18560 388 GOTO 18570
18570 390 GOTO 18580
18580 392 GOTO 18590
18590 395 GOTO 18600
18600 398 GOTO 18610
18610 400 GOTO 18620
18620 402 GOTO 18630
18630 405 GOTO 18640
18640 408 GOTO 18650
18650 410 GOTO 18660
18660 412 GOTO 18670
18670 415 GOTO 18680
18680 418 GOTO 18690
18690 420 GOTO 18700
18700 422 GOTO 18710
18710 425 GOTO 18720
18720 428 GOTO 18730
18730 430 GOTO 18740
18740 432 GOTO 18750
18750 435 GOTO 18760
18760 438 GOTO 18770
18770 440 GOTO 18780
18780 442 GOTO 18790
18790 445 GOTO 18800
18800 448 GOTO 18810
18810 450 GOTO 18820
18820 452 GOTO 18830
18830 455 GOTO 18840
18840 458 GOTO 18850
18850 460 GOTO 18860
18860 462 GOTO 18870
18870 465 GOTO 18880
18880 468 GOTO 18890
18890 470 GOTO 18900
18900 472 GOTO 18910
18910 475 GOTO 18920
18920 478 GOTO 18930
18930 480 GOTO 18940
18940 482 GOTO 18950
18950 485 GOTO 18960
18960 488 GOTO 18970
18970 490 GOTO 18980
18980 492 GOTO 18990
18990 495 GOTO 19000
19000 498 GOTO 19010
19010 500 GOTO 19020
19020 502 GOTO 19030
19030 505 GOTO 19040
19040 508 GOTO 19050
19050 510 GOTO 19060
19060 512 GOTO 19070
19070 515 GOTO 19080
19080 518 GOTO 19090
19090 520 GOTO 19100
19100 522 GOTO 19110
19110 525 GOTO 19120
19120 528 GOTO 19130
19130 530 GOTO 19140
19140 532 GOTO 19150
19150 535 GOTO 19160
19160 538 GOTO 19170
19170 540 GOTO 19180
19180 542 GOTO 19190
19190 545 GOTO 19200
19200 548 GOTO 19210
19210 550 GOTO 19220
19220 552 GOTO 19230
19230 555 GOTO 19240
19240 558 GOTO 19250
19250 560 GOTO 19260
19260 562 GOTO 19270
19270 565 GOTO 19280
19280 568 GOTO 19290
19290 570 GOTO 19300
19300 572 GOTO 19310
19310 575 GOTO 19320
19320 578 GOTO 19330
19330 580 GOTO 19340
19340 582 GOTO 19350
19350 585 GOTO 19360
19360 588 GOTO 19370
19370 590 GOTO 19380
19380 592 GOTO 19390
19390 595 GOTO 19400
19400 598 GOTO 19410
19410 600 GOTO 19420
19420 602 GOTO 19430
19430 605 GOTO 19440
19440 608 GOTO 19450
19450 610 GOTO 19460
19460 612 GOTO 19470
19470 615 GOTO 19480
19480 618 GOTO 19490
19490 620 GOTO 19500
19500 622 GOTO 19510
19510 625 GOTO 19520
19520 628 GOTO 19530
19530 630 GOTO 19540
19540 632 GOTO 19550
19550 635 GOTO 19560
19560 638 GOTO 19570
19570 640 GOTO 19580
19580 642 GOTO 19590
19590 645 GOTO 19600
19600 648 GOTO 19610
19610 650 GOTO 19620
19620 652 GOTO 19630
19630 655 GOTO 19640
19640 658 GOTO 19650
19650 660 GOTO 19660
19660 662 GOTO 19670
19670 665 GOTO 19680
19680 668 GOTO 19690
19690 670 GOTO 19700
19700 672 GOTO 19710
19710 675 GOTO 19720
19720 678 GOTO 19730
19730 680 GOTO 19740
19740 682 GOTO 19750
19750 685 GOTO 19760
19760 688 GOTO 19770
19770 690 GOTO 19780
19780 692 GOTO 19790
19790 695 GOTO 19800
19800 698 GOTO 19810
19810 700 GOTO 19820
19820 702 GOTO 19830
19830 705 GOTO 19840
19840 708 GOTO 19850
19850 710 GOTO 19860
19860 712 GOTO 19870
19870 715 GOTO 19880
19880 718 GOTO 19890
19890 720 GOTO 19900
19900 722 GOTO 19910
19910 725 GOTO 19920
19920 728 GOTO 19930
19930 730 GOTO 19940
19940 732 GOTO 19950
19950 735 GOTO 19960
19960 738 GOTO 19970
19970 740 GOTO 19980
19980 742 GOTO 19990
19990 745 GOTO 20000
20000 748 GOTO 20010
20010 750 GOTO 20020
20020 752 GOTO 20030
20030 755 GOTO 20040
20040 758 GOTO 20050
20050 760 GOTO 20060
20060 762 GOTO 20070
20070 765 GOTO 20080
20080 768 GOTO 20090
20090 770 GOTO 20100
20100 772 GOTO 20110
20110 775 GOTO 20120
20120 778 GOTO 20130
20130 780 GOTO 20140
20140 782 GOTO 20150
20150 785 GOTO 20160
20160 788 GOTO 20170
20170 790 GOTO 20180
20180 792 GOTO 20190
20190 795 GOTO 20200
20200 798 GOTO 20210
20210 800 GOTO 20220
20220 802 GOTO 20230
20230 805 GOTO 20240
20240 808 GOTO 20250
20250 810 GOTO 20260
20260 812 GOTO 20270
20270 815 GOTO 20280
20280 818 GOTO 20290
20290 820 GOTO 20300
20300 822 GOTO 20310
20310 825 GOTO 20320
20320 828 GOTO 20330
20330 830 GOTO 20340
20340 832 GOTO 20350
20350 835 GOTO 20360
20360 838 GOTO 20370
20370 840 GOTO 20380
20380 842 GOTO 20390
20390 845 GOTO 20400
20400 848 GOTO 20410
20410 850 GOTO 20420
20420 852 GOTO 20430
20430 855 GOTO 20440
20440 858 GOTO 20450
20450 860 GOTO 20460
20460 862 GOTO 20470
20470 865 GOTO 20480
20480 868 GOTO 20490
20490 870 GOTO 20500
20500 872 GOTO 20510
20510 875 GOTO 20520
20520 878 GOTO 20530
20530 880 GOTO 20540
20540 882 GOTO 20550
20550 885 GOTO 20560
20560 888 GOTO 20570
20570 890 GOTO 20580
20580 892 GOTO 20590
20590 895 GOTO 20600
20600 898 GOTO 20610
20610 900 GOTO 20620
20620 902 GOTO 20630
20630 905 GOTO 20640
20640 908 GOTO 20650
20650 910 GOTO 20660
20660 912 GOTO 20670
20670 915 GOTO 20680
20680 918 GOTO 20690
20690 920 GOTO 20700
20700 922 GOTO 20710
20710 925 GOTO 20720
20720 928 GOTO 20730
20730 930 GOTO 20740
20740 932 GOTO 20750
20750 935 GOTO 20760
20760 938 GOTO 20770
20770 940 GOTO 20780
20780 942 GOTO 20790
20790 945 GOTO 20800
20800 948 GOTO 20810
20810 950 GOTO 20820
20820 952 GOTO 20830
20830 955 GOTO 20840
20840 958 GOTO 20850
20850 960 GOTO 20860
20860 962 GOTO 20870
20870 965 GOTO 20880
20880 968 GOTO 20890
20890 970 GOTO 20900
20900 972 GOTO 20910
20910 975 GOTO 20920
20920 978 GOTO 20930
20930 980 GOTO 20940
20940 982 GOTO 20950
20950 985 GOTO 20960
20960 988 GOTO 20970
20970 990 GOTO 20980
20980 992 GOTO 20990
20990 995 GOTO 21000
21000 998 GOTO 21010
21010 1000 GOTO 21020
21020 1002 GOTO 21030
21030 1005 GOTO 21040
21040 1008 GOTO 21050
21050 1010 GOTO 21060
21060 1012 GOTO 21070
21070 1015 GOTO 21080
21080 1018 GOTO 21090
21090 1020 GOTO 21100
21100 1022 GOTO 21110
21110 1025 GOTO 21120
21120 1028 GOTO 21130
21130 1030 GOTO 21140
21140 1032 GOTO 21150
21150 1035 GOTO 21160
21160 1038 GOTO 21170
21170 1040 GOTO 21180
21180 1042 GOTO 21190
21190 1045 GOTO 21200
21200 1048 GOTO 21210
21210 1050 GOTO 21220
21220 1052 GOTO 21230
21230 1055 GOTO 21240
21240 1058 GOTO 21250
21250 1060 GOTO 21260
21260 1062 GOTO 21270
21270 1065 GOTO 21280
21280 1068 GOTO 21290
21290 1070 GOTO 21300
21300 1072 GOTO 21310
21310 1075 GOTO 21320
21320 1078 GOTO 21330
21330 1080 GOTO 21340
21340 1082 GOTO 21350
21350 1085 GOTO 21360
21360 1088 GOTO 21370
21370 1090 GOTO 21380
21380 1092 GOTO 21390
21390 1095 GOTO 21400
21400 1098 GOTO 21410
21410 1100 GOTO 21420
21420 1102 GOTO 21430
21430 1105 GOTO 21440
21440 1108 GOTO 21450
21450 1110 GOTO 21460
21460 1112 GOTO 21470
21470 1115 GOTO 21480
21480 1118 GOTO 21490
21490 1120 GOTO 21500
21500 1122 GOTO 21510
21510 1125 GOTO 21520
21520 1128 GOTO 21530
21530 1130 GOTO 21540
21540 1132 GOTO 21550
21550 1135 GOTO 21560
21560 1138 GOTO 21570
21570 1140 GOTO 21580
21580 1142 GOTO 21590
21590 1145 GOTO 21600
21600 1148 GOTO 21610
21610 1150 GOTO 21620
21620 1152 GOTO 21630
21630 1155 GOTO 21640
21640 1158 GOTO 21650
21650 1160 GOTO 21660
21660 1162 GOTO 21670
21670 1165 GOTO 21680
21680 1168 GOTO 21690
21690 1170 GOTO 21700
21700 1172 GOTO 21710
21710 1175 GOTO 21720
21720 1178 GOTO 21730
21730 1180 GOTO 21740
21740 1182 GOTO 21750
21750 1185 GOTO 21760
21760 1188 GOTO 21770
21770 1190 GOTO 21780
21780 1192 GOTO 21790
21790 1195 GOTO 21800
21800 1198 GOTO 21810
21810 1200 GOTO 21820
21820 1202 GOTO 21830
21830 1205 GOTO 21840
21840 1208 GOTO 21850
21850 1210 GOTO 21860
21860 1212 GOTO 21870
21870 1215 GOTO 21880
21880 1218 GOTO 21890
21890 1220 GOTO 21900
21900 1222 GOTO 21910
21910 1225 GOTO 21920
21920 1228 GOTO 21930
21930 1230 GOTO 21940
21940 1232 GOTO 21950
21950 1235 GOTO 21960
21960 1238 GOTO 21970
21970 1240 GOTO 21980
21980 1242 GOTO 21990
21990 1245 GOTO 22000
22000 1248 GOTO 22010
22010 1250 GOTO 22020
22020 1252 GOTO 22030
22030 1255 GOTO 22040
22040 1258 GOTO 22050
22050 1260 GOTO 22060
22060 1262 GOTO 22070
22070 1265 GOTO 22080
22080 1268 GOTO 22090
22090 1270 GOTO 22100
22100 1272 GOTO 22110
22110 1275 GOTO 22120
22120 1278 GOTO 22130
22130 1280 GOTO 22140
22140 1282 GOTO 22150
22150 1285 GOTO 22160
22160 1288 GOTO 22170
22170 1290 GOTO 22180
22180 1292 GOTO 22190
22190 1295 GOTO 22200
22200 1298 GOTO 22210
22210 1300 GOTO 22220
22220 1302 GOTO 22230
22230 1305 GOTO 22240
22240 1308 GOTO 22250
22250 1310 GOTO 22260
22260 1312 GOTO 22270
22270 1315 GOTO 22280
22280 1318 GOTO 22290
22290 1320 GOTO 22300
22300 1322 GOTO 22310
22310 1325 GOTO 22320
22320 1328 GOTO 22330
22330 1330 GOTO 22340
22340 1332 GOTO 22350
22350 1335 GOTO 22360
22360 1338 GOTO 22370
22370 1340 GOTO 22380
22380 1342 GOTO 22390
22390 1345 GOTO 22400
22400 1348 GOTO 22410
22410 1350 GOTO 22420
22420 1352 GOTO 22430
22430 1355 GOTO 22440
22440 1358 GOTO 22450
22450 1360 GOTO 22460
22460 1362 GOTO 22470
22470 1365 GOTO 22480
22480 1368 GOTO 22490
22490 1370 GOTO 22500
22500 1372 GOTO 22510
22510 1375 GOTO 22520
22520 1378 GOTO 22530
22530 1380 GOTO 22540
22540 1382 GOTO 22550
22550 1385 GOTO 22560
22560 1388 GOTO 22570
22570 1390 GOTO 22580
22580 1392 GOTO 22590
22590 1395 GOTO 22600
22600 1398 GOTO 22610
22610 1400 GOTO 22620
22620 1402 GOTO 22630
22630 1405 GOTO 22640
22640 1408 GOTO 22650
22650 1410 GOTO 22660
22660 1412 GOTO 22670
22670 1415 GOTO 22680
22680 1418 GOTO 22690
22690 1420 GOTO 22700
22700 1422 GOTO 22710
22710 1425 GOTO 22720
22720 1428 GOTO 22730
22730 1430 GOTO 22740
22740 1432 GOTO 22750
22750 1435 GOTO 22760
22760 1438 GOTO 22770
22770 1440 GOTO 22780
22780 1442 GOTO 22790
22790 1445 GOTO 22800
22800 1448 GOTO 22810
22810 1450 GOTO 22820
22820 1452 GOTO 22830
22830 1455 GOTO 22840
22840 1458 GOTO 22850
22850 1460 GOTO 22860
22860 1462 GOTO 22870
22870 1465 GOTO 22880
22880 1468 GOTO 22890
22890 1470 GOTO 22900
22900 1472 GOTO 22910
22910 1475 GOTO 22920
22920 1478 GOTO 22930
22930 1480 GOTO 22940
22940 1482 GOTO 22950
22950 1485 GOTO 22960
22960 1488 GOTO 22970
22970 1490 GOTO 22980
22980 1492 GOTO 22990
22990 1495 GOTO 23000
23000 1498 GOTO 23010
23010 1500 GOTO 23020
23020 1502 GOTO 23030
23030 1505 GOTO 23040
23040 1508 GOTO 23050
23050 1510 GOTO 23060
23060 1512 GOTO 23070
23070 1515 GOTO 23080
23080 1518 GOTO 23090
23090 1520 GOTO 23100
23100 1522 GOTO 23110
23110 1525 GOTO 23120
23120 1528 GOTO 23130
23130 1530 GOTO 23140
23140 1532 GOTO 23150
23150 1535 GOTO 23160
23160 1538 GOTO 23170
23170 1540 GOTO 23180
23180 1542 GOTO 23190
23190 1545 GOTO 23200
23200 1548 GOTO 23210
23210 1550 GOTO 23220
23220 1552 GOTO 23230
23230 1555 GOTO 23240
23240 1558 GOTO 23250
23250 1560 GOTO 23260
23260 1562 GOTO 23270
23270 1565 GOTO 23280
23280 1568 GOTO 23290
23290 1570 GOTO 23300
23300 1572 GOTO 23310
23310 1575 GOTO 23320
23320 1578 GOTO 23330
23330 1580 GOTO 23340
23340 1582 GOTO 23350
23350 1585 GOTO 23360
23360 1588 GOTO 23370
23370 1590 GOTO 23380
23380 1592 GOTO 23390
23390 1595 GOTO 23400
23400 1598 GOTO 23410
23410 1600 GOTO 23420
23420 1602 GOTO 23430
23430 1605 GOTO 23440
23440 1608 GOTO 23450
23450 1610 GOTO 23460
23460 1612 GOTO 23470
23470 1615 GOTO 23480
23480 1618 GOTO 23490
23490 1620 GOTO 23500
23500 1622 GOTO 23510
23510 1625 GOTO 23520
23520 1628 GOTO 23530
23530 1630 GOTO 23540
23540 1632 GOTO 23550
23550 1635 GOTO 23560
23560 1638 GOTO 23570
23570 1640 GOTO 23580
23580 1642 GOTO 23590
23590 1645 GOTO 23600
23600 1648 GOTO 23610
23610 1650 GOTO 23620
23620 1652 GOTO 23630
23630 1655 GOTO 23640
23640 1658 GOTO 23650
23650 1660 GOTO 23660
23660 1662 GOTO 23670
23670 1665 GOTO 23680
23680 1668 GOTO 23690
23690 1670 GOTO 23700
23700 1672 GOTO 23710
23710 1675 GOTO 23720
23720 1678 GOTO 23730
23730 1680 GOTO 23740
23740 1682 GOTO 23750
23750 1685 GOTO 23760
23760 1688 GOTO 23770
23770 1690 GOTO 23780
23780 1692 GOTO 23790
237
```

|       |     |                             |
|-------|-----|-----------------------------|
| 21600 | 52  | RED=RED*2.C                 |
| 21700 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 21800 | 45  | IFACID=XMX(CI)              |
| 21900 | 53  | ACID=ETACI)                 |
| 22000 |     | CALL SUBROUTINE(1)          |
| 22100 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 22200 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 22300 | 46  | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 22400 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 22500 | 54  | RED=ETACI)                  |
| 22600 | 55  | IFACID=X(CI)-C(CI)ZSEED     |
| 22700 |     | IFC(ACID)=XMX(CI)56*57*57   |
| 22800 | 56  | RED=RED*2.C                 |
| 22900 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 23000 | 47  | IFACID=XMX(CI)              |
| 23100 | 57  | ACID=ETACI)                 |
| 23200 |     | CALL SUBROUTINE(1)          |
| 23300 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 23400 | 60  | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 23500 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 23600 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 23700 | 90  | SUM=EDUM*2                  |
| 23800 | 100 | CONTINUE                    |
| 23900 |     |                             |
| 24000 |     | TESTE DE CONVERGENCIA FINAL |
| 24100 |     |                             |
| 24200 |     | DE 200 I=1,N                |
| 24300 |     | IF(ACID)=X(CI)ICI*200*101   |
| 24400 |     | CALL SUBROUTINE(1)          |
| 24500 | 200 | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 24600 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 24700 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 24800 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 24900 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 25000 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 25100 | 250 | RED=ETACI)                  |
| 25200 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 25300 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 25400 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 25500 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 25600 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 25700 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 25800 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 25900 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 26000 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 26100 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 26200 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 26300 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 26400 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 26500 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 26600 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 26700 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 26800 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 26900 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 27000 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 27100 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 27200 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 27300 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 27400 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 27500 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 27600 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 27700 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 27800 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 27900 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 28000 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 28100 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 28200 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 28300 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 28400 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 28500 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 28600 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 28700 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 28800 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 28900 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 29000 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 29100 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 29200 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 29300 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 29400 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 29500 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 29600 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 29700 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 29800 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 29900 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |
| 30000 |     | IFC(RED)=C.C)E1*51*45       |

MOVIMENTACAO DIFERENCIAL

TESTE DE CONVERGENCIA FINAL

DE 200 I=1,N

IF(ACID)=X(CI)ICI\*200\*101

CALL SUBROUTINE(1)

IFC(RED)=C.C)E1\*51\*45

IFC(RED)=C.C)E1\*51\*45







```

402000 SUBROUTINE INLEU (A,AS,JC,T,LE,I,M,K(15),VIDA(C10),FFC(10),XMN(C10),XS
403000 CCMXN,N,PEPS,ZED,C,REST,FRI,FP2,A1,NS,PS,EE,AE,Z,HS,FC,NB,C,II,E,CD,N
404000 *TR(C10),XYX(C10))
405000 *N,K,II,M22,A23,JL
406000
407000 JECVIDA(J)=I
408000 JECVIDA(J)=I+JLE)*VIDA(J))/((I.*JUR)*VIDA(J))-1.)
409000 JEC(J)=CJUR*(I.+JLE)*VIDA(J))
410000 10 CONTINUE
411000
412000 CAD
413000 *****
414000 CUNIFGLE CC CLSIC MINING CA FUN.CAC OBJECTIVE *****
415000 *****
416000 SUBROUTINE VALMIN (Y,F) *****
417000 DIMENSION YC(10) *****
418000 CCMXN,N,PEPS,ZED,APAS,JCIN,LE,I,M,K(15),VIDA(C10),FFC(10),XMN(C10),XS
419000 *TR(C10),XYX(C10),REST,FRI,FP2,A1,NS,PS,EE,AE,Z,HS,FC,NB,C,II,E,CD,N
420000 *N,K,II,M22,A23,JL,TRILH,K,IVEL,CUTIC,ORNT,LASIF,SULAS,FIXAC,CFT
421000 *PEPS=ME*3+1
422000
423000 I=1
424000 2 CALL CCMIN(I)DET 10 4
425000 3
426000 3 CCMIN(I)=F1
427000 CCMIN(I)=F2
428000 CCMIN(I)=F3
429000 CCMIN(I)=F4
430000 CCMIN(I)=F5
431000 CCMIN(I)=F6
432000 CCMIN(I)=F7
433000 4 RETURN
434000 END

```

## APÊNDICE B

### PROGRAMA PENAL

#### 1. Análise Conceitual

A estrutura conceitual do programa PENAL é baseada em uma busca exploratória e direcional dos valores das variáveis de decisão que situados entre os limites inferior e superior fixados, minimizem a função custo total anual e satisfaçam as restrições impostas pelo projeto.

#### 2. Estrutura Geral

Para fins de adaptação ou modificação das metodologias para dimensionamento mecânico da via e para determinação do custo total anual, o PENAL foi elaborado com uma estrutura modular de fácil compreensão quanto a sua funcionalidade.

#### 3. Versões Produzidas

Para exemplificar a versatilidade conceitual do programa PENAL foram elaboradas três versões, cada uma utilizando metodologias para determinação dos esforços no conjunto superestrutura ferroviária distintas, como mostra o Quadro 20.

## QUADRO 20: Versões do Programa Penal

| Denominação | Metodologia Empregada |
|-------------|-----------------------|
| PENAL 1     | Zimmermann (4)        |
|             | J.N.R. (14)           |
|             | Heukelom (19) e (20)  |
| PENAL 2     | Zimmermann (43)       |
|             | Love (16)             |
|             | Heukelom (19) e (20)  |
| PENAL 3     | Talbot (10) e (13)    |
|             | Heukelom (19) e (20)  |

Em todas as três versões foi adotada a metodologia desenvolvida por Rodrigues<sup>1,2</sup> para a determinação da vida útil e o custo anual de cada material ou serviço empregado no conjunto superestrutura ferroviária e camada final de terraplenagem.

#### 4. O Programa Penal

O programa PENAL está constituído de um arquivo de entrada de dados (PENALIN), o programa fonte constituído pelo programa principal com sete subrotinas e o arquivo de saída dos resultados (PENALOUT) conforme mostra-se na Figura 5. O programa foi desenvolvido para terminal de vídeo do computador Burroughs 6900 implantado no Instituto Militar de Engenharia.



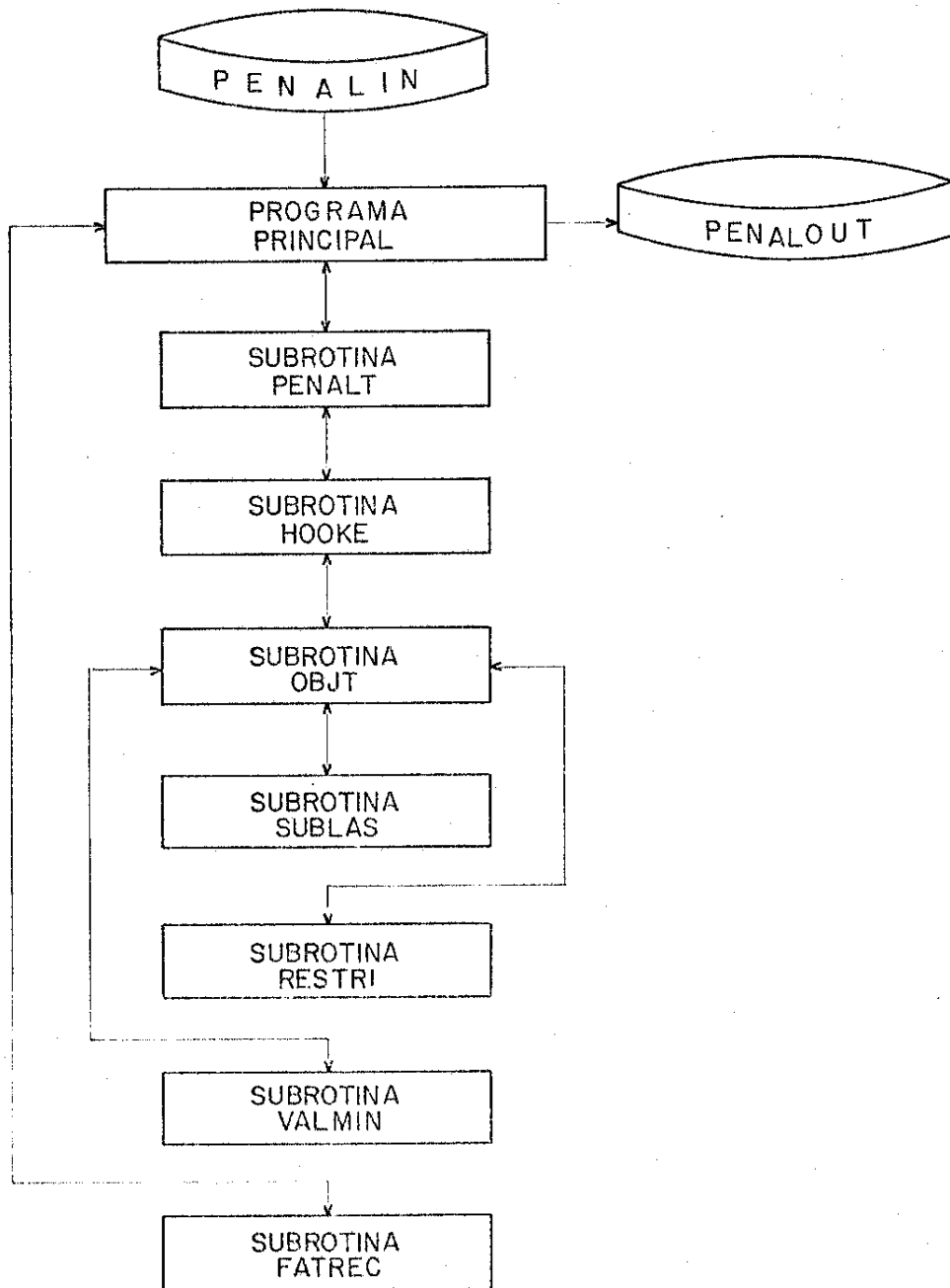


FIGURA 5: Programa Penal - Diagrama de Blocos

#### 4.1 - Programa Fonte

O programa fonte compõe-se das seguintes partes:

a) PROGRAMA PRINCIPAL - lê o arquivo PENALIN, chama a subrotina FATREC e a PENALT e produz o arquivo PENALOUT;

b) Subrotina FATREC - calcula o fator de recuperação de capital para cada material ou serviço da superestrutura com base no custo de oportunidade do capital e na vida útil dos materiais e serviços;

c) Subrotina PENALT - determina o fator de penalidade a ser imposto a função penalidade, controla a aproximação dos resultados e chama a subrotina HOOKE;

d) Subrotina HOOKE - calcula o passo inicial para cada variável independente, faz a busca exploratória e movimentação direcional, incrementa as variáveis ao longo dos seus campos e chama a subrotina OBJT;

e) Subrotina OBJT - chama a subrotina SUBLAS e RESTRI, calcula as funções penalidades, determina os valores das funções objeto e resposta, imprime resultados parciais das iterações e chama a subrotina VALMIN;

f) Subrotina SUBLAS - calcula as funções restritivas e determina a altura do sublastro;

g) Subrotina RESTRI - determina o valor do custo para cada área de apoio e capacidade suporte da fundação

em função do tipo de dormente e CBR respectivamente;

h) Subrotina VALMIN - controla e guarda o valor mínimo da função resposta que atende as funções restritivas.

#### 4.2 - Arquivo de Dados

O arquivo PENALIN contém toda a base de informações de dados, os que no Quadro 21 aparecem com os respectivos formatos, que são necessários para caracterizar a alternativa que se procura otimizar.

A definição dos elementos do PENALIN é apresentada a seguir.

TITL (L) - Título Geral

N - Número de variáveis independentes

EPS - Precisão das iterações

DDD - Passo inicial

JOTM - Indicador do processo de minimização (-1)

XMN (1) - Limite inferior do intervalo de variação do espaçamento dos dormentes

XXM (1) - Limite superior do intervalo de variação do espaçamento dos dormentes

XSTRT(1) - Valor inicial para o processo de busca no intervalo definido para o espaçamento dos dormentes

XMN(2) - Área de apoio mínima para dormentes de madeira

XXM(2) - Área de apoio máxima para dormentes de concreto

QUADRO 21: Arquivo Penalin.

| Linha | Elementos      | e              | Formatação     |
|-------|----------------|----------------|----------------|
| 100   |                | Título (18A4)  |                |
| 200   | N(I10)         | EPS(I10.7)     |                |
| 300   | XMN(1)(F5.0)   | DDD(F10.3)     | JOTM(I10)      |
| 400   | XMN(2)(F5.0)   | XSTRT(1)(F5.0) | XMN(1)(F5.0)   |
| 500   | XMN(3)(F5.0)   | XSTRT(2)(F5.0) | XMN(2)(F5.0)   |
| 600   | QD(F10.0)      | XSTRT(3)(F5.0) | XMN(3)(F5.0)   |
| 700   | NN(I10)        | WT(F10.0)      | N1(I10)        |
| 800   | N5(F10.2)      | JUR(F10.2)     |                |
| 900   | C(F10.2)       | N8(F10.2)      | HC(F10.2)      |
| 1000  | D1(F10.2)      | B5(F10.2)      | AA(F10.2)      |
| 1100  | K(1)(F10.2)    | N6(F10.2)      |                |
| 1200  | K(6)(F10.2)    | E(F10.2)       |                |
| 1300  |                | D2(F10.2)      |                |
| 1400  | VIDA(1)(F10.2) | K(2)(F10.2)    | K(4)(F10.2)    |
| 1500  | VIDA(6)(F10.2) | K(7)(F10.2)    | K(5)(F10.2)    |
| 1600  | W11(F10.3)     | K(8)(F10.2)    | K(10)(F10.2)   |
|       |                | K(13)(F10.2)   |                |
|       |                | VIDA(3)(F10.2) | K(14)(F10.2)   |
|       |                | VIDA(7)(F10.2) | VIDA(4)(F10.2) |
|       |                | W22(F10.3)     | VIDA(5)(F10.2) |
|       |                |                | VIDA(9)(F10.2) |
|       |                |                | W44(F10.3)     |

- XSTRT(2) - Valor inicial para o processo de busca no intervalo definido para a área de apoio do dormente
- XMN (3) - CBR da camada final de terraplenagem
- XXM (3) - CBR do sub-lastro II
- XSTRT(3) - Valor inicial para o processo de busca no intervalo definido para o CBR
- QD - Carga dinâmica por roda (Kg)
- WT - Tipo do trilho (Kg/m)
- II - Momento de inércia do trilho ( $\text{CM}^4$ )
- N1 - Tonelagem bruta anual
- NN - Número de elementos do vetor vida (LJ)
- JUR - Custo de oportunidades do capital (valor centesimal)
- N5 - Talude do lastro (1:N)
- N6 - Talude do sub-lastro(1:N)
- N8 - Talude da camada final de terraplenagem (1:N)
- Z - Número de jogos de fixações por dormente
- AC - Altura da camada final de terraplenagem (M)
- C - Coeficiente de lastro ( $\text{Kg}/\text{cm}^3$ )
- E - Módulo de elasticidade do aço ( $\text{Kg}/\text{cm}^2$ )

- B5 - Largura de ombreira a ombreira do lastro (M)
- B6 - Largura da plataforma (M)
- AA - CBR do primeiro material para sub-lastro
- D1 - Área de apoio máxima para dormentes de madeira (cm<sup>2</sup>)
- D2 - Área de apoio máxima para dormentes de concreto bi-bloco (cm<sup>2</sup>)
- K (1) - Custo unitário do trilho (Cr\$/t)
- K (2) - Custo unitário do nivelamento, alinhamento e soca ria (Cr\$/Km)
- K (3) - Custo unitário de materiais ou serviços não con-  
vencionais (Cr\$/Km)
- K (4) - Custo unitário do dormente de madeira (Cr\$/un)
- K (5) - Custo unitário do lastro (Cr\$/m<sup>3</sup>)
- K (6) - Custo unitário do sub-lastro I (Cr\$/m<sup>3</sup>)
- K (7) - Custo unitário do jogo de fixações (Cr\$/jogo)
- K (8) - Custo unitário da camada final de terraplenagem  
(Cr\$/m<sup>3</sup>)
- K (9) - Custo unitário do dormente de concreto bi-bloco  
(Cr\$/un)
- K(10) - Custo unitário do dormente de concreto monobloco  
(Cr\$/un)

- K (13) - Custo unitário do sub-lastro II (Cr\$/m<sup>3</sup>)
- K (14) - Custo de soldas (Cr\$/km)
- VIDA(1) - Vida útil do trilho (anos)
- VIDA(2) - Vida útil do nivelamento, alinhamento e soca-  
ria (anos)
- VIDA(3) - Vida útil de serviços não convencionais(anos)
- VIDA(4) - Vida útil do dormente de madeira (anos)
- VIDA(5) - Vida útil do lastro (anos)
- VIDA(6) - Vida útil do sub-lastro (anos)
- VIDA(7) - Vida útil das fixações (anos)
- VIDA(8) - Vida útil da camada final de terraplenagem  
(anos)
- VIDA(9) - Vida útil dos dormentes de concreto (anos)
- W11 - Limite da pressão transmitida pelos dormentes  
(Kg/cm<sup>2</sup>)
- W22 - Limite inferior da altura do lastro (cm)
- W33 - Limite superior da altura do lastro (cm)
- W44 - Limite da deflexão máxima da grade (cm)

#### 4.3 - Arquivo de Saída

O arquivo PENALOUT é o relatório produto de todas as iterações executadas pelo programa fonte na busca de valores para as variáveis independentes que atendam as restrições impostas. Ao final do processo iterativo é pro

duzido um relatório auto-explicativo, contendo os valores otimizados para as variáveis independentes e demais valores decorrentes destas. Algumas informações adicionais sobre os principais dados e restrições impostas encerram esse relatório.

No Quadro 22 e a seguir apresentam-se algumas explicações elucidativas sobre o produto de cada iteração para melhor compreensão dos resultados parciais.

QUADRO 22: Resultados Parciais - Penalout

| EXP = 00.0 | EXP = 000.0 | EXP = 00.0 |      |            |
|------------|-------------|------------|------|------------|
| 00.        |             |            |      |            |
| OBJECT     | 0.          | 00.        | 000. | 00.        |
|            | 0000.       | 000000.00  |      |            |
|            | 0.00        | 0.00       | 0.00 | 0.00       |
|            | 0.00        | 00.00      | 0.00 | 0000000.00 |

Descrição dos elementos:

- 1<sup>a</sup> Linha - valores das variáveis independentes gerados pela subrotina HOOKE;
- 2<sup>a</sup> Linha - altura do sub-lastro;
- 3<sup>a</sup> Linha - nº da iteração e valores das variáveis independentes considerados para os cálculos dos demais



esforços gerados nas interfaces;

4<sup>a</sup> Linha - valor do fator da função penalidade e valor da função objetivo;

5<sup>a</sup> Linha - resíduos gerados pelas funções restritivas: 1<sup>o</sup> elemento: pressão sob os dormentes; 2<sup>o</sup> e 3<sup>o</sup> elementos: altura do lastro; 4<sup>o</sup> elemento: deflexão máxima da grade;

6<sup>a</sup> Linha - valores calculados para a pressão sob os dormentes, altura de lastro, deflexão da grade e função resposta.

Cabe ressaltar complementarmente que se após todas as iterações o relatório final produzir todos os valores iguais a Zero, é porque não foi encontrado nenhum conjunto de valores não nulos para as variáveis independentes. Neste caso o projetista deverá reavaliar os limites impostos tanto para as variáveis independentes quanto para as funções restritivas, pois é o caso de existir alguma incompatibilidade nas mesmas.

APÊNDICE C

CUSTOS UNITÁRIOS - TRANSPORTE FERROVIÁRIO  
METROPOLITANO

QUADRO 23: Custos Unitários - Transporte Ferroviário Me-  
tropolitano (ORTN = Cr\$ 4224.54 e US\$ = Cr\$ 523.56)

| Especificação                      | Unidade | Valor (Cr\$)  |
|------------------------------------|---------|---------------|
| TRILHO                             |         |               |
| - custo usina                      | t       | 235.220,00    |
| - transporte                       | t       | 34.150,00     |
| Sub-total                          |         | 269.370,00    |
| - soldas                           |         |               |
| . elétrica                         | km      | 1.750.000,00  |
| . aluminotérmica                   | km      | 1.314.600,00  |
| Sub-total                          |         | 3.064.600,00  |
| NIVELAMENTO, ALINHAMENTO E SOCARIA |         |               |
| - custo                            | km      | 15.000.000,00 |
| DORMENTES                          |         |               |
| - madeira tratada                  |         |               |
| . custo                            | un      | 12.300,00     |
| . transporte                       | un      | 225,00        |
| Sub-total                          |         | 12.525,00     |

QUADRO 23 : Custos Unitários - Transporte Ferroviário Metropolitanano (continuação)

| Especificação                            | Unidade        | Valor (Cr\$)    |
|--|----------------|-----------------|
| - concreto bi-bloco                      |                |                 |
| . custo                                  | un             | 16.900,00       |
| . transporte                             | un             | <u>270,00</u>   |
| Sub-total                                |                | 17.170,00       |
| - concreto monobloco                     |                |                 |
| . custo                                  | un             | 19.800,00       |
| . transporte                             | un             | <u>480,00</u>   |
| Sub-total                                |                | 20.280,00       |
| LASTRO                                   |                |                 |
| - custo usina                            | m <sup>3</sup> | 4.570,00        |
| - transporte                             | m <sup>3</sup> | <u>3.390,00</u> |
| Sub-total                                |                | 7.960,00        |
| SUB-LASTRO                               |                |                 |
| - custo de escavação, carga e transporte |                |                 |
| . sub-lastro I                           | m <sup>3</sup> | 4.750,00        |
| . sub-lastro II                          | m <sup>3</sup> | 4.900,00        |

## QUADRO 23 : Custos Unitários - Transporte Ferroviário Metropolitano (continuação)

| Especificação                               | Unidade        | Valor (Cr\$) |
|---|----------------|--------------|
| FIXAÇÕES                                    |                |              |
| - custo do conjunto<br>incluindo transporte | un             | 4.500,00     |
| CAMADA FINAL DE TERRAPLENAGEM               |                |              |
| - custo de escavação, carga<br>e transporte | m <sup>3</sup> | 3.200,00     |

APÊNDICE D

CUSTOS UNITÁRIOS - TRANSPORTE  
FERROVIÁRIO DE CARGA

QUADRO 24 : Custos Unitários - Transporte Ferroviário de Carga (ORTN = Cr\$ 4224.54 e US\$ 523.56)

| Especificação                      | Unidade | Valor (Cr\$)  |
|------------------------------------|---------|---------------|
| TRILHO                             |         |               |
| - custo usina                      | t       | 350.000,00    |
| - transporte                       | t       | 1.224,00      |
| Sub-total                          |         | 351.224,00    |
| - soldas                           |         |               |
| . elétrica                         | km      | 1.386.000,00  |
| . aluminotérmica                   | km      | 1.932.000,00  |
| Sub-total                          |         | 3.318.000,00  |
| NIVELAMENTO, ALINHAMENTO E SOCARIA |         |               |
| - custo                            | km      | 10.000.000,00 |
| DORMENTES                          |         |               |
| - madeira tratada                  |         |               |
| . custo                            | un      | 10.500,00     |
| . transporte                       | un      | 1.620,00      |
| Sub-total                          |         | 12.120,00     |

QUADRO 24: Custos Unitários - Transporte Ferroviário de carga (continuação)

| Especificação                            | Unidade        | Valor (Cr\$) |
|--|----------------|--------------|
| - concreto bi-bloco                      |                |              |
| . custo                                  | un             | 23.200,00    |
| . transporte                             | un             | 442,00       |
| Sub-total                                |                | 23.642,00    |
| - concreto monobloco                     |                |              |
| . custo                                  | un             | 27.800,00    |
| . transporte                             | un             | 589,00       |
| Sub-total                                |                | 28.389,00    |
| LASTRO                                   |                |              |
| - custo usina                            | m <sup>3</sup> | 3.696,00     |
| - transporte                             | m <sup>3</sup> | 2.984,00     |
| Sub-total                                |                | 6.680,00     |
| SUB-LASTRO                               |                |              |
| - custo de escavação, carga e transporte |                |              |
| . sub-lastro I                           | m <sup>3</sup> | 11.094,00    |
| . sub-lastro II                          | m <sup>3</sup> | 11.207,00    |

## QUADRO 24: Custos Unitários - Transporte Ferroviário de Carga (continuação)

| Especificação                               | Unidade        | Valor (Cr\$) |
|---|----------------|--------------|
| FIXAÇÕES                                    |                |              |
| - custo do conjunto<br>incluindo transporte | un             | 5.000,00     |
| CAMADA FINAL DE TERRAPLENAGEM               |                |              |
| - custo de escavação<br>carga e transporte  | m <sup>3</sup> | 2.450,00     |

APÊNDICE E

AValiação DA VIDA ÚTIL DOS MATERIAIS E SERVIÇOS

QUADRO 25 : Avaliação da vida útil dos materiais e serviços

| Item  | Trem Metropolitano | Trem de Carga  |
|---|--------------------|----------------|
| Trilho  | $K_1 = 1.3930$     | $K_1 = 1.2935$ |
| $VUT = \left[ \prod_{i=1}^8 K_i \right]^{WD}$<br>$-0.435$ | $K_2 = 1.0000$     | $K_2 = 1.1500$ |
|   | $K_3 = 0.9082$     | $K_3 = 0.9732$ |
| VUT - vida útil do trilho em anos                         | $K_4 = 0.5917$     | $K_4 = 0.9067$ |
| W - peso do trilho em $\lambda b/jd$                      | $K_5 = 0.9639$     | $K_5 = 0.3520$ |
| D - tonelagem em MTBA                                     | $K_6 = 1.0000$     | $K_6 = 0.9100$ |
|   | $K_7 = 1.0000$     | $K_7 = 0.8002$ |
|   | $K_8 = 0.9630$     | $K_8 = 0.9730$ |



QUADRO 25: Avaliação da vida útil dos materiais e serviços (continuação)

| Item      | Trem Metropolitano | Trem de Carga     |
|-----------|--------------------|-------------------|
|           | W = 115            | W = 136           |
|           | D = 13.23          | D = 44.09         |
|           | VUT = 26.0         | VUT = 8.6         |
| Dormente  |                    |                   |
| - madeira | $K_1 = 1.0300$     | $K_1 = 1.0300$    |
|           | $K_2 = 1.0000$     | $K_2 = 1.1500$    |
|           | $K_3 = 0.9082$     | $K_3 = 0.9722$    |
|           | $K_4 = 0.9287$     | $K_4 = 1.0185$    |
|           | $K_5 = 0.8793$     | $K_5 = 0.5496$    |
|           | $K_6 = 1.0000$     | $K_6 = 0.8002$    |
|           | $\alpha = 0.9350$  | $\alpha = 0.9700$ |

$$VUD = 2.0523 \prod_{y=1}^6 K_y \cdot e^{(2.3569 \cdot 0.0350\alpha) \cdot D^{-0.1533}}$$

QUADRO 25: Avaliação da vida útil dos materiais e serviços (continuação)

| Item                                       | Trem Metropolitano | Trem de Carga  |
|--|--------------------|----------------|
|  | D = 13.23          | D = 44.09      |
|  | VUD = 10.6         | VUD = 6.0      |
| - concreto bi-bloco e monobloco (estimado) | VUD = 50           | VUD = 25       |
| Nivelamento, Alinhamento e Sacaria         | $K_1 = 1.2000$     | $K_1 = 1.2000$ |
|  | $K_2 = 1.0000$     | $K_2 = 1.1500$ |
|  | $K_3 = 0.9082$     | $K_3 = 0.9722$ |
|  | $K_4 = 0.9287$     | $K_4 = 1.0185$ |
|  | $K_5 = 0.0793$     | $K_5 = 0.5496$ |
|  | $K_6 = 1.0000$     | $K_6 = 0.8002$ |
|  | $K_7 = 0.8000$     | $K_7 = 0.9000$ |
|  | D = 13.23          | D = 44.09      |

$$VUN = \prod_{j=1}^7 K_j \left( \frac{D-A}{B} \right)^{10}$$

QUADRO 25: Avaliação da vida útil dos materiais e serviços (continuação)

| Item                                       | Trem Metropolitanano | Trem de Carga |
|--|----------------------|---------------|
|  | A = 121.31           | A = 121.31    |
|  | B = -149.50          | B = -149.50   |
|  | VUN = 3.8            | VUN = 1.8     |
| Lastro                                     |                      |               |
| VUL = 5.VUN                                | VUL = 19             | VUL = 9.0     |
| VUL = vida útil do lastro em anos          |                      |               |
| Fixação                                    |                      |               |
| VUF = 1.7 x VUT                            | VUF = 26.0           | VUF = 14.6    |
| VUF - vida útil da fixação em anos         |                      |               |
| Sub-lastro e Camada Final de Terraplenagem |                      |               |

QUADRO 25: Avaliação da vida útil dos materiais e serviços (continuação)

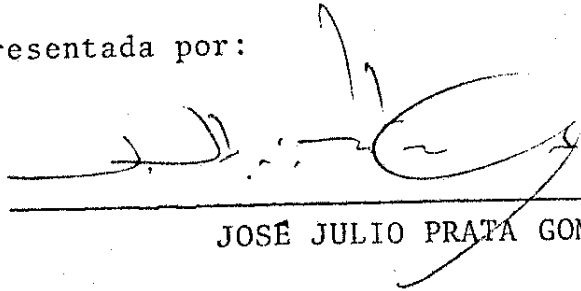
| Item   | Trem Metropolitano      | Trem de Carga           |
|--|-------------------------|-------------------------|
| VUSL - vida útil do sub-lastro<br>em anos                          |                         |                         |
| VUCFT - vida útil da camada fi-<br>nal de terraplenagem em<br>anos | VUSL = 30<br>VUCFT = 30 | VUSL = 30<br>VUCFT = 30 |

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. RIVES, F.O. et 'alli - Tratado de Ferrocarriles I - Via. Editora Rueda, Espanha, 1977.
2. TALBOT, A.N. - Stresses in Railroad Track - The Talbot Reports. AREA, EUA, 1980.
3. SCHRAMM, Gerhard. Permanent Way Technique - Permanent Way Economy. Otto Elsner Verlagsgesellschaft, Alemanha, 1961.
4. ARFA. Bulletin 645 - Manual Recommendations.EUA, 1973.
5. MAC DOWELL, F.L.C. Estudos de Custos de Conservação de Superestrutura Ferroviária para Trilhos de 45 kg/m Aplicação: Corredor de Exportação "Paranaguá". SAPSA/GEIPOT, 1980.
6. HEUKELOM, W. et alli. Dynamic Testing as a Mean of Controlling Pavements During and After Construction. University of Michigan, EUA, 1960.
7. HEUKELOM, W. et alli. Dynamic Testing of Pavements. ASCE, EUA, 1960.
8. KERR, A.D. et alli. Railroad Track Mechanics and Technology. Pergamon Press, Inglaterra, 1978.

9. Soil Mechanics for Road Engineers. Department of Scientific and Industrial Research. Road Research Laboratory, Inglaterra, 1959
10. NOVAES, A.G. Métodos de Otimização - Aplicação aos Transportes. Editora Edgard Blucher Ltda, 1978.
11. ZANGWILL, W.I. Nonlinear Programming: A Unified Approach. Prentice Hall, INC, Englrwood Cliffs, EUA, 1969.
12. RODRIGUES, C.A. Avaliação da Carga por Eixo dos Veículos Ferroviários. Tese de Mestrado, IME, 1983.

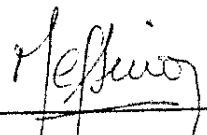
Tese apresentada por:



---

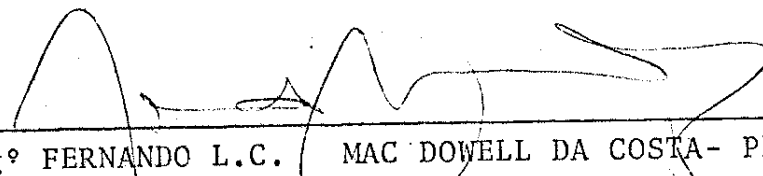
OSÉ JULIO PRATA GOMES

e aprovada por:



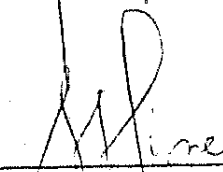
---

Profª MARIA CRISTINA FOGLIATTI DE SINAY-Ph.D.




---

Engº FERNANDO L.C. MAC DOWELL DA COSTA- Ph.D.



---

Engº SERGIO MISSE - M.Sc.



---

Engº CARLOS ALCEU RODRIGUES - M.C.