

**JOSÉ ANTONIO CRISTOVÃO BALAU**

Eng. Naval - EPUSP - 1973



**OTIMIZAÇÃO DE COMBOIO INTEGRADO DE CHATAS PARA  
TRANSPORTE DE BAUXITA NA AMAZÔNIA**

Dissertação de mestrado apresentada à  
Escola Politécnica da Universidade de  
São Paulo

Orientador: Prof. Dr. ANTONIO GALVÃO N. NOVAES  
Professor Titular do Departamento de  
Engenharia de Transportes da EPUSP

SÃO PAULO,  
Junho 1981

## AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Antonio Galvão Novaes pela orientação durante o programa de mestrado e, sobretudo, pela contribuição à minha formação profissional.

Ao Dr. Manoel de Andrade e Silva Reis pelo apoio e pelas sugestões apresentadas.

Ao Dr. Carlos Eduardo D'Almeida pela orientação na abordagem de aspectos relativos a interação embarcação-hidrovia.

Ao Dr. Paulo Cesar Leone pelo incentivo e orientação no início do meu programa de mestrado.

Aos então estagiários Akira Katsuragi e Nelson Bianco Standerski pela colaboração no desenvolvimento dos programas de computador.

A todos os amigos da Divisão de Engenharia Naval do IPT que direta ou indiretamente contribuíram para a execução deste trabalho.

A Dna. Sergia Nocette pelo trabalho de datilografia.

## RESUMO

Neste trabalho propõe-se um modelo geral para otimização de comboios integrados de chatas e a sua aplicação no dimensionamento do sistema de transporte fluvial de bauxita na Amazônia.

O modelo consiste do equacionamento do problema de transporte, e da determinação da solução ótima que atende ao critério de "mínimo custo de transporte", com emprego do método de otimização de Hooke-Jeeves associado à função de penalidade.

O modelo permite tanto a otimização das características do comboio em função das restrições da hidrovia, como a otimização conjunta embarcação-hidrovia sempre que houver interesse em investir na hidrovia em benefício da redução do custo de transporte.

Para o equacionamento do modelo foram desenvolvidas formulações analíticas para cálculo de: EHP de comboios integrados, peso de aço de chatas de duplo casco e distância percorrida pelo comboio numa operação de parada brusca.

## ABSTRACT

A general model for the optimization of integrated barge convoys and its application on the study of a bauxite inland transportation system for the Amazon region are presented.

The model consists in the resolution of the transportation problem and the determination of the optimum solution, according to the transportation minimum cost criterion, using the Hooke-Jeeves optimization method associated with a penalty function.

The model allows the optimization of the barge convoy characteristics considering the waterway restrictions, as well as the simultaneous convoy-waterway optimization whenever it is desired to invest in the waterway to reduce the transportation cost.

Analytical formulations were developed in order to permit the calculation of the EHP of integrated barge convoys, the steel weight of double-hull barges and the distance along the crash-stop path of the convoy.



## INDICE

1.	INTRODUÇÃO .....	1
2.	MÉTODO PROPOSTO .....	4
3.	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE TRANSPORTE EM ESTUDO .....	6
3.1	Demanda .....	6
3.2	Terminais .....	6
3.3	Rotas .....	7
4.	ELEMENTOS BÁSICOS PARA DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DO COMBOIO .....	12
4.1	Configuração geométrica das chatas e do comboio integrado .....	12
4.2	Determinação de EHP, BHP e IHP de comboios integrados de chatas .....	17
4.2.1	Método do Corpo de Engenheiros do Exército Americano para cálculo de EHP ("INSA flotilla Model") .....	20
4.2.2	Método IPT .....	22
4.2.2.1	Características geométricas dos modelos ensaiados .....	23
4.2.2.2	Resultados obtidos nos ensaios dos modelos no Tanque de Provas .....	27
4.3	Potência requerida para parada brusca de comboios .....	31
4.4	Peso do aço de chatas de duplo casco .....	34
5.	MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO PARA DETERMINAÇÃO DA SOLUÇÃO DO SISTEMA DE TRANSPORTE .....	41
5.1	Desenvolvimento do modelo matemático para o sistema de transporte utilizando comboios integrados de chatas .....	41
5.1.1	Relações funcionais básicas .....	41
5.1.1.1	Potência para propulsão .....	42
5.1.1.2	Capacidade de carga de comboio (TPB) .....	44

5.1.1.3	Tempo de viagem redonda (TVR) e número de viagens redondas por ano (NVR) .....	44
5.1.1.4	Capacidade anual de transporte do sistema .....	53
5.1.2	Relações que expressam custo de transporte fluvial .....	54
5.1.2.1	Custo anual de amortização do investimento .....	55
5.1.2.2	Custo com salários e encargos da tripulação .....	57
5.1.2.3	Custo anual com óleo combustível e lubrificante .....	58
5.1.2.4	Custo anual com reparos e docagens periódicas .....	59
5.1.2.5	Custo anual com seguro das embarcações ...	60
5.1.2.6	Custo anual com administração da frota ...	60
5.1.2.7	Custo com preparação da hidrovía .....	61
5.1.3	Restrições impostas às características físicas e operacionais das embarcações .....	64
5.1.3.1	Comprimento máximo do comboio .....	64
5.1.3.2	Boca máxima do comboio .....	67
5.1.3.3	Calado máximo .....	68
5.1.3.4	Imposições das Sociedades Classificadoras.	69
5.1.3.5	Demanda mínima anual .....	69
5.2	Formalização do problema de otimização .....	69
6.	RESOLUÇÃO DO MODELO .....	72
7.	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	76
7.1	Análise comparativa entre as rotas .....	76
7.1.1	Rotas do Boiuçú e Itaquara .....	76
7.1.2	Rota do Caxuanã .....	78
7.2	Análise da solução obtida para a rota do Boiuçú .....	82
7.2.1	Análise do calado do comboio .....	82
7.2.2	Análise da variável velocidade .....	83

7.2.3	Diminuição do tempo parado dos empurradores nos portos (comboio de espera) .....	87
7.2.4	Limitação da razão $\nabla$ /IHP .....	89
7.2.5	Imposição de valores inteiros para as variáveis NCL, NCT e NE .....	90
7.3	Conclusões .....	92
8.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	95
	NOMENCLATURA .....	97
	BIBLIOGRAFIA .....	99
	ANEXO I : Resultados dos ensaios com modelos.	
	ANEXO II : Efeito de águas rasas.	
	ANEXO III: Resultados de programa de cálculo da distância percorrida em manobra de parada brusca.	
	ANEXO IV : Listagem e resultados do programa de computador utilizado para otimização das características do comboio.	

## 1. INTRODUÇÃO

A tomada de decisão de um armador quanto às características da frota necessária para atender a uma determinada demanda de carga é normalmente feita com base numa análise comparativa do desempenho econômico entre alternativas possíveis.

É comum neste tipo de análise econômica comparar-se alternativas envolvendo embarcações já existentes e disponíveis no mercado. Este procedimento, apesar de válido em casos particulares, em geral não permite a obtenção da melhor solução pelo fato de deixar de considerar novas configurações das embarcações, determinadas por condicionantes específicas do novo problema de transporte.

O transporte fluvial de bauxita na região Amazônica é um caso típico de problema de transporte cujo equacionamento exige a proposição de embarcações fluviais com características bastante diversas das que hoje operam na região. As características da hidrovia são tão particulares que provavelmente nem mesmo a adoção de soluções empregadas em outros países permite o máximo rendimento do conjunto em barcação-hidrovia.

Apresenta-se para o problema de transporte fluvial de bauxita na Amazônia, a aplicação de um método de determinação da solução ótima que possibilita a análise de uma ampla faixa de variação dos parâmetros básicos que definem o

comboio fluvial. O método permite ainda uma análise conjunta embarcação-hidrovia, ou seja embarcação ótima em função das características naturais da hidrovia em corrente livre, ou em função dos custos de implantação de uma hidrovia canalizada. No primeiro caso considera-se apenas o investimento nas embarcações e a solução final corresponde a alternativa que minimiza os custos da embarcação. No segundo caso, a solução final corresponde a alternativa de mínimo custo global embarcação-hidrovia.

A concepção básica da embarcação é a de comboio integrado de chatas, cujas características principais são determinadas pelo método de busca da solução ótima. A concepção do comboio integrado de chatas para transporte fluvial de quantidades bem determinadas de carga homogênea entre dois portos pode ser considerada o estágio mais recente do processo de desenvolvimento do transporte fluvial, cujo início remonta à Idade Média com a utilização de sirga com tração animal para rebocar batelões ao longo de rios e canais.

A insuficiência de informações sobre o desempenho de comboios integrados obrigou o desenvolvimento de pesquisa em Tanque de Provas, para determinação de uma formulação geral para cálculo de EHP deste tipo de comboio. Os resultados desta pesquisa são apresentados neste trabalho.

O encaminhamento apresentado para o problema de trans-

porte de bauxita, tem o intuito de utilizar uma ferramenta que possibilita a análise global do problema, dando ao projetista uma indicação das possíveis configurações do sistema de transporte em torno da solução ótima. Procedimento idêntico pode ser utilizado em problemas semelhantes.



## 2. MÉTODO PROPOSTO

O método consiste basicamente da determinação do custo de transporte em função das seguintes variáveis independentes:

- velocidade (V);
- calado (H);
- comprimento das chatas (LC);
- boca das chatas (BC);
- número de chatas no sentido longitudinal do comboio (NCL);
- número de chatas no sentido transversal do comboio (NCT);
- número de empurradores (NE).

Através destas variáveis independentes é possível caracterizar o comboio (com geometria definida em 4.1), a frota e a hidrovia (no caso de preparação da via).

Assim, tem-se uma função custo de transporte dada por:

$$C = f(V, H, LC, BC, NCL, NCT, NE)$$

Esta função de custo inclui custos de investimento e todos os custos operacionais dos comboios. Quando se analisa a possibilidade de melhoramentos na hidrovia, os custos decorrentes são também considerados.

Uma vez tendo-se determinado a função custo de trans-

porte, utiliza-se um método de busca direta (Hooke-Jeeves) associado à função de penalidade que permite determinar os valores das variáveis independentes correspondentes ao mínimo custo, satisfeitas as seguintes restrições:

- máximas dimensões do comboio permitidas pela hidrovia;
- imposições de sociedades classificadoras de embarcações quanto às relações entre dimensões de chatas;
- demanda anual.

Para a modelagem analítica do problema de transporte, foram desenvolvidas, dentre outras, formulações para cálculo de:

- EHP de comboio integrado;
- peso de aço de chatas de casco duplo;
- potência requerida para parada brusca (de emergência) do comboio.

### 3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE TRANSPORTE EM ESTUDO

O problema de transporte fluvial analisado neste trabalho tem as seguintes características:

#### 3.1 Demanda

Está prevista uma demanda anual de 2 milhões de toneladas de bauxita entre Porto Trombetas, às margens do rio de mesmo nome e o porto de Vila do Conde, localizado no município de Barcarena, às margens da Baía de Marajó a cerca de 30 milhas de Belém do Pará. A bauxita destina-se ao complexo Albrás/Alunorte localizado junto à área portuária de Vila do Conde.

A bauxita a ser transportada é úmida com densidade média de  $1,3 \text{ t/m}^3$ , que ao ser armazenada a granel apresenta um ângulo de repouso de  $39^\circ$ .

#### 3.2 Terminais

O terminal de embarque, em Porto Trombetas, está dotado de carregador linear deslizante com capacidade efetiva de 1890 t/h. Por este terminal serão embarcados 5,35 milhões de toneladas anuais de bauxita, das quais 2,0 milhões destinadas à Vila do Conde e 3,35 milhões destinadas à exportação.

O terminal de desembarque de Vila do Conde será apare

lhado com 2 guindastes dotados de caçambas totalizando uma capacidade efetiva de 1154 t/h. Além dos 2 milhões de toneladas de bauxita de Porto Trombetas, serão desembarcadas, neste terminal, 2,4 milhões de toneladas de bauxita provenientes de outros locais.

### 3.3 Rotas

O percurso fluvial entre Porto Trombetas e Vila do Conde desenvolve-se pelos rios Trombetas, Amazonas, canais e furos da Ilha de Marajó e finalmente rio Parã e Baía de Marajó (figura 3.1). Para contorno da Ilha de Marajó existem no momento duas alternativas: furo do Boiuçú e furo do Ituquara. Estas duas rotas têm características bem distintas. A rota do Boiuçú é menos extensa, possui canais navegáveis mais largos e menos sinuosos, sendo no entanto restritiva quanto à profundidade. A rota do Ituquara oferece como vantagem maiores profundidades.

Existe ainda a possibilidade da abertura de um canal interligando o Lago Caxuanã à Fôz do Rio Xingu, encurtando a distância da ligação Rio Amazonas-Rio Parã. Esta interligação foi estudada inicialmente pelo IDESP (referência 15) e no momento a PORTOBRÁS realiza levantamentos locais (topografia, sondagem, batimetria, etc.) para um estudo mais detalhado.

Para este estudo considerou-se possível esta ligação,

através da abertura de um canal com cerca de 50 quilômetros de extensão, unindo os rios Ipixuna e Caxuanã. Segundo a referência 15 o material a ser removido é constituído de sedimentos argilosos e areno-argilosos, o que facilita a abertura do canal.

A figura 3.2 e as tabelas 3.1 a 3.3 resumem as informações básicas das três rotas alternativas.

TABELA 3.1 - Distâncias navegáveis pelas rotas alternativas (Km)

Rios	R O T A S		
	Boiuçú	Ituquara	Caxuanã
Trombetas	109	109	109
Amazonas	511	511	387
Canal do Vieira	61	61	-
Furos e estreitos	158	232	203
Parã	189	189	189
TOTAL	1028	1102	888

TABELA 3.2 - Porcentagem de comprimento do Canal com determinada profundidade

Rios	profundidade(m)			
	5 - 10	10 - 15	15 - 20	20 -
Trombetas	-	14,6%	35,4%	50,0%
Amazonas	-	-	6,0%	94,0%
Boiuçũ	9,8%	64,3%	13,5%	12,4%
Ituquara	2,5%	54,2%	23,5%	19,8%
Parã	-	19,9%	35,4%	44,7%

TABELA 3.3 - Limitações das rotas alternativas  
(em metros)

Rota	calado máximo	largura mínima	raio de curvatura mínimo
Boiuçũ	5,0	60	1000
Ituquara	7,0	100	600
Caxuanã	*	60	1000

\* a ser determinado na otimização do conjunto embarcação-canal.



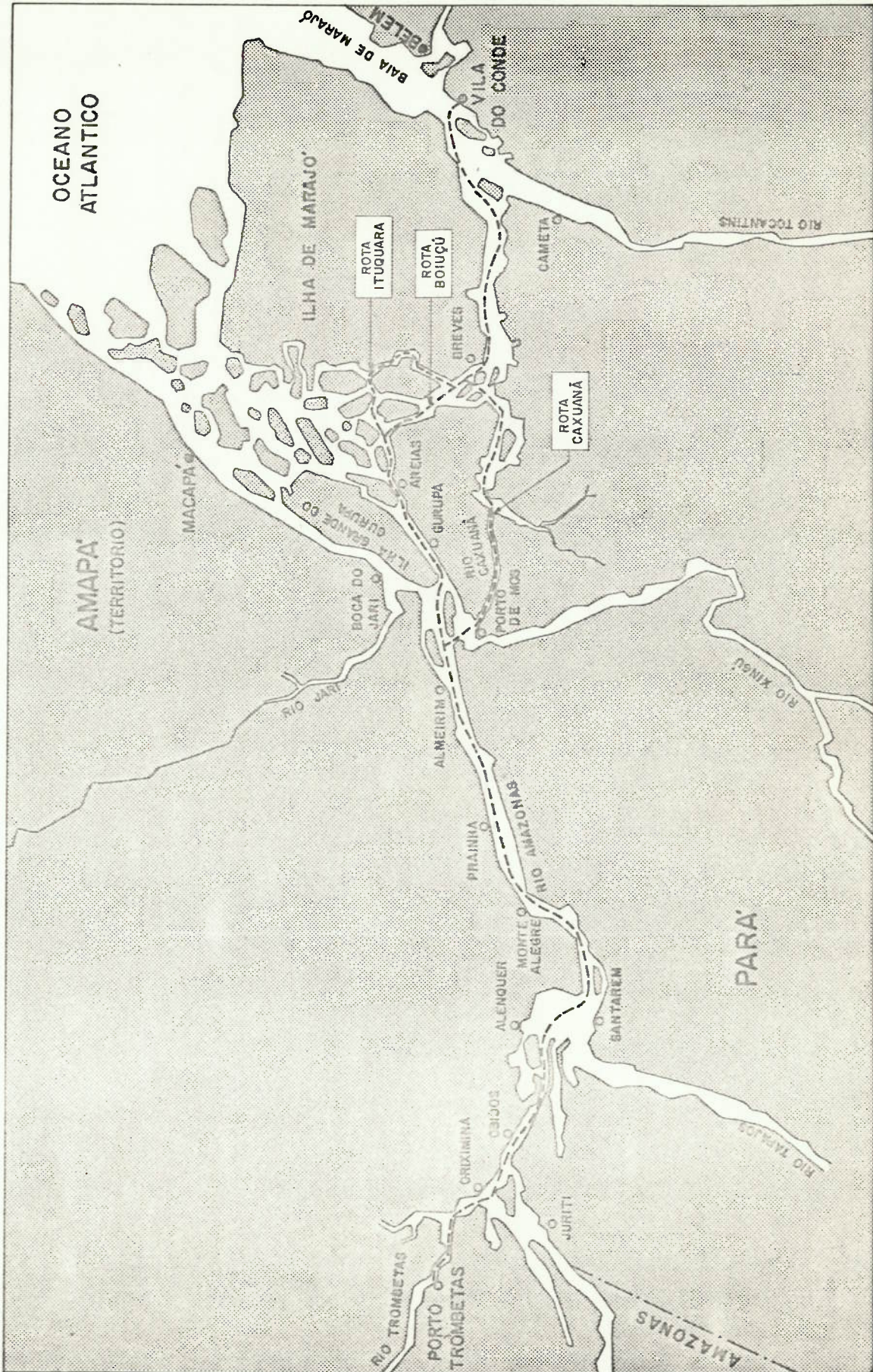


Figura-3.1: PLANTA DE LOCALIZAÇÃO



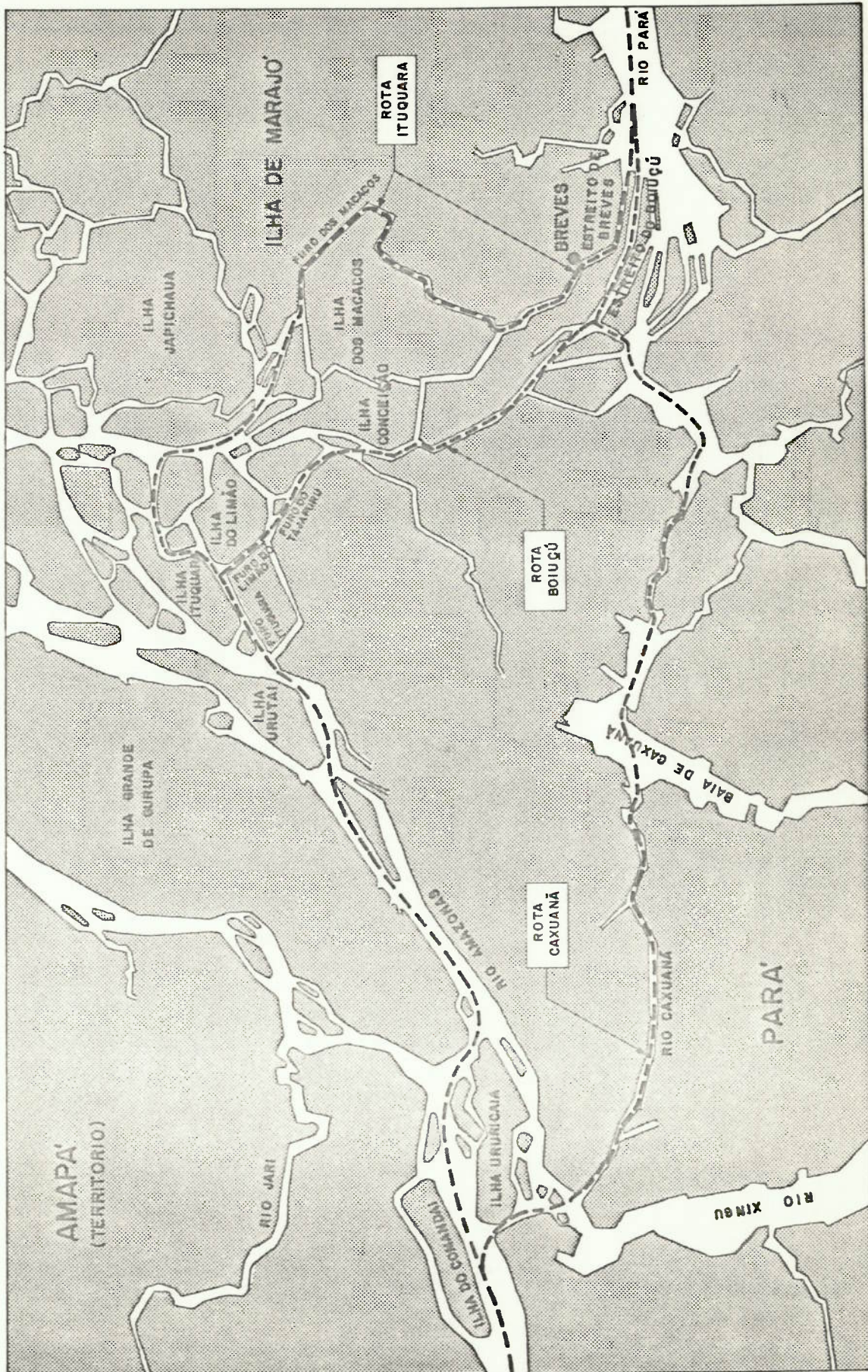


Figura-3.2: ROTAS ALTERNATIVAS



#### 4. ELEMENTOS BÁSICOS PARA DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DO COMBOIO

Para a elaboração do modelo matemático que permite determinar a configuração ótima de um comboio integrado de chatas para uma determinada missão de transporte, foi necessário desenvolver formulações analíticas que caracterizam o comboio em função de um determinado número de variáveis básicas.

Neste ítem apresentam-se as formulações analíticas utilizadas para caracterizar os seguintes parâmetros básicos:

- configuração geométrica das chatas e do comboio integrado;
- BHP de comboio integrado de chatas;
- potência requerida para parada brusca do comboio;
- peso de aço de chatas de duplo casco.

##### 4.1 Configuração geométrica das chatas e do comboio integrado

A operação de comboios fluviais formados por uma embarcação com propulsão empurrando e guiando um conjunto de embarcações sem propulsão agregadas entre si, teve início em 1935 nos Estados Unidos da América.

As embarcações que formavam os comboios eram inicialmente bastante diferentes entre si, mas já a partir de 1950 surgiram os primeiros comboios formados de embarcações pa

dronizadas (chatas). Os comboios assim formados passaram a apresentar em relação aos navios fluviais convencionais as seguintes vantagens:

- redução de tripulação, e do custo das embarcações
- economia de combustível.

Posteriormente, já na década de 60, surgiram os primeiros comboios integrados para transporte de carga a granel a grandes distâncias. No comboio integrado as chatas têm uma geometria tal que uma vez formado, o comboio se comporta como se fosse uma única embarcação, não havendo descontinuidades entre duas chatas contíguas. Esta configuração do comboio permite diminuição da resistência à propulsão e conseqüentemente aumento da velocidade para uma dada potência do empurrador. Só pode ser utilizado no transporte de carga que permite um carregamento uniforme das chatas, sem trim e sem variações no calado.

A configuração geométrica das chatas consideradas neste estudo é decorrente do conceito do comboio integrado.

O comboio será composto de NCL chatas no sentido longitudinal e NCT chatas no sentido transversal. As dimensões das chatas são padronizadas, havendo diferenciação só nas formas do casco. As chatas das extremidades do comboio possuem proa convencional e corpo paralelo e as chatas intermediárias possuem apenas corpo paralelo, de tal

forma que uma vez justapostas dão ao comboio a configuração de uma chata única com proa e popa simétricas. A figura 4.1 ilustra um exemplo possível de comboio integrado.

A geometria proposta para a chata proa, figura 4.2 foi determinada com base em série de ensaios realizados por E. Schüle em 1961 no tanque de provas de Duisburg, (referência 29). Schüle comparou o desempenho hidrodinâmico de quatro proas diferentes para uma mesma chata, formando comboios fluviais com configurações diversas. Posteriormente o IPT (referência 18) utilizou estas formas no projeto de chatas petroleiras para o rio Amazonas, confirmando os bons resultados obtidos em Duisburg.

As características básicas da chata "proa" são:

- comprimento do corpo de entrada da chata de 4,55 vezes o calado;
- a inclinação média do corpo de proa em relação à linha base de 12,53 graus.

O deslocamento para comboio integrado com a configuração proposta é calculado de forma aproximada por:

$$\nabla = L.B.H - 4,55 . B . H^2$$

sendo  $L = NCL . LC$

$B = NCT . BC,$  resulta

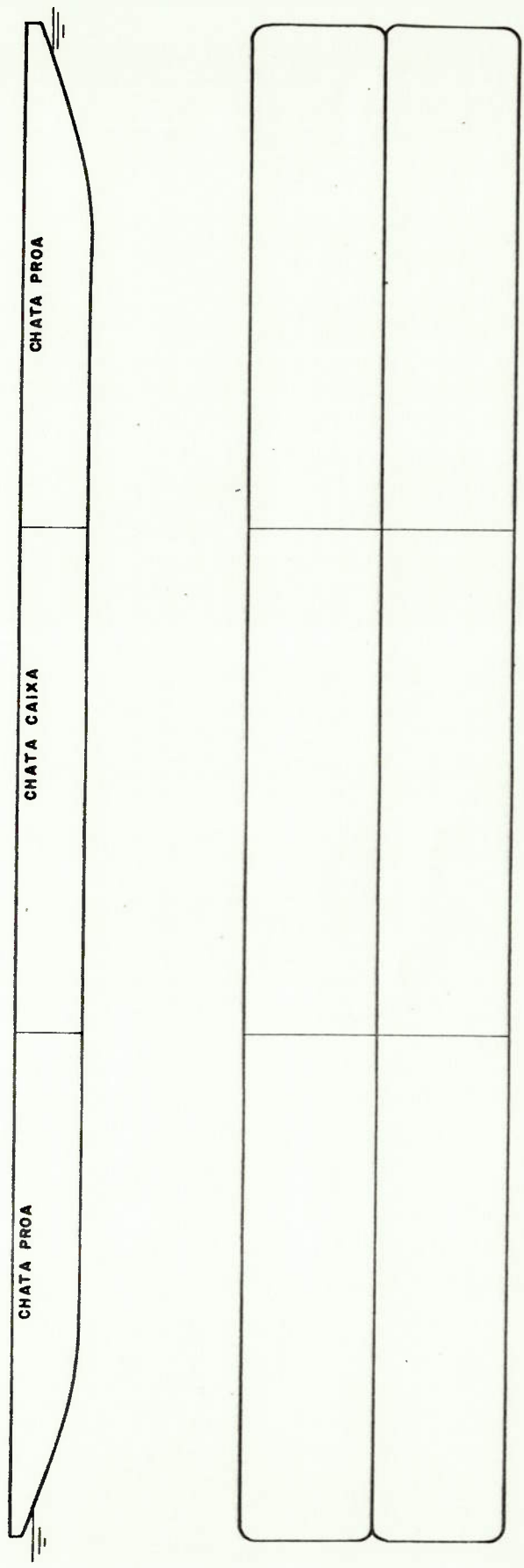
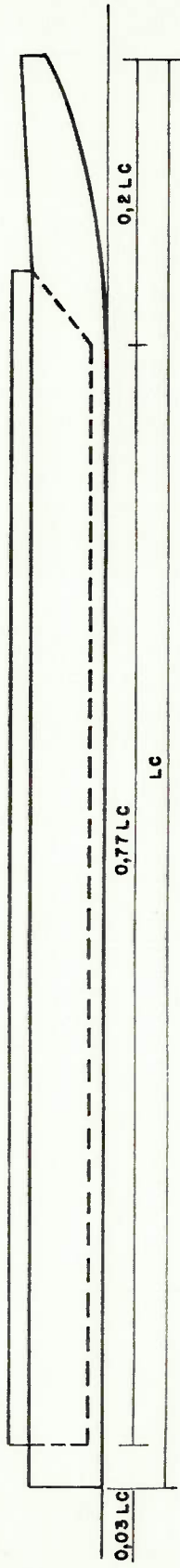


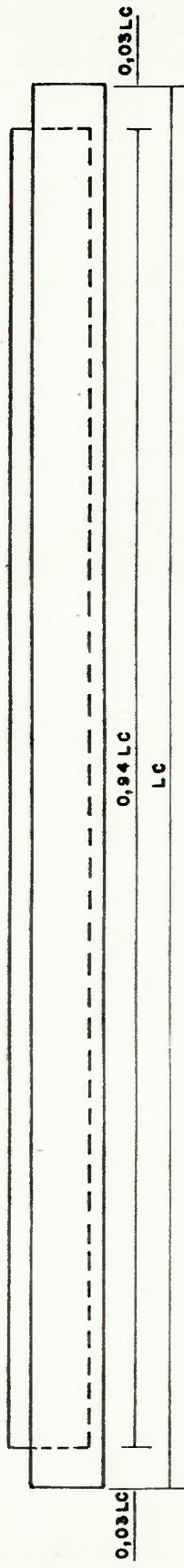
Figura - 4.1 : COMBOIO INTEGRADO 3 x 2, FORMADO POR 4 CHATAS TIPO "PROA"  
E 2 CHATAS TIPO "CAIXA "



CHATA PROA



CHATA CAIXA



CORPO DE ENTRADA DA CHATA

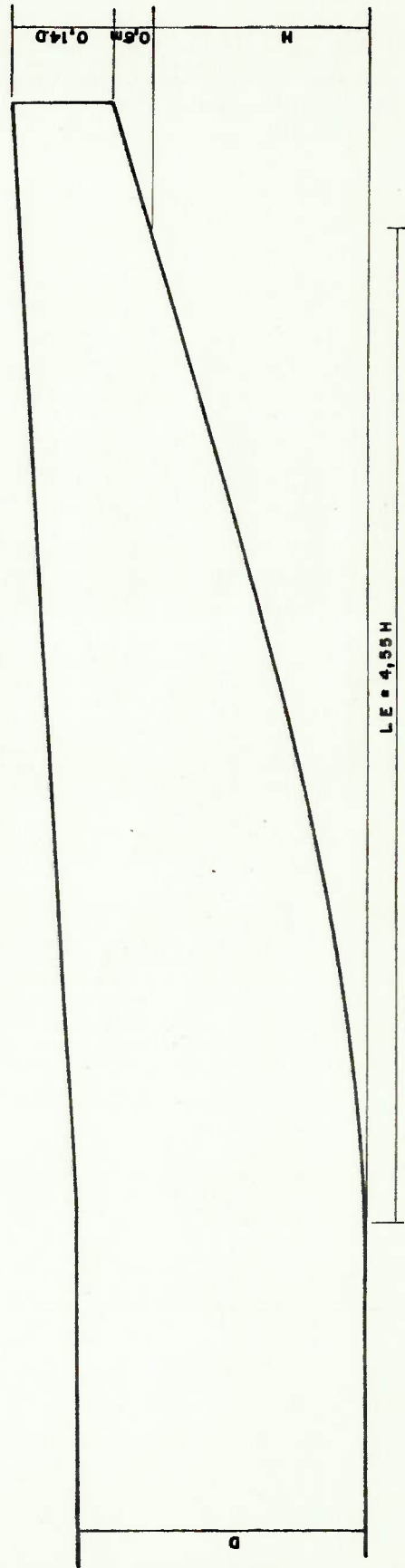


Figura - 4.2: CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA DAS CHATAS DO COMBOIO INTEGRADO

$$\nabla = NCL \cdot NCT \cdot LC \cdot BC \cdot H - 4,55 \cdot H^2 \cdot NCT \cdot BC \quad m^3 \quad (4.1)$$

#### 4.2 Determinação de EHP, BHP e IHP de comboios integrados de chatas

Inicialmente fazem-se necessárias as seguintes definições:

- a) EHP : potência efetiva de reboque do comboio, a uma determinada velocidade  $V$ . Sendo  $R$  a resistência do comboio, determinada a partir do ensaio com modelo em escala reduzida no Tanque de Provas, têm-se:

$$EHP = R \cdot V$$

- b) BHP : potência requerida na ponta do eixo do(s) motor(es) principal(ais) de propulsão para uma determinada velocidade  $V$  do comboio. É determinada por:

$$BHP = \frac{EHP}{c_p}$$

e

$$c_p = e_t \cdot \epsilon$$

sendo

$c_p$  : coeficiente propulsivo

$e_t$  : eficiência de transmissão da linha de eixo

$\epsilon$  : eficiência propulsiva do conjunto casco-hélice(s) do empurrador

c) IHP : potência nominal do(s) motor(es) principal(ais) de propulsão, determinada a partir do BHP acrescido de margem de potência levando em conta a condição mais crítica de operação (máxima potência absorvida pelo hélice) e folgas usuais de projeto decorrentes da perda de potência do motor devida as condições ambientais da praça de máquinas (temperatura, pressão, ventilação, etc.) e desgaste natural ao longo de sua vida útil.

Assim, tem-se:

$$IHP = \frac{BHP}{k}$$

Sendo:  $k < 1$

Poucas informações foram encontradas na bibliografia existente a cerca da potência efetiva de reboque (EHP) de comboios integrados de chatas, a partir da qual é possível determinar a potência a ser fornecida pelos motores principais de propulsão para se atingir uma determinada velocidade de operação do comboio (BHP). A falta de informações é ainda maior quando se trata de grandes comboios fluviais.

A referência 37 indica de forma qualitativa as vantagens do comboio integrado em relação aos comboios convencionais, sem apresentar os valores obtidos nos ensaios realizados com modelos em tanque de provas.

O corpo de engenheiros do Exército Americano (referência 16), apresenta no "Inland Navigation Systems Analyses" (INSA), processo de cálculo para determinação do EHP de comboios fluviais, em substituição ao método de Howe (referência 14) que apresenta uma série de limitações.

O método apresentado no "INSA" foi desenvolvido para comboios não integrados, incluindo a possibilidade de ter se num mesmo comboio chatas carregadas e vazias. Apesar de ter sido adaptado para cálculo do EHP de comboios integrados, o método não parece ser suficientemente consistente, uma vez que calcula a resistência do comboio a partir da resistência individual de cada chata isoladamente. A resistência à propulsão de uma chata intermediária de um comboio integrado é completamente diferente se considerada isoladamente ou integrada no corpo do comboio.

Prevendo o potencial do Rio Amazonas para futura utilização de comboios fluviais de grande porte, com dimensões superiores aos atualmente utilizados na hidrovia do Rio Mississippi, o CNPq financiou a pesquisa no tanque de provas do IPT de uma série de modelos de comboios integrados (referência 17). A sistemática de cálculo de EHP, tendo por base os resultados obtidos nestes ensaios, passará a ser denominado de "método IPT."

Na figura 4.3 tem-se as curvas de EHP de um comboio

integrado, obtidas utilizando-se os dois métodos citados. Tem-se ainda a curva de EHP para esse comboio com base apenas na resistência de atrito, calculada pela formulação de Schoenherr (referência 6).

Descreve-se a seguir os resultados apresentados nestas duas referências (16 e 17).

#### 4.2.1 Método do Corpo de Engenheiros do Exército Americano para cálculo do EHP ("INSA flotilla Model")

Este método propõe a seguinte formulação para cálculo da resistência de comboios em águas profundas:

$$R = r \cdot V \quad (4.2)$$

$$r = 0,0118 \cdot BC \cdot H^{2/5} \left[ LC + 70,5 \left( 1 - \frac{LC}{328} \right) \sqrt{\frac{\delta}{1-\delta}} \right] k_c \cdot n \cdot k_f \quad (4.3)$$

sendo:

R = resistência do comboio, libras

r = resistência específica do comboio, libra . s<sup>2</sup>/pē<sup>2</sup>

BC = boca da chata, pēs

H = calado do comboio, pēs

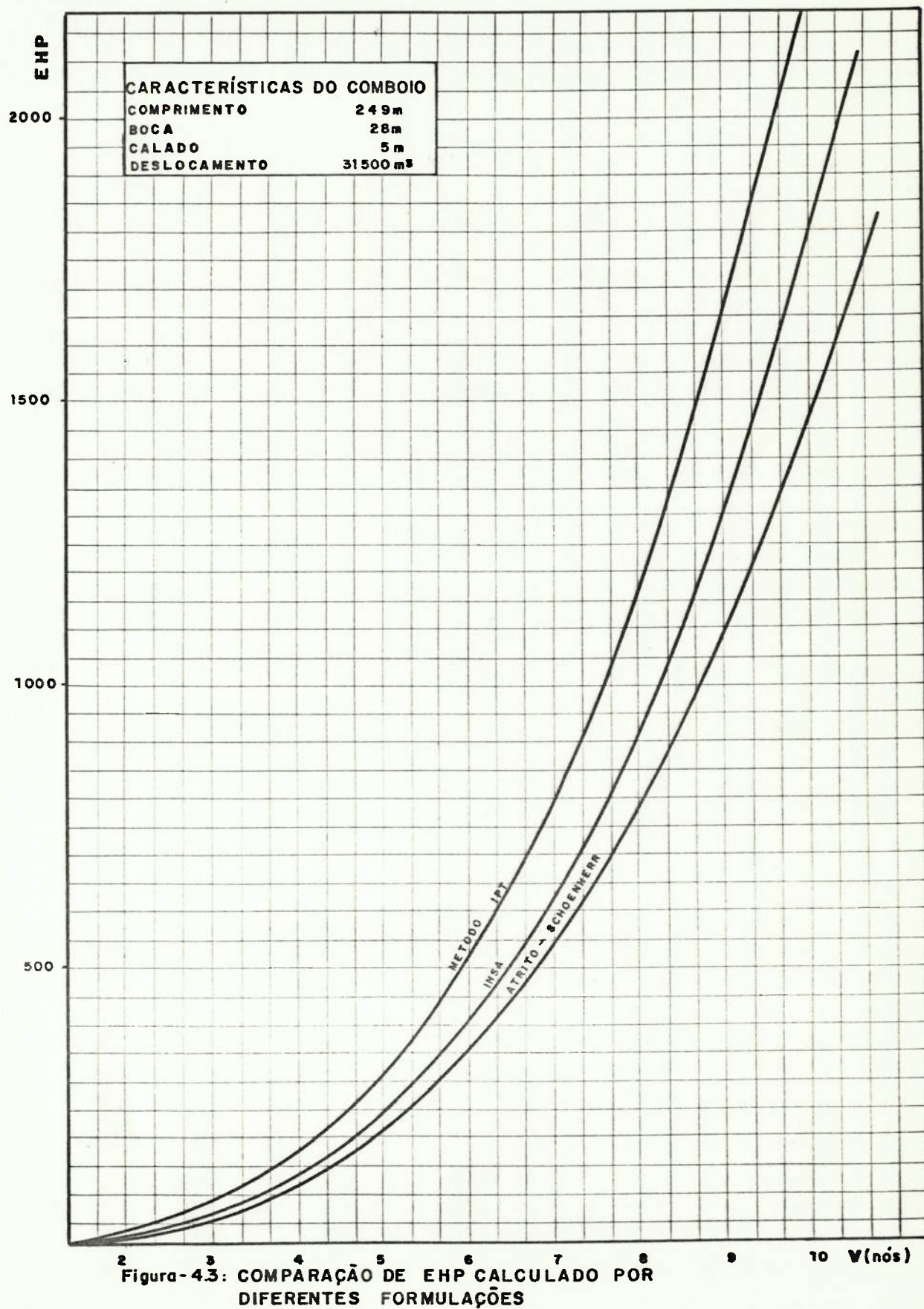
LC = comprimento da chata, pēs

δ = coeficiente de bloco da chata

n = número de chatas do comboio

V = velocidade, pēs/s







e

$$k_c = 2,42\delta^2 - 3,43\delta + 1,34$$

$$K_f = 0,50 \text{ para comboio integrado carregado}$$

ou

$$K_f = 0,75 \text{ para comboio integrado leve}$$

Segundo o Corpo de Engenheiros este modelo combina resultados teóricos e experimentais fornecendo resultados compatíveis com valores observados em comboios.

O EHP será portanto determinado por:

$$EHP = \frac{R \cdot V}{550} \quad (\text{HP}) \quad (4.4)$$

#### 4.2.2 Método IPT

O objetivo básico do trabalho desenvolvido na referência 17 é obter a potência efetiva (EHP) do comboio em função dos parâmetros  $L/B$ ,  $B/H$ ,  $V$  e  $\nabla$ .

Para atingir tal objetivo foram construídos 5 modelos com diferentes dimensões de comprimento e boca, sendo cada modelo ensaiado para 4 condições de calado. Assim, foram realizados 20 ensaios no tanque de provas da Divisão de Engenharia Naval do IPT, obtendo-se valores de EHP na seguinte faixa de variação dos parâmetros básicos:

$$2,10 \leq L/B \leq 10,10$$

$$6,02 \leq B/H \leq 13,89$$

$$2 \leq V \leq 10 \text{ nós}$$

$$500 \leq \nabla \leq 35.000 \text{ m}^3$$

#### 4.2.2.1 Características geométricas dos modelos ensaiados

Os parâmetros selecionados para caracterizar a série de cinco modelos, devido a sua influência na resistência à propulsão de comboio integrado, foram:

- razão entre comprimento e boca ( $L/B$ );
- razão entre boca e calado ( $B/H$ );
- razão entre comprimento do corpo de entrada e calado ( $L_e/H$ );
- deslocamento ( $\nabla$ ).

Dentre estes parâmetros, assumiu-se  $L_e/H = 4,55$ , em função do exposto no item 4.1.

Na série de ensaios realizados manteve-se  $L/B$  aproximadamente constante para cada modelo, e variou-se o calado com conseqüente variação de  $B/H$  e  $\nabla$ . A relação  $L/B$  não pode ser mantida constante para cada modelo uma vez que  $L_e$  é função do calado. Para o ajuste dos resultados por análise de regressão utilizou-se para cada modelo o  $L/B$  médio dos valores ensaiados.

Nas figuras 4.4 e 4.5 tem-se as características geométricas da proa (ou popa) dos modelos A, B, C, D e E, e na tabela 4.1 os demais parâmetros geométricos de cada modelo ensaiado em 4 calados diferentes.

TABELA 4.1 - Características principais dos modelos de Comboio integrado ensaiados (Ref. 17)

MODELO	B (m)	L (m)	H (m)	$\nabla$ (m <sup>3</sup> )	$C_b$	$S_M$ (m <sup>2</sup> )	B/H	$\overline{L/B}$	
A	A1	1,000	2,186	0,072	0,126	0,805	2,444	13,89	2,4
	A2	1,000	2,220	0,080	0,150	0,845	2,571	12,50	
	A3	1,000	2,446	0,100	0,192	0,785	2,827	10,00	
	A4	1,000	2,653	0,125	0,258	0,780	3,189	8,00	
B	B1	0,800	3,350	0,067	0,143	0,796	3,100	11,94	4,5
	B2	0,800	3,472	0,080	0,181	0,815	3,284	10,00	
	B3	0,800	3,648	0,100	0,237	0,812	3,566	8,00	
	B4	0,800	3,952	0,133	0,341	0,811	4,037	6,02	
C	C1	0,800	4,908	0,067	0,242	0,920	4,594	11,94	6,5
	C2	0,800	5,072	0,080	0,293	0,900	4,820	10,00	
	C3	0,800	5,248	0,100	0,376	0,900	5,166	8,00	
	C4	0,800	5,552	0,133	0,575	0,870	5,743	6,02	
D	D1	0,600	4,687	0,049	0,130	0,943	3,227	12,24	8,1
	D2	0,600	4,770	0,059	0,157	0,930	3,375	10,17	
	D3	0,600	4,904	0,074	0,194	0,891	3,602	8,11	
	D4	0,600	5,152	0,098	0,265	0,875	3,986	6,12	
E	E1	0,600	5,867	0,049	0,155	0,899	4,038	12,24	10,1
	E2	0,600	5,953	0,059	0,189	0,897	4,213	10,17	
	E3	0,600	6,084	0,074	0,241	0,892	4,473	8,11	
	E4	0,600	6,332	0,098	0,334	0,897	4,913	6,12	

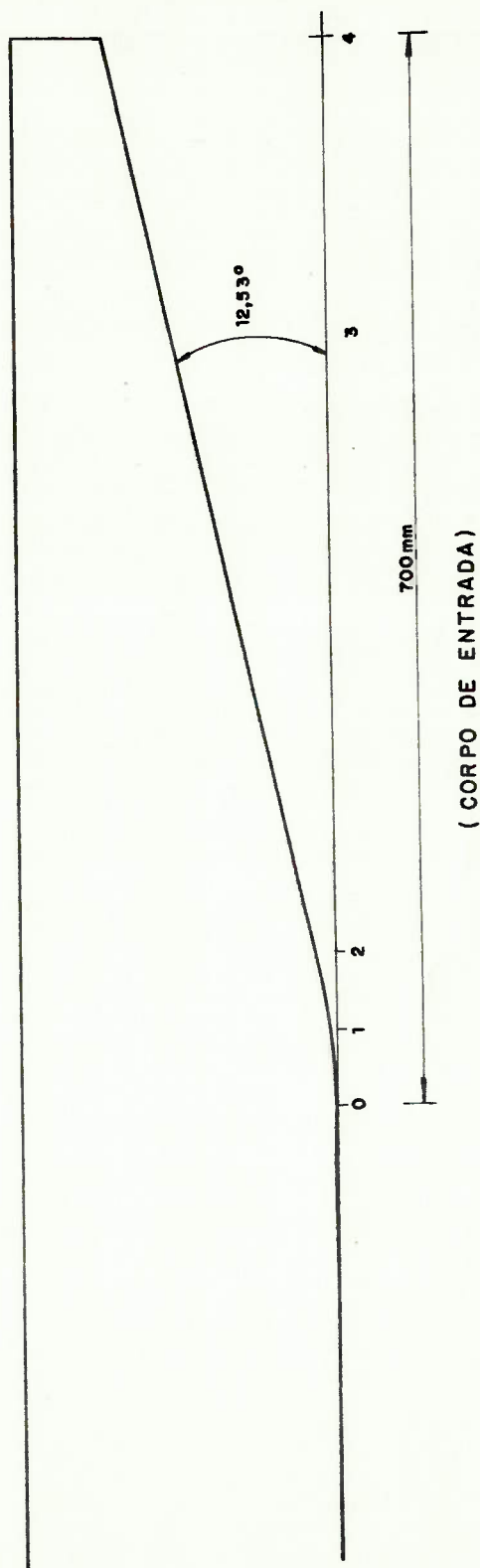


Figura-4.4: PERFIL DA PROA (POPA) DOS MODELOS.

Escala: 1:8



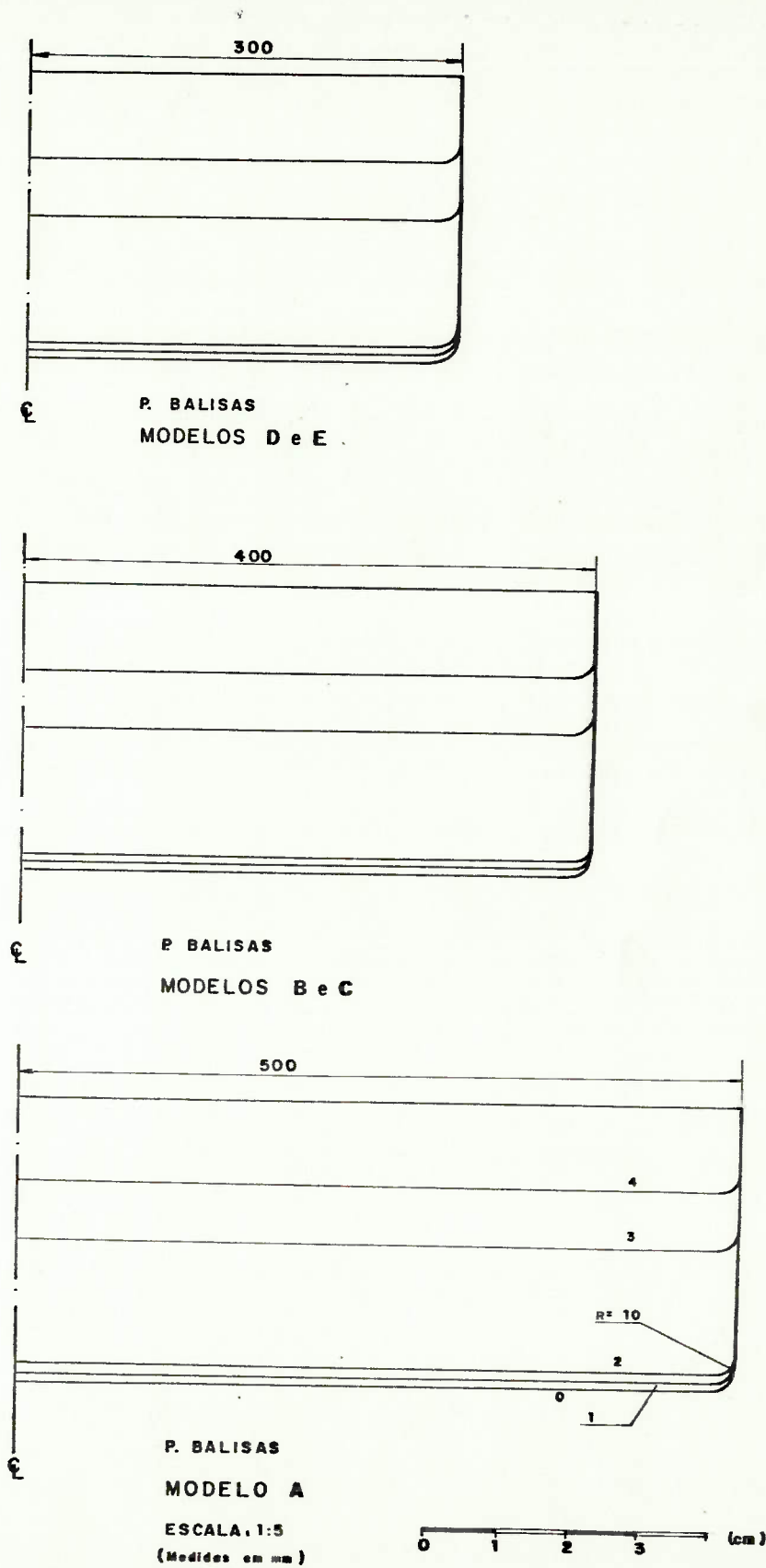


Figura-4.5: CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DA PROA E POPA DOS MODELOS ENSAIADOS.

#### 4.2.2.2 Resultados obtidos nos ensaios dos modelos no Tanque de Provas

As figuras do Anexo I apresentam a extrapolação dos resultados obtidos com os modelos no Tanque de Provas.

Utilizando-se análise de regressão é possível trazer os resultados obtidos através da seguinte formulação:

$$EHP = 1,872 \cdot 10^{-3} \cdot V^{2,90} \cdot \nabla^{0,63} \cdot (B/H)^{0,34} \cdot (L/B)^{-0,06} \quad (4.5)$$

$$(r^2 = 0,99)$$

Para obter o EHP real do comboio foi considerado o seguinte:

- fator de serviço ( $F_S$ );
- acréscimo de EHP devido a descontinuidade hidrodinâmica pelo fundo do comboio ( $\Delta EHP$ ).

$$\text{Assim } EHP_r = F_S (EHP + \Delta EHP) \quad (4.6)$$

O fator de serviço ( $F_S$ ) incorpora diferenças entre as condições reais de operação do comboio e as condições de ensaio.

O acréscimo devido a descontinuidade leva em conta o fato de o comboio em condições reais de operação, sob o ponto de vista do escoamento hidrodinâmico pelo fundo, não ser totalmente contínuo. Diferenças de carregamento entre chatas, trim e sistema de amarração do comboio faz com que o escoamento pelo fundo não seja totalmente bidimensio

nal como ocorre com os modelos.

A referência 37 indica um acréscimo de 5% para um comboio semi-integrado, com duas chatas em linha, em relação a um comboio integrado. Assim, devido a inexistência de informações mais precisas, adotou-se de forma conservadora este valor.

Portanto para uma descontinuidade tem-se o seguinte acréscimo de potência:

$$K = 0,05 \cdot 1,872 \cdot 10^{-3} \cdot V^{2,90} \cdot \nabla_1^{0,63} \left[ \frac{B}{H} \right]^{0,34} \cdot \left[ \frac{2LC}{B} \right]^{-0,06} \quad (4.7)$$

sendo:

$$\nabla_1 = 2 \cdot LC \cdot H \cdot NCT \cdot BC^{-4,55} \cdot H^2 \cdot NCT \cdot BC \quad (4.8)$$

Para NCL chatas ao longo do comprimento do comboio, tem-se:

$$\Delta EHP = (NCL - 1) \cdot K \quad (4.9)$$

resultando:

$$EHP_r = F_s \cdot (EHP + (NCL - 1) \cdot K) \quad (4.10)$$

Para a estimativa preliminar do BHP (potência entregue pelo motor na velocidade de regime), será utilizado o coeficiente propulsivo de 0,40 obtido da referência 19 para empurrador dotado de tubo Kort. Será admitido ainda que o acréscimo de resistência do comboio devido a presença do empurrador será negligenciado tendo em vista que:



- no presente estudo o deslocamento do comboio é muito maior que o deslocamento do empurrador;
- o empurrador opera na esteira do comboio;
- o fator de serviço assumido de 30% já é suficiente para incorporar o pequeno acréscimo de resistência do empurrador em relação ao comboio.

Assim, resulta:

$$\text{BHP} = \frac{\text{EHP}_r}{0,40} \quad (4.11)$$

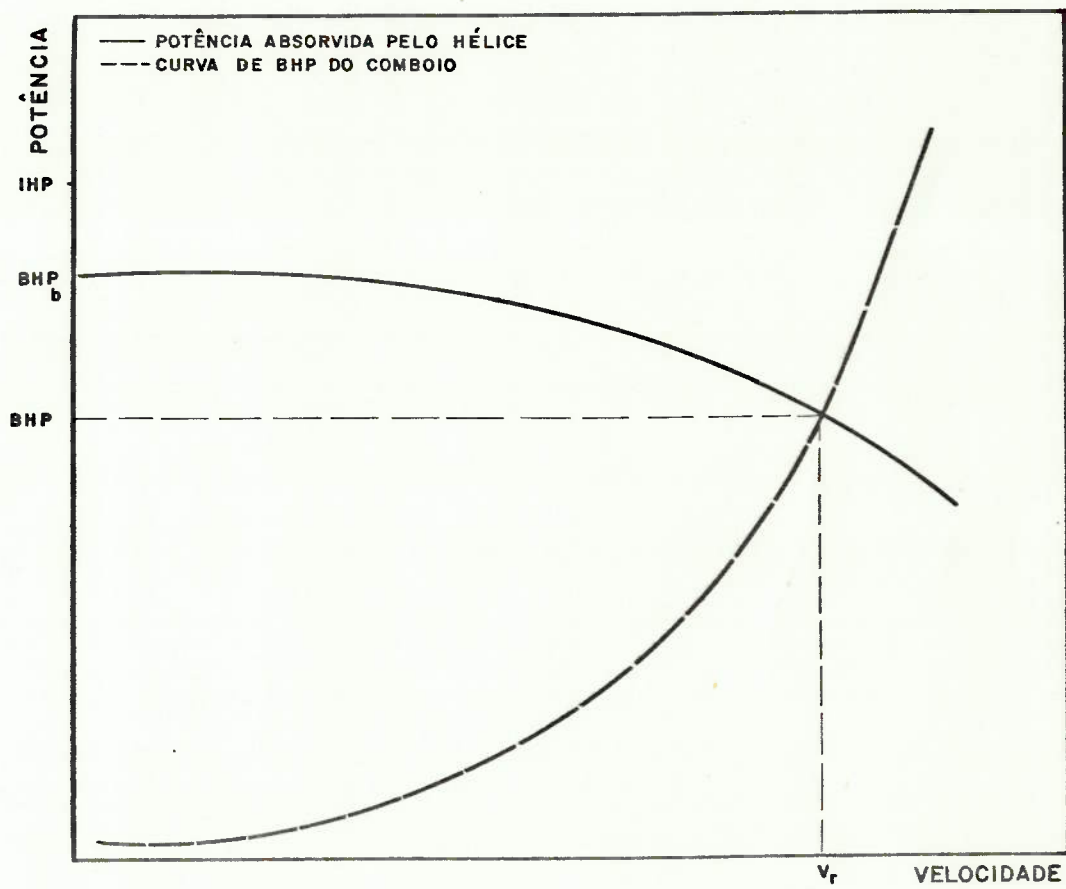
Para determinação da potência instalada (IHP) será assumido que os hlices do empurrador sejam projetados para a condição de tração estática ("Bollard-pull"). Portanto nesta condição de operação o hlice absorve do motor uma potência superior à potência absorvida em velocidade de regime.

Para hlices da série Kaplan, operando em tubo Kort, admitiu-se que a potência absorvida em velocidade de regime pelo hlice é da ordem de 85% da potência absorvida na condição de tração estática (referência 19).

Admite-se ainda a prática usual de manter uma folga de 20% do motor sobre a máxima potência absorvida pelo hlice. Portanto:

$$\text{IHP} = \frac{\text{BHP}}{0,85 \cdot 0,80} = 3,68 \cdot \text{EHP}_r \quad (4.12)$$

Este valor de IHP é o mínimo exigido para que o comboio atinja uma velocidade de regime  $V$ . No item 4.3 tem



$V_r$  : VELOCIDADE DE REGIME

$$BHP_b = \frac{BHP}{0,85}$$

$$IHP = \frac{BHP_b}{0,80}$$

Figura- 4.6. CURVA TÍPICA DE DESEMPENHO DO EMPURRADOR FLUVIAL

se outra condicionante para determinação do IHP, imposta pela necessidade de parar o comboio dentro de uma distância máxima, quando este se encontra navegando na velocidade  $V$ .

#### 4.3 Potência requerida para parada brusca de comboios

O conhecimento do comportamento de parada de comboios de grande porte poderá, além da resistência à propulsão, ser um dos fatores condicionantes da potência do empurrador. Isto ocorre principalmente com comboios integrados que podem atingir velocidades elevadas com baixa potência do empurrador, faltando no entanto potência ao mesmo, por exemplo, para uma parada de emergência.

A abordagem da operação da manobra de parada brusca de comboios fluviais foi desenvolvida com base na referência 2.

A equação que traduz o comportamento da embarcação em movimento de parada brusca, considerando trajetória retilínea (o que é possível para embarcação bi-hélice), é dada por (2ª lei de Newton):

$$(M + m) \frac{dv}{dt} = - [T[1 - \sigma] + (R_h + R_e)] \quad (4.13)$$

sendo:

$M$  - massa do comboio  $t_f \cdot m^{-1} \cdot s^2$

$m$  - massa virtual do comboio =  $0,15 \cdot M$

- $V$  - velocidade (m/s)  
 $T$  - empuxo do hēlice operando a rē, para uma determinada velocidade ( $V$ ) e rotaçāo (rps)  
 $\sigma$  - coeficiente de reduçāo da força propulsora  
 $R_h$  - resistēncia hidrodinâmica ao avanço da embarcaçāo  
 $R_e$  - forças externas (t)

Tem-se a seguinte soluçāo para esta equaçāo diferencial:

$$t_s = \frac{M+m}{KV} \operatorname{arc\,tang} \frac{V_0}{U} + t_r \quad (4.14)$$

$$S_s = \frac{M+m}{2K} \ln \left[ 1 + \frac{V_0^2}{U^2} \right] + V_0 \cdot t_r \quad (4.15)$$

$$K = \frac{R_0}{V_0^2} \quad \text{e} \quad U = \frac{(1-\sigma)T}{K}$$

sendo:

- $t_s$  - tempo decorrido desde o instante da emissāo da ordem "toda a potēncia a rē", até a para da total da embarcaçāo (segundos)  
 $S_s$  - distāncia percorrida até a parada total  
 $V_0$  - velocidade inicial da embarcaçāo (m/s)  
 $t_r$  - tempo de reversāo do motor (s)  
 $R_0^*$  - resistēncia a propulsāo do comboio quando navegando na velocidade  $V_0$ , t  
 $T$  - empuxo do hēlice operando a rē, t

Da referēncia 2 o empuxo do hēlice ā rē ē dado por:

---

\*obtido do ítem 4.2.2.2

$$T = 0,0247 \left[ 2,15 [1,0 + 0,30(A_e/A_0 - 0,6)] \right] \cdot (0,8 \cdot n \cdot \text{IHP} \cdot D)^{0,66} \quad (4.16)$$

sendo

$A_e/A_0$  - razão de área expandida do hélice

$n$  - número de hélices (e de motores)

IHP - potência máxima contínua de cada motor

Para hélice Kaplan operando em tubo Kort considerou-se um acréscimo no valor de  $T$  de 15%.

Com base na expressão 4.15 e impondo:

$n = 2$  (empurrador bi-hélice-Kaplan)

$\sigma = 0,25$

$A_e/A_0 = 0,70$

$t_r = 30$  segundos

obtêm-se das expressões anteriores, por análise de regressão a seguinte expressão para cálculo da distância percorrida até parada total da embarcação:\*

$$S_s = 2,931 \cdot (\text{IHP})^{0,4181} \cdot (V)^{1,57} \cdot (\nabla)^{0,5749} \quad (4.17)$$

esta expressão é válida para:

$$1.000 < \text{IHP} < 8.000 \text{ CV}$$

$$5 < V < 8 \text{ nós}$$

$$5.000 < \nabla < 35.000 \text{ m}^3$$

---

\*tomou-se como base um comboio tipo com  $L/B = 8,0$  e  $B/H = 10,0$  e o diâmetro do hélice dado por  $D = 1,9 + \text{IHP}/5000$  (m).

Nas figuras 4.7 e 4.8 tem-se as distâncias percorridas na operação de parada brusca de comboios fluviais, para diferentes valores de potência do empurrador e velocidade de regime do comboio e no anexo III resultados de programa utilizado.

#### 4.4 Peso do aço de chatas de duplo casco

As chatas fluviais tipo "caixa" e tipo "proa" para este estudo possuem a configuração geométrica mostrada na figura 4.2 e seção mestra conforme indicado na figura 4.9.

A configuração geométrica proposta está adequada às características da bauxita úmida a ser transportada, com densidade de  $1,30^3$  t/m (fator de estiva de  $0,77$  m<sup>3</sup>/t) e ângulo de repouso de  $39^0$ .

O peso de aço das chatas foi calculado através do programa de síntese estrutural de chatas de duplo casco, apresentado na referência 5. Definidas as dimensões principais da chata o programa determina a configuração e os escantilhões da seção mestra que minimiza o peso de aço da embarcação.

Fazendo uso do programa foi gerada uma série de chatas, com os parâmetros geométricos variando na seguinte faixa:

$$30 \leq LC \leq 150 \text{ comprimento (m)}$$

$$6 \leq BC \leq 30 \text{ boca (m)}$$

$$2 \leq H \leq 7 \text{ calado (m)}$$

$$D = - 0,050 + 0,018 \cdot LC \text{ pontal (m)}$$

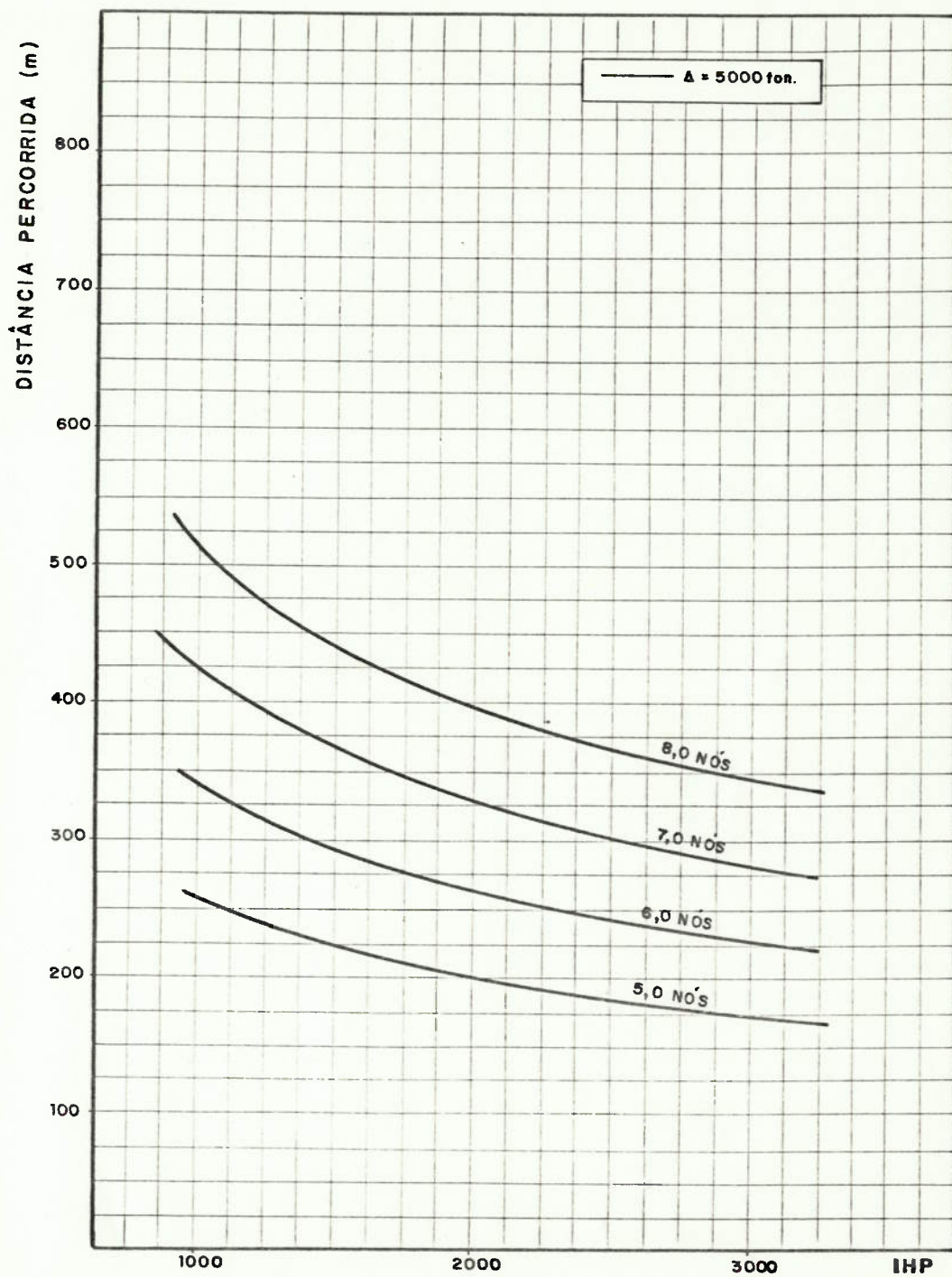


Figura.4.7: CURVAS DE PARADA DE COMBOIOS INTEGRADOS



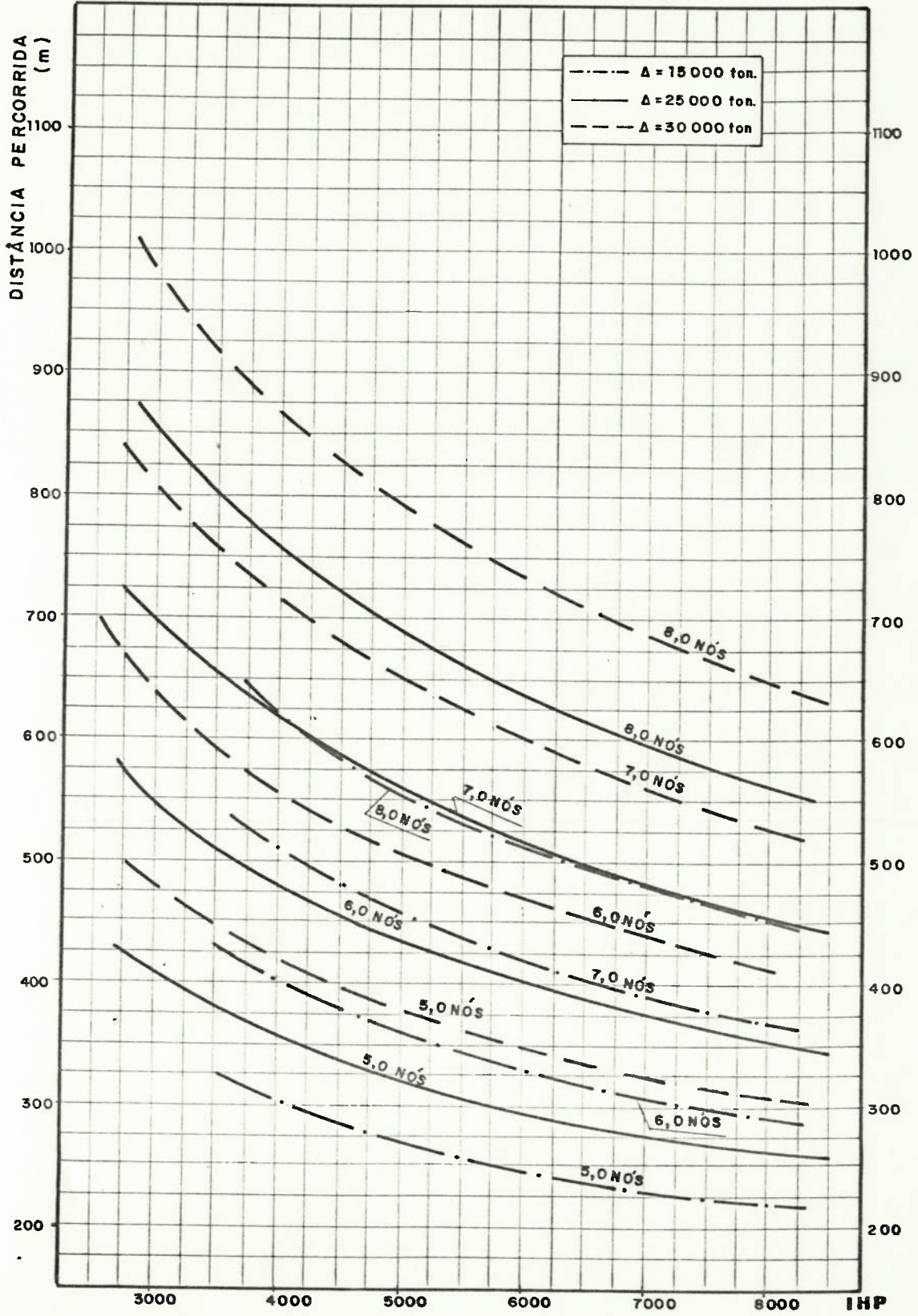


Figura-4.8 : CURVAS DE PARADA DE COMBOIOS INTEGRADOS

Os resultados obtidos estão plotados nas figuras 4.10 e 4.11. O ajuste destes pontos, através de análise de regressão, permitiu determinar as seguintes expressões para cálculo do peso de aço de chatas de duplo casco:

- Chata tipo "caixa

$$\text{Peso de aço} = 13,30 \left[ \frac{\text{LC} \cdot \text{BC} \cdot \text{D}}{100} \right]^{0,8931} \text{ toneladas} \quad (4.18)$$

- Chata tipo "proa"

$$\text{Peso de aço} = 8,05 \left| \frac{\text{LC} \cdot \text{BC} \cdot \text{D}}{100} \right|^{0,9801} \text{ toneladas} \quad (4.19)$$

As expressões acima são válidas para  $[(\text{LC} \cdot \text{BC} \cdot \text{D})/100] \leq 300$ , obedecidas as faixas de variação dos parâmetros, já descrita.

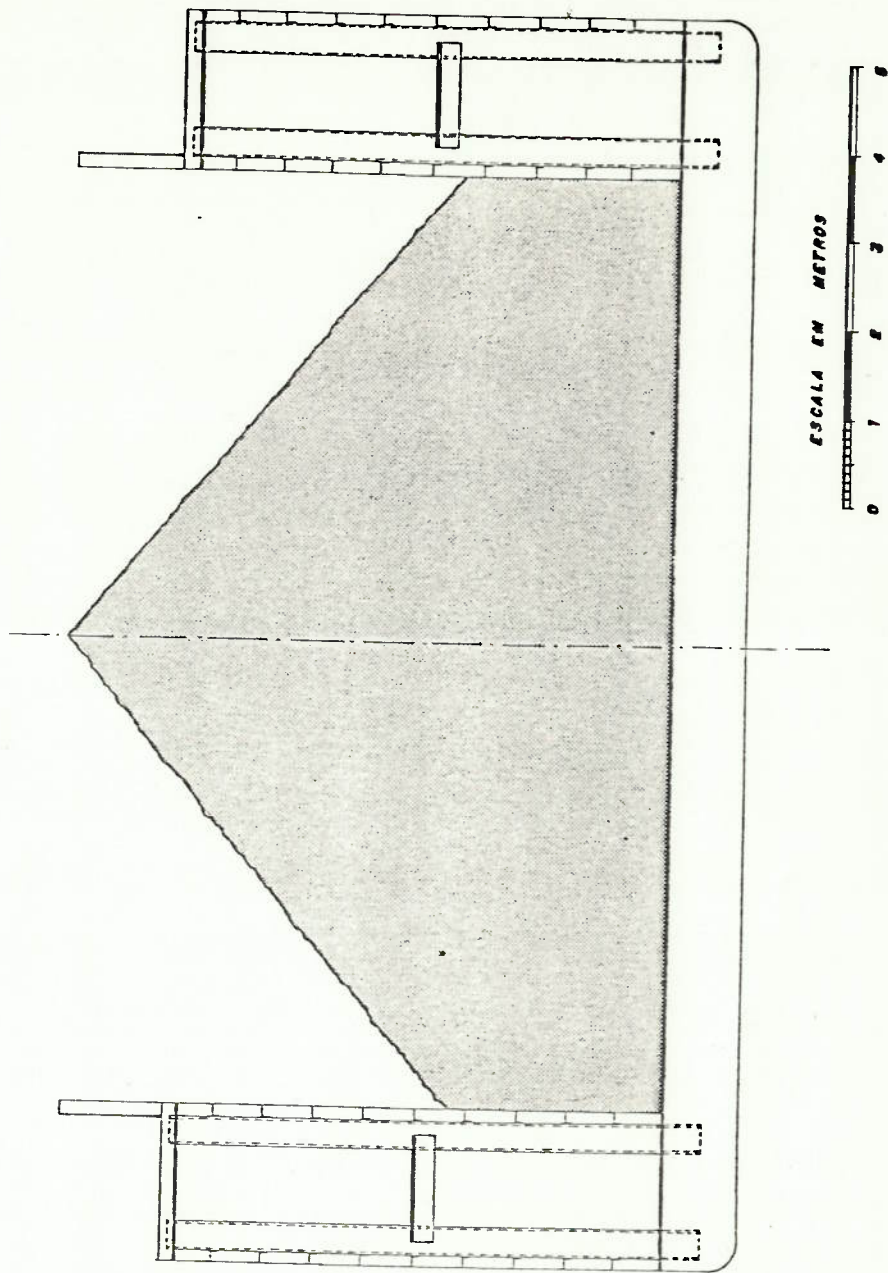


FIGURA 4.9 : SEÇÃO TRANSVERSAL DA CHATA PARA TRANSPORTE DE BAUXITA

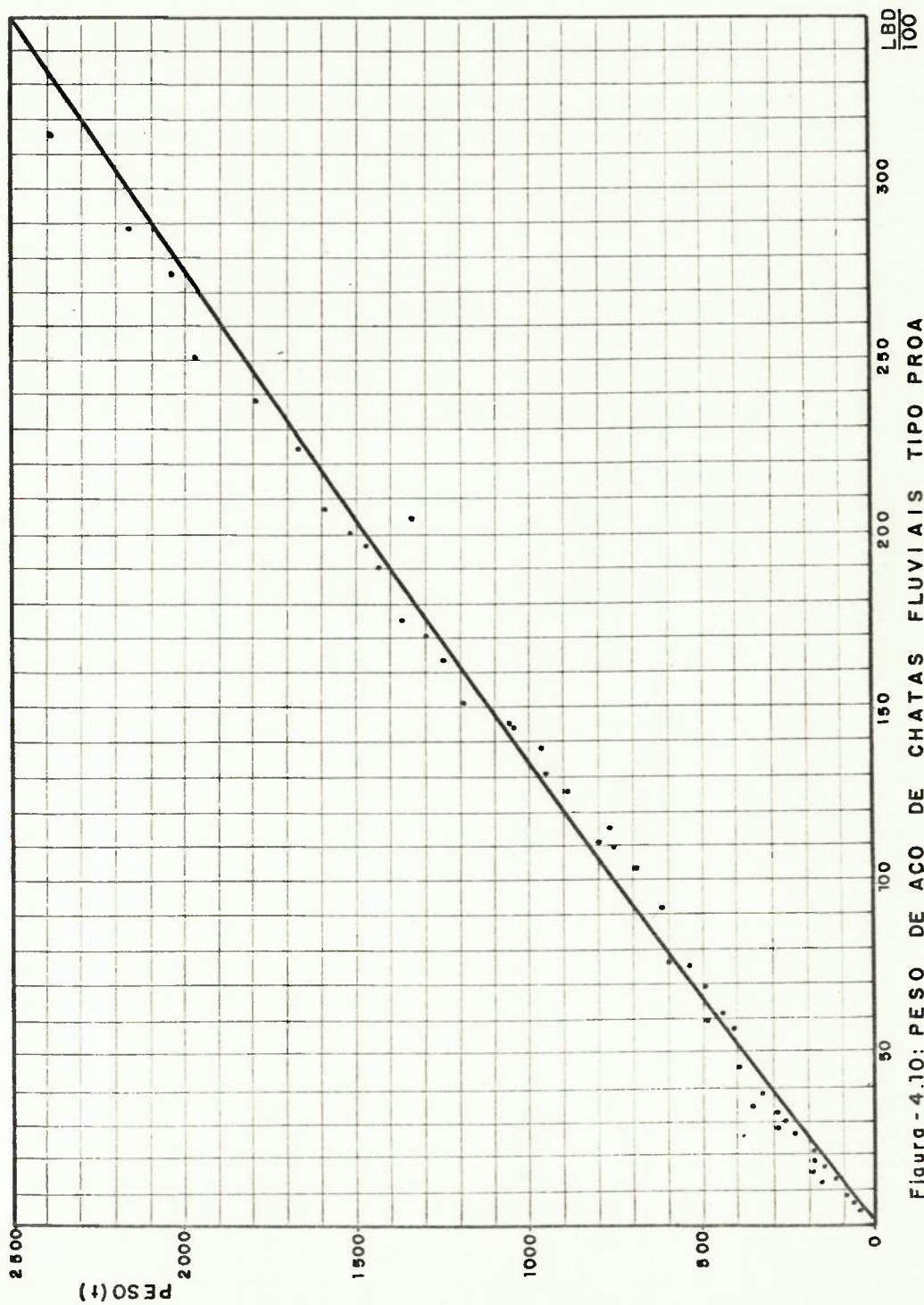


Figura - 4.10: PESO DE AÇO DE CHATAS FLUVIAIS TIPO PROA



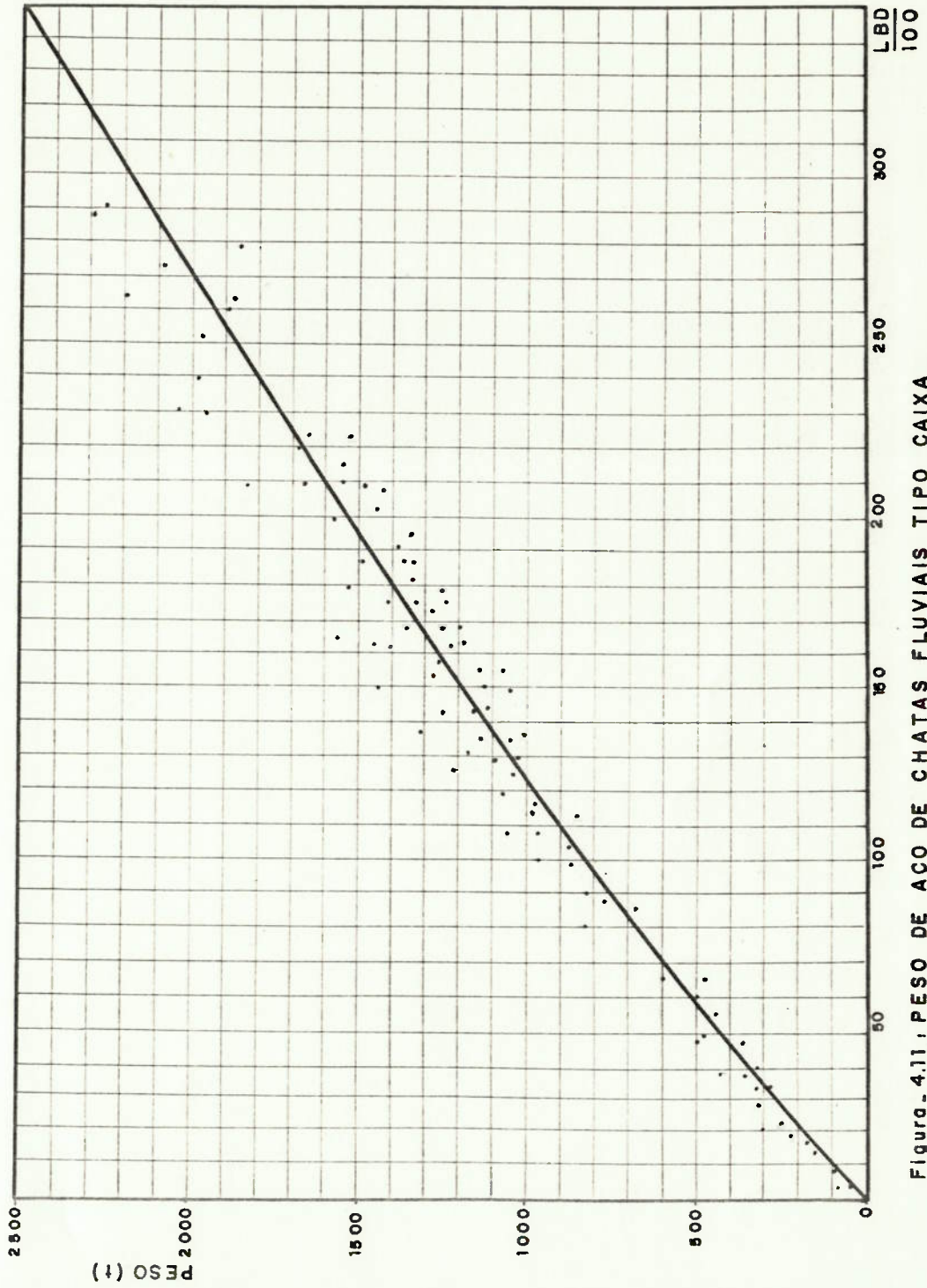


Figura-4.11, PESO DE AÇO DE CHATAS FLUVIAIS TIPO CAIXA



## 5. MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO PARA DETERMINAÇÃO DA SOLUÇÃO ÓTIMA DO SISTEMA DE TRANSPORTE

A solução ótima para o sistema de transporte de bauxita entre Porto Trombetas e Vila do Conde, deve ser aquela que entre as possíveis alternativas de embarcações e rotas vier a apresentar o mínimo custo de transporte.

Esta solução ótima é obtida pela aplicação de técnica de otimização na função de custo de transporte, sujeita a restrições impostas pela hidrovia e por critérios intrínsecos de engenharia e construção naval.

O desenvolvimento do modelo matemático do sistema de transporte é apresentado inicialmente para hidrovia em corrente livre e complementado posteriormente para hidrovias canalizadas. No primeiro caso admite-se que não existem investimentos na via, ao passo que no segundo caso eles existem e incidem no custo de transporte.

### 5.1 Desenvolvimento do modelo matemático para o sistema de transporte utilizando comboios integrados de chatas

#### 5.1.1 Relações funcionais básicas

Para o desenvolvimento do modelo matemático proposto serão definidas inicialmente algumas relações funcionais básicas do sistema, para posteriormente determinar a função de custo de transporte.

### 5.1.1.1 Potência para propulsão

Conforme detalhado no ítem 4.2 pode-se determinar o EHP do comboio em função de (método do IPT):

$$EHP = EHP (V, \nabla, L, B, H) \quad (5.1)$$

A potência requerida pelo sistema propulsivo (BHP) para o comboio operar com uma determinada velocidade  $V$ , é:

$$BHP = 2,5 \cdot EHP \quad (5.2)$$

A potência total instalada no empurrador, levando em conta as folgas habituais de projeto e o fato de o hēlice do empurrador normalmente ser projetado para a condição de tração estática ("Bollard-pull"), conduz a:

$$IHP \geq 1,47 \cdot BHP \quad (5.3)$$

tem-se ainda do ítem 4.1 que:

$$B = NCT \cdot BC$$

$$L = NCL \cdot LC$$

$$\nabla = NCT \cdot BC \cdot NCL \cdot LC \cdot H - 4,55 \cdot H^2 \cdot NCT \cdot BC$$

O dimensionamento da potência instalada de comboios integrados de grande porte, nem sempre pode ser feito apenas em função da potência requerida para navegar a uma determinada velocidade  $V$ . É determinante também a po-

tência necessária para limitar a distância percorrida numa operação de parada brusca de emergência, quando a embarcação navega a essa mesma velocidade  $V$ .

A máxima distância admissível a ser percorrida pelo comboio numa operação de parada de emergência deve ser determinada pela máxima distância de visada que a hidrovia permite. Assim o comboio poderá trafegar em toda a hidrovia na velocidade de regime, porque sempre haverá espaço suficiente para parada caso o piloto observe algo que obstrua a trajetória da embarcação.

Do exame das rotas alternativas e de entrevistas com práticos da região decidiu-se fixar a seguinte posição:

$$\frac{S_s}{L_{m\acute{a}x}} \leq 3 \quad (5.4)$$

sendo:

$S_s$  : distância máxima percorrida

$L_{m\acute{a}x}$ : máximo comprimento de comboio admitido pela hidrovia

A adoção de  $L_{m\acute{a}x}$  como valor de referência é aceitável, uma vez que é determinado pela largura e sinuosidade da hidrovia, elementos determinantes também da distância de visada.

Sendo  $S_s$  definido no ítem 4.4 por:

$$S_s = 2,931 \cdot (IHP)^{-0,4181} \cdot (V)^{1,57} \cdot (\nabla)^{0,5749} \quad (5.5)$$

substituindo em 5.4 resulta:

$$IHP \geq (1,024 \cdot L_{\max})^{2,392} \cdot V^{3,755} (\nabla)^{1,375} \quad (5.6)$$

Observa-se que acima de um determinado valor de V, para um determinado comboio, o IHP é imposto pela expressão 5.6, e abaixo deste valor o IHP é imposto pela expressão 4.12.

#### 5.1.1.2 Capacidade de carga do comboio (TPB)

A capacidade de carga do comboio é obtida pela diferença entre o deslocamento total ( $\nabla$ ) e o deslocamento leve (soma do peso de aço e equipamentos de cada chata do comboio). Conforme detalhado nos itens 4.1 e 4.4, tem-se:

$$TPB = \nabla - \nabla_{\text{leve}} \quad (5.7)$$

$$TPB = NCT.BC.NCC.LC.H - 4,55.H^2.NCT.BC - (NCL.NCT - 2.NCT).$$

$$.13,30. \left[ \frac{LC.BC.D}{100} \right]^{0,89} - 2.NCT.8,05. \left[ \frac{LC.BC.D}{100} \right]^{0,98}$$

#### 5.1.1.3 Tempo de viagem redonda (TVR) e número de viagens redondas por ano (NVR) de cada comboio

O tempo de viagem redonda é obtido pela soma de:

- tempo navegando entre Porto Trombetas e Vila do Conde ( $TN_d$ );

- tempo navegando entre Vila do Conde e Porto Trombetas ( $TN_s$ );
- tempo de espera em fila, no terminal de embarque (TEE);
- tempo de embarque (TE);
- tempo de espera em fila, no terminal de desembarque (TED);
- tempo de desembarque (TD);
- tempo acumulado devido a interrupções ou diminuição de velocidade do comboio em determinados trechos restritivos da rota.

a) Tempo navegando

Para determinação do tempo navegando entre portos Trombetas e Vila do Conde deve-se considerar a hidrovia subdividida em  $i$  trechos. Cada trecho deve ter características homogêneas de navegação. Assim, tem-se:

- tempo navegando entre porto Trombetas e Vila do Conde (descendo o rio)

$$TN_d = \sum_{j=1}^i \frac{d_j}{V_{d_j}} \quad j = 1, i \quad (5.8)$$

$$V_{d_j} = (V + V_{C_j}) \cdot K_{V_j}$$

- tempo navegando entre Vila do Conde e Porto Trombe-



tas (subindo o rio)

$$TN_s = \sum_{j=1}^i \frac{d_j}{V_{sj}} \quad j = 1, \dots, i \quad (5.9)$$

$$V_{sj} = V + \Delta V - V_{cj}$$

sendo:

- $d_j$  : percurso navegável do trecho  $j$   
 $V$  : velocidade do comboio em águas calmas e profundas  
 $V_{dj}$  : velocidade descendo o rio (por trecho)  
 $V_{sj}$  : velocidade subindo o rio (por trecho)  
 $V_{cj}$  : velocidade da correnteza no trecho  $j$   
 $\Delta V$  : acréscimo de velocidade do comboio leve  
 $K_{vj}$  : coeficiente de redução de velocidade devido ao efeito de águas rasas no trecho  $j$ . (ver Anexo II). Considera-se que este efeito só existe para o comboio carregado, uma vez que na condição leve o calado é muito pequeno comparado com a profundidade da hidrovia.

A velocidade de correnteza ao longo da rota é variável. Entre Porto Trombetas e entrada dos furos que contornam a Ilha de Marajó a correnteza é em média 1,0 nō. Já da entrada dos furos até Vila do Conde a correnteza é variável, com sentido e intensidade determinados pela maré.

O cálculo de velocidade do comboio leve, em relação ao comboio a plena carga, para uma determinada potência do empurrador, exige o conhecimento do EHP do comboio leve. A formulação apresentada no ítem 4.2 não pode ser utilizada neste caso, devido ao elevado valor da relação B/H (o calado das chatas é pequeno) e ao fato de que neste caso o empurrador possui calado muito maior do que as chatas e sua resistência deve ser preponderante na resistência do comboio como um todo.

Devido a falta de informações precisas sobre o valor de  $V_C$  e a impossibilidade de determinar, com o modelo proposto, o valor de  $\Delta V$ , admitiu-se:

$$V_{dj} = V_{sj} = V \quad j = 1, i$$

Esta hipótese é conservadora, pois além de  $V_C$  e  $\Delta V$  serem aproximadamente da mesma ordem de grandeza, o efeito de águas rasas é pouco sensível face a profundidade média da hidrovia.

Para determinação do tempo perdido por viagem redonda devido a obrigatoriedade de atravessar a Baía de Marajó a penas entre às 6 horas e às 15 horas, desenvolveu-se na referência 9 uma simulação desta operação. O resultado obtido indicou que este tempo corresponde ao equivalente a uma diminuição média de 13% da velocidade do comboio, pa-

ra uma viagem redonda com velocidade uniforme e sem interrupções.

Assim, tem-se:

$$TN = TN_d + TN_s \quad (\text{tempo navegando}) \quad (5.11)$$

$$TN = \frac{2 \cdot D}{0,87 \cdot 1,853 \cdot V} = 1,24 \cdot \frac{D}{V} \quad (\text{h})$$

onde

D - distância (em km) entre os portos origem e destino por uma determinada rota, ( $1 \text{ n\bar{o}} = 1,853 \text{ km/h}$ ).

b) Tempo de embarque e desembarque

Os tempos de embarque e desembarque são calculados respectivamente por:

$$TE = \frac{TPB}{T_e} \quad (5.12)$$

$$TD = \frac{TPB}{T_d} \quad (5.13)$$

onde

$T_e$  - taxa horária média de movimentação de carga no terminal de embarque (t/h)

$T_d$  - idem para terminal de desembarque

### c) Tempo de espera nos terminais

Para análise do processo de formação de fila, tanto no terminal do Porto Trombetas, como no terminal de Vila do Conde, formulam-se as seguintes hipóteses:

- as chegadas das embarcações nos terminais são regidas por processo de Poisson;
- existe apenas uma posição de atendimento;
- a distribuição do tempo de atendimento é desconhecida;
- é assumido que toda a carga movimentada nos dois terminais é transportada em embarcações idênticas, sendo o número de embarcações atendidas calculado a partir do total de carga a ser movimentada no porto e da capacidade da embarcação. Assim, em Porto Trombetas não se distingue navios de longo curso dos comboios fluviais; interessa apenas saber qual a quantidade total de carga a ser movimentada conjuntamente pela navegação fluvial e pela navegação de longo curso. Assume-se que as embarcações são todas iguais, e com capacidade igual a do comboio fluvial. Sabe-se que os navios de longo curso que frequentarão o terminal situam-se na faixa de 30.000 a 35.000 TPB (toneladas de porte bruto = TDW) e que os comboios fluviais serão todos iguais e portanto com igual valor do TPB.

De qualquer maneira, como se verá adiante, será feita uma análise da variação do tempo de espera em função do des

vio padrão do tempo de atendimento. Caso o porto já operasse, o desvio padrão seria obtido a partir de amostragem de um grande número de embarcações que tivessem frequentado o porto durante um determinado período de tempo.

Com base nestas hipóteses, utilizou-se a equação de Pollaczek - Khintckine (referência 25) para determinar o tamanho médio da fila formada, o tempo médio de espera na fila e principalmente o tempo de permanência da embarcação no porto (tempo de fila somado ao tempo de atendimento).

Definindo:

$\bar{Q}$  = tonelage anual a ser movimentada no porto (embarcada ou desembarcada);

C = capacidade de carga das embarcações, igual para todas elas (t);

V = taxa horária de movimentação de carga do porto (t/hora);

$\lambda$  = fluxo médio de chegadas de embarcações por unidade de tempo (número comboios/hora);

$\rho$  = índice de congestionamento do sistema ( $\rho \leq 1$ )

T = tempo médio de atendimento (ou tempo médio de embarque ou desembarque), definido a partir do instante em que a embarcação está pronta para iniciar operação de atracação até o instante em que libera o terminal.

Tem-se



$$\lambda = \frac{\bar{Q}}{365 \cdot 24 \cdot C} = \frac{\bar{Q}}{8760 \cdot C} \quad (\text{embarcações/hora}) \quad (5.14)$$

$$T = \frac{C}{V} \quad (\text{h}) \quad (5.15)$$

$$\rho = \frac{\text{demanda}}{\text{capacidade}} \text{ do porto} = \frac{\lambda}{1/T} = \lambda \cdot T = \frac{\bar{Q}}{8760 \cdot V} \quad (5.16)$$

A equação de Pollaczek - Khintchine, dá a seguinte expressão para cálculo do tempo médio de espera na fila:

$$W_q = \frac{\rho^2}{2\lambda(1-\rho)} (1 + C_V^2(t)) \quad (5.17)$$

ou, substituindo pelos valores correspondentes:

$$W_q = \left[ \frac{\bar{Q} \cdot C}{(17520,0 \cdot v^2 - 2 \cdot Q \cdot V)} \right] \cdot \left[ 1 + C_V^2(T) \right] \quad (5.18)$$

onde  $C_V$  é o coeficiente de variação do tempo de atendimento. Caso todas as embarcações fossem iguais ter-se-ia  $C_V(T) = 0$ , caso a frequência relativa da capacidade de carga das embarcações que frequentam o porto fosse representada por uma distribuição exponencial ter-se-ia  $C_V(T) = 1,0$ .

Sabe-se, conforme já mencionado anteriormente, que existem praticamente dois tipos únicos de embarcação:

- navios convencionais com TPB na faixa de 30 a 35 mil toneladas;
- comboios fluviais, todos com igual valor de TPB, que é uma das variáveis a ser determinada neste estudo.

Assim, a distribuição da capacidade da carga das embarcações aproxima-se mais de uma distribuição uniforme do que de uma distribuição exponencial, portanto é razoável admitir-se  $C_v \leq 0,5$ .

Tem-se a seguir a variação de  $W_q$  para  $0 \leq C_v(T) \leq 0,5$ .

$C_v(T)$	<u>Acrêscimo % em <math>W_q</math></u>
0	0
0,1	1
0,2	4
0,3	9
0,4	16
0,5	25

Admitindo de forma conservadora  $C_v = 0,5$ , a expressão resultante pode ser traduzida por:

- Terminal de embarque

$$TEE = \left( \frac{(Q + QEE) \cdot TPB}{17520,0 \cdot (T_e)^2 - 2(Q+QEE) \cdot T_e} \right) \cdot 1,25 \quad (5.19)$$

sendo:

Q - tonelagem anual de bauxita embarcada com destino a Vila do Conde.

QEE - tonelagem anual embarcada com destino a outros portos.

- Terminal de desembarque

$$TED = \left( \frac{(Q + QED) \cdot TPB}{17520,0 \cdot (T_d)^2 - 2 \cdot (Q+QED) \cdot T_d} \right) \cdot 1,25 \quad (5.20)$$

sendo

QED - tonelagem anual de bauxita desembarcada em Vila do Conde procedente de outros portos.

Assim, o tempo de viagem redonda  $\bar{e}$  obtido por:

$$TVR = TN + TE + TD + TEE + TED \quad (h) \quad (5.21)$$

Considerando o ano operacional de 330 dias, o número anual de viagens redondas de cada empurrador  $\bar{e}$  de:

$$NVR = \frac{330 \cdot 24}{TVR} = \frac{7920}{TVR} \quad (5.22)$$

#### 5.1.1.4 Capacidade anual de transporte do sistema

A capacidade de transporte do sistema ao longo de um ano operacional de 330 dias  $\bar{e}$  de:

$$Q = NE \cdot TPB \cdot \frac{330 \cdot 24}{TVR} = NE \cdot \frac{7920}{TVR} \cdot TPB \quad (5.23)$$

sendo

NE - número de comboios da frota

Observar que as variáveis Q e TVR são mutuamente dependentes.

Se substituirmos o valor de TVR de 5.21 em 5.23 obtem-se:

$$f(Q) = Q^3 + K_1 Q^2 + K_2 Q + K_3 = 0 \quad (5.24)$$

Sendo  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$  constantes conhecidas.

Para determinação das raízes do polinômio utilizou-se o método de Newton-Raphson. Por este método tem-se:

$$Q_{i+1} = Q_i - \frac{f(Q)}{f'(Q)} \quad i = 1, n \quad (5.25)$$

sendo

$Q_i$  = demanda anual num determinado passo  $i$  do processo de Newton-Raphson

$Q_{i+1}$  = idem no passo  $i + 1$

A partir de um valor inicial fixado  $Q$  o processo converge até que se obtenha  $f(Q) = 0$ . Quando isto ocorrer ter-se-á determinado a demanda anual  $Q$ , e através de 5.23 o valor de TVR.

#### 5.1.2 Relações que expressam custo de transporte fluvial\*

Os principais itens que compõe o custo total de transporte fluvial (excetuando os custos protuários) são:

- custo de amortização do investimento;
- custo com salários e encargos da tripulação;
- custo com óleo combustível e lubrificante;
- custo com reparos e docagens periódicas das embarcações;
- custo com seguro das embarcações;
- custo com administração da frota.

Está descrito a seguir a forma como foram determina-

---

\*custos referidos a 05/1979 para permitir comparação com valores obtidos na referência 9.

dos os valores anuais destes custos para uma frota de NE comboios.

#### 5.1.2.1 Custo anual de amortização do investimento

Para determinar-se o custo anual de amortização do investimento, precisa-se inicialmente obter o montante a ser investido na frota.

A referência 9 fornece as seguintes expressões para o cálculo do custo de construção do empurrador e chatas:

$$CE^* = 16.513,33 \cdot IHP + 24,77 \cdot 10^6 \quad (\text{Cr\$}) \quad (5.26)$$

$$CCH^* = 32.954,50 \cdot \text{Paço} \quad (\text{Cr\$}) \quad (5.27)$$

Sendo

- CE - custo de construção do empurrador;
- IHP - potência total instalada do empurrador (soma da potência dos MCP);
- CCH - custo de construção das chatas que compõem um comboio;
- Paço - peso de aço de todas as chatas do comboio.

Das relações apresentadas no ítem 4.3, verifica-se que as chatas "tipo caixa" apresentam peso de aço ligeiramente superior às chatas "tipo proa". Por outro lado pode-se afirmar que as chatas "tipo caixa", sempre exigirão, devido as suas formas simples, um menor número de Hh (ho -

\*referência maio de 1979 (1,00 US\$ = 24,77 Cr\$)



mens-hora) na sua construção. Assim, é razoável tomar-se o peso de aço da chata tipo proa para cálculo do custo de construção. Resultando:

$$CCH = 32.954,50 \cdot 8,05 \cdot \left( \frac{LC \cdot BC \cdot D}{100} \right)^{0,9801} \cdot NCL \cdot NCT \quad (5.28)$$

O investimento total na frota, é obtido por:

$$(5.29)$$

$$I = NE(CE + CCH)$$

Para cálculos da amortização anual do investimento I, foram feitas as seguintes hipóteses:

- O armador remunera o seu investimento à taxa de 10% ao ano;
- O valor residual da embarcação após 20 anos é 5% do valor da mesma quando nova.

A quantia x, paga anualmente durante n anos, que amortiza e remunera um investimento I a juros de i% ao ano é calculada através da seguinte relação, definida em matemática financeira (ref. 13):

$$x = \left[ FRC \right]_n^i \cdot I = \left[ \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \cdot I \quad (5.30)$$

sendo

FRC o fator de recuperação do capital

Por outro lado, o acumulo do montante S (correspondente ao valor residual da embarcação) após n pagamentos anuais da importância R, à taxa de i% ao ano, é

calculado pela seguinte expressão da matemática financeira:

$$R = \left( FFC \right)_n^i \cdot S = \left( \frac{i}{(1+i)^n - 1} \right) \cdot 0,05.I \quad (5.31)$$

sendo

FFC - fator de formação de capital

Assim, o custo anual com amortização e remuneração do investimento é de:

$$CI = X-R \quad \text{ou} \quad CI = 0,1165.I \quad (5.32)$$

#### 5.1.2.2 Custo com salários e encargos da tripulação

Os custos com a tripulação são os seguintes:

- salários e encargos sociais
- alimentação

Tomando como base os salários, encargos e vantagens pagos pela ENASA - Empresa de Navegação da Amazônia S/A., a tripulação de seus empurradores, tem-se:

$$\text{Custo/dia/tripulante} = \text{Cr\$}672,00$$

Quanto ao custo com a alimentação da tripulação, a ENASA gasta a importância média de Cr\$148,00/dia/tripulante.

Como a tripulação de cada empurrador deverá ser composta de 12 homens, o custo anual será de:

$$\text{CAT} = \text{NE} \cdot 12\,365 \cdot (148 + 672)$$

$$\text{CAT} = 3\,591\,600,00 \cdot \text{NE} \cdot (\text{Cr}\$)$$

(5.33)

### 5.1.2.3 Custo anual com óleo combustível e lubrificante

Existem hoje no mercado nacional motores de baixa e média rotação, com potência acima de 1 500 CV, aptos a queimarem óleo pesado, ou como é mais conhecido "Intermediate Fuel Oil" - IFO -. O IFO é uma mistura do óleo diesel com o "bunker". A utilização do IFO só é recomendada em operação contínua do motor. Em operações que precedem parada da embarcação e operação em locais restritos, assim como acionalmente dos MCP é recomendável a utilização de óleo diesel.

Para cálculo deste custo admitiu-se que em 95% do percurso os MCP\* queimem óleo intermediário - IFO 1000 - e nos 5% restantes óleo diesel.

Sendo:

COI - custo do óleo intermediário em Cr\$/kg;

COD - custo do óleo diesel em Cr\$/kg.

Considerando:

- A potência efetivamente utilizada dos MCA\*, para geração de energia elétrica de bordo sendo em

---

\*MCP : motor de combustão principal

MCA : " " " auxiliar

média de 3,5% do BHP (valor obtido de empurrador de 1000 CV da ENASA);

- O custo com óleo lubrificante de aproximadamente 10% do custo com óleo combustível;
- O consumo específico dos MCP é de 170 g/CV/h, e dos MCA é 160 g/CV/h.

Tem-se a seguinte expressão para cálculo do custo anual com combustível e lubrificante:

$$CC = NE \cdot (0,17 \cdot 0,95 \cdot TN \cdot NVR \cdot BHP \cdot COI + NVR(TN + TP) \cdot 0,16 \cdot 0,035 \cdot BHP \cdot COD + 0,17 \cdot 0,05 \cdot NVR \cdot TN \cdot BHP \cdot COD) \cdot 1,1$$

ou

$$CC = NE \cdot NVR \cdot BHP(TN(0,178 \cdot COI + 0,016 \cdot COD) + 0,006 \cdot TP \cdot COD) \quad (5,34)$$

O custo do IFO 1000 (80% de Banker e 20% de diesel) é de 2,15 Cr\$/Kg. O custo com óleo diesel é de 5,15 Cr\$/Kg.

Estes eram os valores pagos pela navegação interior e de cabotagem em maio de 1979.

#### 5.1.2.4 Custo anual com reparos e docagens periódicas

Este custo anual pode ser estimado em média em:

- chatas: 2% ao ano do custo de aquisição da embarcação;
- empurradores: 4% ao ano do custo de aquisição da embarcação.

Estes valores médios representam os custos aproximados com reparo e docagem periódica, para uma embarcação no 10º ano de operação dentro de uma vida útil de 20 anos.

Assim, resulta:

$$CR = NE \cdot (0,02 \cdot CCH + 0,04 \cdot CE) \quad \text{Cr\$} \quad (5.35)$$

#### 5.1.2.5 Custo anual com seguro das embarcações (CS)

Este custo varia entre 1,6% e 2,2% do valor da embarcação. Para o presente estudo adota-se o índice de 2,0%.

Obtendo-se portanto:

$$CS = 0,02 \cdot I \quad (5.36)$$

#### 5.1.2.6 Custo anual com administração da frota

O custo de administração foi tomado como sendo de aproximadamente 50% dos custos com a tripulação (excluindo-se a alimentação), resultando:



$$CA = 0,5 \cdot NE \cdot 12.365.672$$

$$CA = 1\ 471\ 680,00 \cdot NE$$

(5.37)

#### 5.1.2.7 Custo com preparação da hidrovia

A rota do Caxuanã exigirá investimentos para a abertura do canal de interligação. Conforme já mencionado no item 3.3 este canal deverá ter uma extensão de aproximadamente 50 km.

A figura 5.1 mostra a configuração geométrica do canal a ser dragado com seção transversal trapezoidal. Para canal artificial com seção indicada com base na referência 27 foram adotadas as seguintes relações entre dimensões da embarcação e do canal:

$$b^* = 4,0 \cdot B$$

$$d = H + 1,0m$$

Da figura 5.1 tem-se:

$$S_C = \left( \frac{b + (b + 2 \cdot 0,33 \cdot d)}{2} \right) \cdot d \quad (\text{área da seção transversal do canal})$$

$$S_C = b \cdot d + 0,33 \cdot d^2$$

Substituindo b e d pelos valores acima tem-se:

---

\*  $b = 2 \cdot B$  para canal sem cruzamento de embarcações

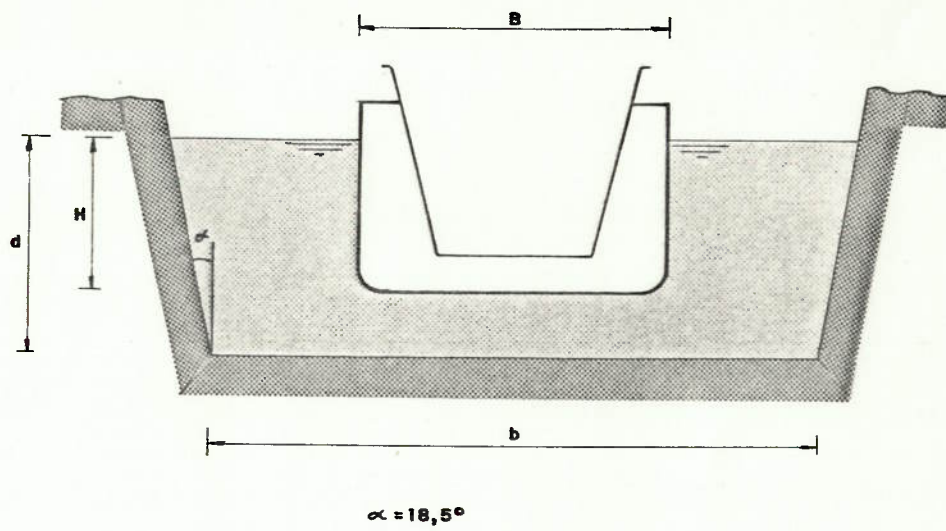


Figura-5.1: SEÇÃO TRANSVERSAL DO CANAL COM CRUZAMENTO  
 $b = 4,0 \cdot B$   
 $d = H + 1,0m$

$$S_c = (H + 1,0)(4,0 \cdot B + 0,33(H + 1,0)) \quad m^2$$

O volume de material a ser dragado\*  $\bar{e}$ :

$$VD = S_c \cdot E_c$$

$E_c$  : extensão do canal (m)

O investimento necessário para abertura do canal  $\bar{e}$  dada por:

$$IC = CUD \cdot S_c \cdot E_c$$

CUD : Custo unitário de dragagem (Cr\$/m<sup>3</sup>)

Conforme detalhado no ítem 5.1.2.1 o custo anual do investimento  $\bar{e}$  dado por:

$$CIH = \left[ FRC \right]_n^i \cdot I_c$$

$$CIH = \left[ \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \cdot I_c$$

$$CIH = \left[ \frac{i}{1 - \frac{1}{(1+i)^n}} \right] \cdot I_c$$

$i$  - taxa de remuneração anual do investimento

$n$  - vida útil do canal em anos

---

\*canal retilíneo

Considerando que um canal desta natureza tem uma vida útil muito longa, a medida que  $n$  tende a  $\infty$ , tem-se da expressão:

$$CIH = i \cdot I_c$$

A abertura deste canal virá beneficiar toda a navegação da região e não somente os comboios que operam no transporte de bauxita. Como a bauxita deverá representar cerca de 50% do fluxo de carga pelo canal, considera-se que sobre esta carga recaia o onus de 50% do custo do investimento necessário para a execução do canal.

Admitindo uma taxa de remuneração do investimento de 10% ao ano, resulta:

$$CIH = 0,05 \cdot CUD \cdot (H + 1,0) \cdot (4,0 \cdot B + 0,33(H + 1,0)) \cdot E_c \quad (\text{Cr\$}) \quad (5.38)$$

### 5.1.3 Restrições impostas às características físicas e operacionais das embarcações

#### 5.1.3.1 Comprimento máximo do comboio

Com base em levantamentos efetuados nas rotas foi possível identificar os seguintes pontos críticos, que devido a sua sinuosidade limitam o máximo comprimento do comboio (ver ítem 3):

<u>Rota</u>	<u>Raio m̄nimo de curva- tura do canal</u>
Ituquara	600 m
Caxuanã - Boiuçũ	1000 m

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de manobrabilidade com modelo em Tanque de Provas (para de -  
terminação das derivadas hidrodinâmicas) e posterior uti-  
lização de programa de simulação de manobra de um comboio  
de 5.248 t obteve-se (referência 20):

$$\frac{D}{L} = 4,7 \quad (5.39)$$

sendo

D - diâmetro tático na manobra de giro

L - comprimento do comboio

Portanto o raio de giro deste comboio em águas  
calmas é de:

$$R = 2,35 \cdot L \quad \left( R = \frac{D}{2} \right) \quad (5.40)$$

Assim, em princípio, para um determinado raio m̄-  
nimo do canal navegável o comprimento m̄ximo do comboio é  
de:

$$L \leq \frac{R}{2,35} \quad (5.41)$$

Todavia levando em conta a existência de corren-  
teza no local, a possibilidade de cruzamento de embarca -



ções que trafegam em sentido contrário, e a própria relação entre a boca da embarcação, seu comprimento e a largura do canal, há necessidade de se impor uma redução no comprimento máximo obtido em 5.41.

A análise detalhada da inscrição do comboio nas curvas de mínimo raio de curvatura, com base na experiência de tráfego de hidrovias (referências 27 e 28) onde se observaram ângulos máximos de deriva de comboio de 15º com corrente pela popa e 7º com corrente pela proa, indicou como mais segura a seguinte imposição.

$$L \leq \frac{R}{4} \quad (5.42)$$

Resultando portanto os seguintes comprimentos máximos das embarcações:

- Rota do Boiuçú e Caxuanã ..... 250 m
- Rota do Ituquara ..... 150 m

O motivo básico da diferença entre os valores apresentados em 5.41 e 5.42 reside no fato de que na expressão 5.41 o comboio desenvolve uma manobra de giro completa (360º) com ângulo de deriva ("drift") de 35º. Este ângulo de deriva de regime só é atingido após a embarcação descrever cerca de um quarto da manobra de giro (90º). Para as rotas analisadas o ângulo máximo entre os eixos de dois trechos retilíneos do canal, ligados por um trecho em cur-

va,  $\bar{e}$  sempre menor do que  $90^{\circ}$ . Deve-se levar tambem em conta que a utilizaçao da expressao 5.41, com angulo de deriva de  $35^{\circ}$  (caso fosse possivel atingir este valor de regime), significa que o comboio descreve uma trajetoria circular com largura de:

$$b = L \cdot \text{sen } 35^{\circ} + B \cdot \text{cos } 35^{\circ}$$

$$b = \frac{R}{2,35} \cdot \text{sen } 35^{\circ} + B \cdot \text{cos } 35^{\circ}$$

sendo

$$B \lll \frac{R}{2,35}, \text{ tem-se}$$

$$b > \frac{R}{2,35} \cdot \text{sen } 35^{\circ}$$

Para  $R = 1\ 000\ \text{m}$  (Rota de Boiuçũ), tem-se:

$$b > 244\ \text{m}$$

Este valor  $\bar{e}$  superior a largura do canal.

Os valores obtidos a partir de 5.42 estao compati-  
veis com as recomendaçoes da referenciam 16.

#### 5.1.3.2 Boca m̃xima do comboio

O valor m̃ximo da boca do comboio normalmente  $\bar{e}$  limitado pela m̃nima largura do canal. As larguras m̃ni-  
mas das rotas em estudo s̃o:

- . Rotas do Boiuçũ e Caxuanã ..... 60 m  
(uma ũnica passagem com 1 000 m de extensao)

- . Rota do Ituquara ..... 100 m  
(grandes extensões do canal)

Com base nas referências 16, 27 e 28, tem-se

$$B \leq \frac{W_c}{4} \quad \text{quando há cruzamento} \quad (5.43)$$

$$B \leq \frac{W_c}{2} \quad \text{quando não há cruzamento} \quad (5.44)$$

( $W_c$  - largura do canal navegável)

Assim resultam os seguintes valores de boca máxima:

- . Rota do Boiuçũ e Caxuanã ..... 30 m  
(sem cruzamento numa extensão de 1000m)
- . Rota Ituquara ..... 25 m  
(com cruzamento em toda a rota)

#### 5.1.3.3 Calado máximo

Impondo uma folga mínima de 1,0 m entre a quilha das chatas e o fundo do canal, obtem-se os seguintes valores máximos para calado:

- . Rotas do Boiuçũ e Caxuanã ..... 5,0 m
- . rota do Ituquara ..... 7,0 m

#### 5.1.3.4 Imposições das Sociedades Classificadoras

As Sociedades Classificadoras impõem limites máximos para as razões comprimento/pontal e boca/pontal. Utilizando os valores recomendados pelo Germanischer Lloyds tem-se:

$$\frac{LC}{D} \leq 33 \quad (5.45)$$

$$\frac{BC}{D} \leq 5 \quad (5.46)$$

#### 5.1.3.5 Demanda mínima anual ( $Q_{min}$ )

A demanda mínima anual a ser transportada pela frota de comboios é determinada pela necessidade de consumo do complexo Albrás/Alunorte, com uma margem de segurança de 10%.

A capacidade de transporte da frota é dada por:

$$Q = NE \cdot \frac{7920}{TVR} \cdot TPB$$

Assim, deve-se ter:

$$7920 \cdot \frac{NE \cdot TPB}{TVR} \geq Q_{min} \quad (5.47)$$

## 5.2 Formalização do problema de otimização

O objetivo do processo de otimização é a determinação das características da frota que apresente mínimo custo anual de transporte.

Conforme desenvolvimento apresentado dos ítems 5.1.1 a 5.1.3, tem-se:

O custo total anual da frota é dado por:

$$C = CI + CAT + CC + CR + CS + CA + CIH \text{ (função custo)} \quad (5.48)$$

Sendo que as parcelas componentes da função custo de transporte, são função das seguintes variáveis independentes, a saber:

- a)  $V$  , velocidade do comboio, em nós;
- b)  $LC$  , comprimento da chata, em m;
- c)  $BC$  , boca da chata, em m;
- d)  $H$  , calado do comboio
- e)  $NCL$  , número de chatas no sentido longitudinal do comboio;
- f)  $NCT$  , número de chatas no sentido transversal
- g)  $NE$  , número de comboios (igual ao número de empurradores).

. As restrições a serem obedecidas pelas variáveis independentes são:

- a) Restrição do comprimento:

$$NCL \cdot LC \leq L_{\max} \quad (5.47)$$

- b) Restrição da boca:

$$NCT \cdot BC \leq B_{\max} \quad (5.50)$$



c) restrição de calado

$$H \leq H_{\max} \quad (5.51)$$

d) restrição estrutural na relação comprimento/pontal:

$$\frac{LC}{D} \leq 33 \quad (5.52)$$

e) restrição estrutural na relação boca/pontal:

$$\frac{BC}{D} \leq 5$$

f) restrição de oferta mínima de transporte:

$$7920 \cdot \frac{NE \cdot TPB}{TVR} \leq Q_{\min} \quad (5.54)$$

Trata-se, portanto, de determinar os valores das sete variáveis independentes de maneira a minimizar o custo anual de transporte  $C$ , satisfeitas as restrições descritas.\*

---

\* os valores finais das variáveis devem atender a faixa de validade das expressões 4.10 e 4.28.

## 6. RESOLUÇÃO DO MODELO

Como resultado de desenvolvimento do ítem 5, recaiu-se num problema de otimização do seguinte tipo:

- minimizar a função de custo

$$C = f(x_1, \dots, x_n)$$

- sujeita às restrições

$$g_j = g_j(x_1, \dots, x_n) \geq 0 \quad ; \quad j = 1, m$$

onde  $x_1, x_2, \dots, x_n$  são as variáveis independentes do problema.

A função de custo e as restrições são funções complexas e não lineares das variáveis independentes. Este facto elimina a possibilidade da utilização de métodos indirectos de otimização (máximo e mínimos de funções diferenciáveis, multiplicadores de Lagrange, etc.).

A escolha recaiu assim sobre métodos directos de otimização aplicáveis a funções não lineares. A familiaridade com a utilização do método de Hooke-Jeeves associado à função de penalidades na resolução de problemas semelhantes (referência 21) e bons resultados obtidos com a análise preliminar do problema em estudo levou à adoção deste método.

A unimodalidade da função e a convergência do método

do foram comprovadas inicializando-se o processo de busca de diferentes pontos de partida e obtendo como resultado final o mesmo valor de mínimo da função custo e das variáveis independentes (dentro de certos limites de precisão aceitáveis).

O método de Hooke-Jeeves associado à função de penalidade foi empregado conforme estudado por Novaes (ref.24). Faz-se a seguir uma descrição sucinta do método utilizado; a referência 24 apresenta uma descrição detalhada tanto do método de Hooke-Jeeves como da função de penalidade.

O problema de minimização inicialmente proposto pode ser transformado em:

$$H(X, l) = f(X) + rP(X)$$

sendo

$H(X, l)$  : função da resposta

$f(X)$  : função de custo cujo mínimo se quer determinar

$P(X)$  : função de penalidade

A função de penalidade utilizada neste caso é dada por:

$$P(X) = \sum_{j=1}^m \left\{ \min |0, g_j(X)| \right\}^2$$

portanto

$$H(X, r) = f(X) + r \sum_{j=1}^m \left\{ \max |0, g_j(X)| \right\}^2$$

portanto quando todas as restrições são satisfeitas ( $g_j(X) \geq 0$ ) tem-se  $H(X,r) = f(X)$ , ou seja a superfície de resposta coincide com a própria função de custo; caso contrário soma-se à função de custo um valor que depende de  $r$  e  $g_j(X)$ .

A sistemática de cálculo é a seguinte:

- a) escolhe-se um valor inicial para  $r_k$  ( $k = 1$ );
- b) aplica-se o método de Hooke-Jeeves para determinar o mínimo de  $H(X, r_k)$ ;
- c) verifica-se se todas as restrições  $g_j(X)$  são atendidas ( $g_j(X) \geq 0$ );
- d) caso todas as restrições sejam atendidas  $H(X,r) = f(X)$  e o valor de mínimo da função dentro da região viável está determinado;
- e) caso uma ou mais das restrições não sejam atendidas faz-se  $k = k + 1$  e  $r_k = 10^{(k-1)}$ .  $r_{k-1}$  e retorna-se para o passo b.

Fox, referência 11, recomenda uma pesquisa inicial para o valor de  $r$ . Adoção de um valor inicial elevado para  $r$  pode falsear o valor de mínimo na região viável, por outro lado a adoção de um valor inicial pequeno para  $r$  acarreta um excessivo número de iterações do processo. Para o problema em estudo a adoção de  $r_1 = 0,1$  levou a resultados satisfatórios.

Quanto ao método de Hooke-Jeeves utilizado para determinar o mínimo da superfície de resposta  $H(X,r)$ , é um processo de busca a partir de um ponto inicial qualquer, onde o avanço no sentido do ponto de mínimo (ou máximo) da função dá-se em fases sucessivas de busca exploratória e movimentação direcional.

A partir de um ponto de partida inicial, definido pelo vetor  $X$ , são feitas explorações sucessivas na direção das  $n$  variáveis independentes. Para cada passo dado em cada uma das  $n$  direções é calculado o valor da função  $f(X)$ . Como resultado da busca exploratória determina-se o ponto  $A$  associado ao menor valor obtido para  $f(X)$ . Na fase seguinte de busca direcional, determina-se o ponto  $B$ , definido pelo vetor  $B = X + 2(A - X)$ . Caso  $f(B) < f(X)$  toma-se  $x = B$  e inicia-se nova fase de busca exploratória. Caso isto não ocorra toma-se  $X = A$  e assim sucessivamente.

Quando não é mais possível determinar um ponto  $A$  tal que  $f(A) < f(X)$ , reduz-se o passo  $(\Delta X_i)$  de cada variável independente no processo de busca exploratória até que seja possível determinar um novo ponto  $A$  ou até que  $\Delta X_i$  seja menor ou igual à precisão desejada.

## 7. ANÁLISE DOS RESULTADOS

As soluções obtidas para as três rotas alternativas são resultado da aplicação do método de otimização descrito no item 6 para resolução do problema de transporte formulado no item 5.

Os seguintes dados do problema de otimização permanecem constantes para as três rotas:

$$Q_{\min} = 2.200.000 \text{ t/ano}$$

$$Q_{EE} = 3.500.000 \text{ t/ano}$$

$$Q_{ED} = 2.400.000 \text{ t/ano}$$

$$T_e = 1.890 \text{ t/h}$$

$$T_d = 1.154 \text{ t/h}$$

### 7.1 Análise comparativa entre as rotas

#### 7.1.1 Rotas do Boiuçũ e Itaquara

A solução ótima determinada para estas duas rotas, atendendo as restrições descritas na tabela 7.1, é apresentada na tabela 7.2.

Tabela 7.1 - Restrições das rotas

Rota	$L_{\max}$ (m)	$B_{\max}$ (m)	$H_{\max}$ (m)	d (km)
Boiuçũ	250	30	5	1028
Itaquara	150	25	7	1102



Tabela 7.2 - Solução ótima

Variáveis	ROTA	
	Boiuçũ	Ituquara
V n̄os	5,5	5,0
H (m)	5,0	7,0
LC(m)	72,7	76,8
BC(m)	14,9	10,8
NCL	3,4	2,0
NCT	2,0	2,3
NE	2,7	4,7
TPB (t)	$30,4 \times 10^3$	$18,4 \times 10^3$
$\nabla$ (m <sup>3</sup> )	$34,1 \times 10^3$	$20,7 \times 10^3$
IHP (CV)	$1,8 \times 10^3$	$2,1 \times 10^3$
Custo unitário (Cr\$/t)	43,18	61,71

A solução obtida para a rota do Boiuçũ apresenta um custo de transporte significativamente menor do que a solução obtida para a rota do Ituquara. Isto mostra que a pesar da rota do Ituquara ser vantajosa para navios convencionais que demandam esta área, devido ao maior calado permitido, o mesmo não ocorre para comboios fluviais. A característica deste tipo de embarcação de poder adquirir as mais variadas configurações geométricas pela simples formação do comboio, permite maximizar o aproveitamento

das dimensões da hidrovia. Enquanto a rota Ituquara permite o tráfego de navios convencionais de maior porte pelo maior calado oferecido, a rota do Boiuçú permite o tráfego de maiores comboios pela maior área de seção transversal do canal.

Notar que não é apenas devido a menor distância que a rota do Boiuçú apresenta um menor custo de transporte, pois mesmo em termos de Cr\$/t/km esta rota é vantajosa.

Outro fato a ser ressaltado, é que apesar do comboio resultante para a rota do Ituquara ter menor porte e menor velocidade que o resultante para a rota do Boiuçú, ele requer maior potência instalada para a parada brusca. Enquanto na rota do Boiuçú a distância máxima percorrida nesta operação é de 750 metros, na rota do Ituquara limita-se a 450 metros, devido a imposição de  $S_s \leq 3 \cdot L_{\max}$ .

#### 7.1.2 Rota do Caxuanã

Esta rota apresenta as mesmas restrições que a rota do Boiuçú (Tabela 7.1.) Estima-se que para a ligação entre os rios Caxuanã e Ipixuna será necessário abrir um canal retilíneo com cerca de 50 km de extensão. A seção transversal do canal será função das dimensões do

comboio. A solução ótima resulta de uma otimização conjunta embarcação-canal, de forma a ter-se o mínimo custo global, dado pela soma dos custos operacionais da embarcação com o custo de remuneração e amortização dos investimentos necessários para construção da frota e abertura do canal.

Para o canal com a geometria apresentada na figura 5.1, com custo de abertura de Cr\$48,00/m<sup>3</sup>, obtêm-se as soluções apresentadas na tabela 7.3, com calado variando de 3,0 a 6,0 metros.

Os resultados obtidos permitem concluir que (para um canal artificial com 50 km de extensão):

- a) a solução do mínimo custo de transporte corresponde ao calado de 4,0 m, portanto canal de interligação dos rios com profundidade de 5,0 m;
- b) a solução de canal sem cruzamento ( $b = 2 \cdot B$ ), com tráfego de embarcações apenas num sentido por vez, apresenta custo de transporte 19% menor do que a alternativa de canal com cruzamento ( $b = 4 \cdot B$ ). Mas apresenta também redução da capacidade de tráfego de no mínimo 50%. A escolha entre estas duas alternativas, com ou sem cruzamento, deve levar em conta outros aspectos tais como: compatibilização entre capa-

cidade de tráfego e demanda prevista, possibilidade de construção de bacias de cruzamento ao longo do canal, tempo de espera das embarcações na entrada do canal;

- c) o menor custo de transporte obtido para esta hidrovia, canal sem cruzamento com calado de 4,0 metros, é 26% maior do que o obtido para a rota do Boiuçú e 12% menor do que o obtido para a rota do Ituquara.

A hidrovia do Caxuanã é uma alternativa a ser considerada quando o fluxo de embarcações na região estiver próximo do limite da capacidade da rota do Boiuçú.

Tabela 7.3 - Resultados obtidos para a rota do Caxuanã

HC(m)	L(m)	B(m)	$\nabla \times 10^{-3}(\text{m}^3)$	C(Cr\$/t)	$S_c(\text{m}^2)$
a) $b = 4.B$ (com cruzamento)					
3,0	250,0	22,8	16,2	68,7	370,0
4,0	248,0	22,6	20,8	67,3	460,0
5,0	215,0	19,7	19,0	69,3	484,7
6,0	214,0	19,5	21,9	72,1	560,7
b) $b = 2.B$ (sem cruzamento)					
3,0	250,0	24,2	17,4	58,5	198,9
4,0	249,0	22,7	21,0	54,5	235,2
5,0	222,0	20,2	20,1	56,0	254,3
6,0	222,0	20,2	23,6	56,9	299,0

A comparação entre as três rotas alternativas mostrou que a rota do Boiuçú é a que permite o tráfego de comboio de menor custo de transporte. Uma vez eleita esta alternativa de rota como a melhor far-se-á uma análise detalhada das características do comboio.

## 7.2 Análise da solução obtida para a rota do Boiuçú

A partir da solução determinada para esta rota, tabela 7.2, será analisada a influência das diversas variáveis no custo de transporte. Será verificada também a vantagem econômica de se constituir uma frota com maior número de comboios do que empurradores, com o intuito de reduzir ao mínimo o tempo do empurrador no porto.

### 7.2.1 Análise do calado do comboio

A tabela 7.4 mostra o efeito da variação do calado entre 3,0 e 6,0 metros, mantidos os valores de  $L_{max}$  da tabela 7.1, sobre o TPB, velocidade e custo de transporte.



Tabela 7.4 - Efeito do calado nas características do comboio

H(m)	V(nós)	TPB x 10 <sup>-3</sup>	C(Cr\$/t)
3,0	5,9	18,9	50,37
4,0	6,0	24,9	45,23
5,0	5,5	30,4	43,18
6,0	5,6	33,1	42,15

Observa-se que para calado acima de 5,0 metros não existe uma redução significativa do custo de transporte decorrente do aumento de calado. O aumento de calado de 5,0 m (máximo permitido) para 6,0 m (poderá ser obtido mediante dragagens em locais restritivos) traria uma redução de apenas 2,4% no custo de transporte. Assim, enfocando apenas o transporte de bauxita, o máximo calado atual da hidrovia está adequado as demais restrições (comprimento máximo e boca máxima).

#### 7.2.2 Análise da variável velocidade

Na figura 7.1 tem-se as características dos comboios otimizados para a rota do Boiuçú, a partir de uma velocidade (V) pré-determinada. Portanto neste caso V deixa de ser variável independente, e uma vez fixada determinam-se as características do comboio de mínimo custo

operando a essa velocidade.

Os resultados obtidos mostram que variações da velocidade entre 5,0 e 7,0 nós não acarretam variações significativas no custo de transporte.

Observa-se que para velocidades abaixo de 6,5 nós a relação  $\nabla/\text{IHP}$  dos comboios otimizados alcança valores muito acima do usual. Os maiores comboios que operam nas hidrovias americanas apresentam em média o valor 10 para esta relação (IHP de 7500 CV para comboios deslocando 75 mil toneladas). A adoção de uma solução que atende-se a este valor usual de  $\nabla/\text{IHP}$  implica na imposição de velocidade mínima na faixa de 6,5 a 7,0 nós.

Para verificação da influência simultânea dos parâmetros velocidade e deslocamento no custo de transporte apresenta-se na figura 7.2 curvas de custo de transporte de comboios homotéticos ao comboio com 250 m de comprimento, 28 m de boca e 5 m de calado, e  $31,7 \times 10^3 \text{ m}^3$  de deslocamento. As dimensões de um determinado comboio homotético de deslocamento  $\nabla_i$  são obtidas a partir do comboio inicial multiplicadas pela escala correspondente, dada por:

$$e = \left( \frac{\nabla_i}{31,7 \times 10^3} \right)^{1/3}$$

Os resultados apresentados não correspondem ao com

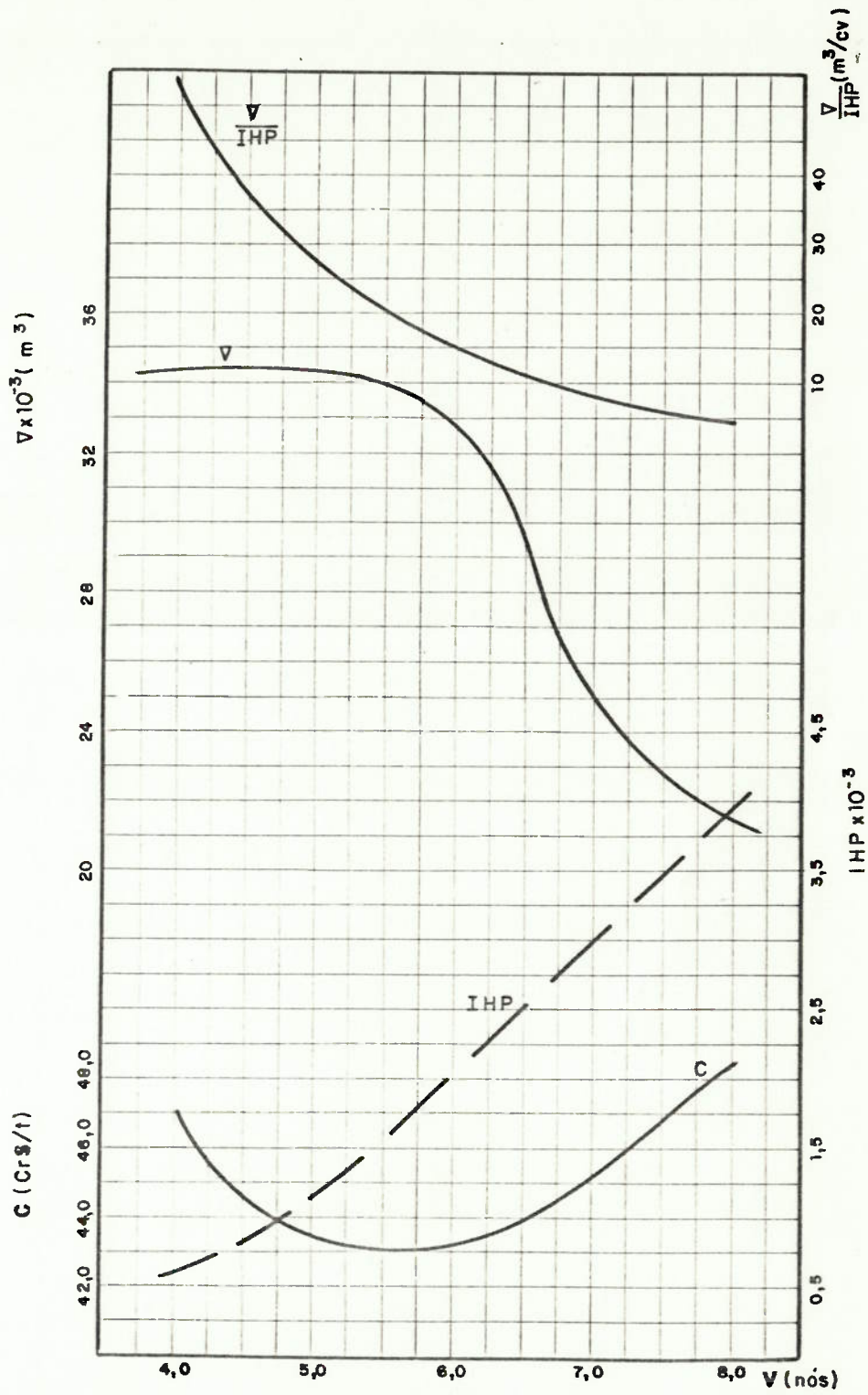


Figura.7.1: CARACTERÍSTICAS DO COMBOIO ÓTIMO EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE

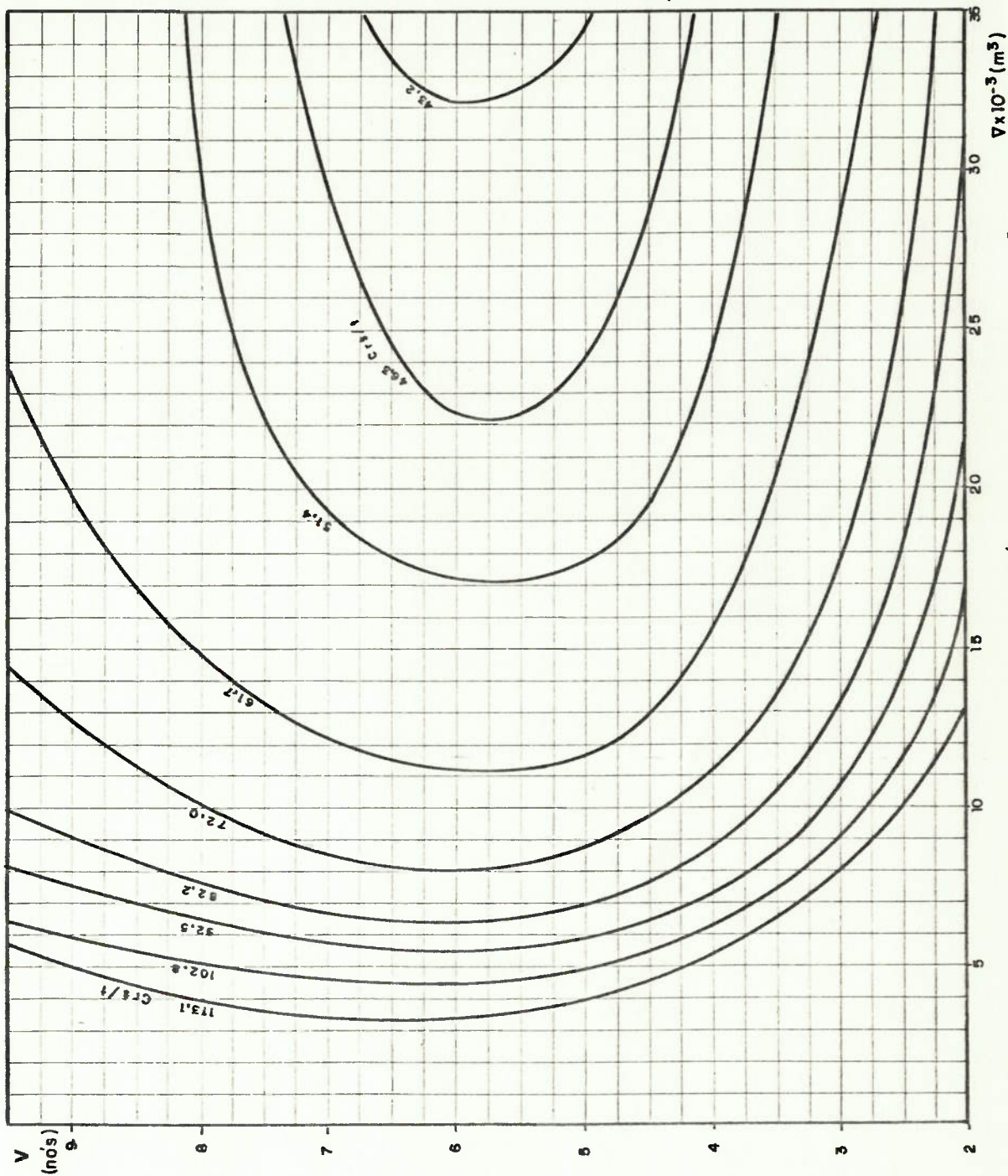


Figura 7.2: CUSTO DE TRANSPORTE DE COMBOIOS HOMOTÉTICOS AO COMBOIO DE  $31,7 \times 10^3 \text{ m}^3$

boio ótimo para um par  $(V, \nabla)$  mas tão somente o custo de transporte de comboios homotéticos operando a uma determinada velocidade  $V$ .

### 7.2.3 Diminuição do tempo parado dos empurradores nos portos (comboio de espera)

O tempo de permanência dos empurradores na área portuária pode ser diminuído caso o número de comboios seja maior do que o número de empurradores. O tempo do empurrador no porto pode ser minimizado pela existência no terminal de um comboio pronto para partir (comboio de espera). Ao chegar ao porto o empurrador deixa um comboio (desmembramento) e retorna com outro previamente liberado. Neste caso o empurrador permanece no porto o tempo mínimo necessário para colocação de suprimentos a bordo, tempo este estimado em 6 horas.

A relação entre número de empurradores e número de comboios deve ser escolhida convenientemente, garantindo-se sempre que o intervalo de tempo entre a chegada de dois comboios sucessivos é maior do que o tempo de carga ou descarga do comboio.

A partir da solução determinada em 7.1 para a rota do Boiuçú, as seguintes alternativas foram testadas:



- a) frota composta de 2 empurradores e 3 comboios, havendo em Vila do Conde (porto de maior tempo de permanência do comboio) sempre um comboio de espera.
- b) 1 comboio de espera em cada porto com as seguintes frotas:
- b.1 - 2 empurradores e 4 comboios (incluindo os 2 de espera.)
- b.2 - 3 empurradores e 5 comboios;

Os resultados obtidos encontram-se na tabela 7.5

Tabela 7.5 - Frotas otimizadas prevendo desmembramento do comboio nos portos.

Alternativa	NE	TPB <sup>*</sup> (t)×10 <sup>-3</sup>	V(nōs)	TVR(h)	TP(h)	C(Cr\$/t)
a	2	30,4	6,5	224,4	28,7	46,26
b.1	2	27,9	6,8	200,8	12,0	50,58
b.2	3	19,6	6,4	211,4	12,0	49,75

TP : tempo de permanência do empurrador nos portos.

TVR : tempo de viagem redonda do empurrador incluindo TP.

OBS: Na solução sem desmembramento (item 7.1) tem-se

TVR = 293,7 h e TP = 67,4 h.

\*por comboio



#### 7.2.4 Limitação da razão $\nabla/\text{IHP}$

Conforme já abordado no ítem 7.2.3 a solução ótima obtida apresenta um valor bastante alto para o coeficiente  $\nabla/\text{IHP}$ . A capacidade de manobra e o próprio tempo de resposta da embarcação é, em geral, inversamente proporcional a este coeficiente.

É usual a operação de grandes comboios em hidrovias americanas com o coeficiente  $\nabla/\text{IHP}$  de aproximadamente 10,0.

Impondo-se esta restrição adicional ao problema,  $\nabla/\text{IHP}$  igual a 10,0 obteve-se a seguinte solução ótima.

$$\begin{aligned} V &= 6,6 \text{ nós} \\ LC &= 69,3 \text{ m} \\ BC &= 13,6 \text{ m} \\ NCL &= 3,6 \\ NCT &= 2,1 \\ NE &= 2,5 \\ TPB &= 28,5 \times 10^3 \text{ t} \\ \nabla &= 32,0 \times 10^3 \text{ m}^3 \\ \text{IHP} &= 3,2 \times 10^3 \text{ CV} \\ C &= 45,23 \text{ Cr\$/t} \end{aligned}$$

Como era de se esperar resultou uma velocidade maior, com o custo 4,7 % superior a solução ótima inicial (7.1.1).

### 7.2.5 Imposição de valores inteiros para as variáveis NCL, NCT e NE.

A solução ótima obtida para a rota do Boiuçú apresenta valores fracionários para as variáveis NCL, NCT e NE, uma vez que estas variáveis são tratadas como reais no processo de otimização.

Para determinação da solução ótima correspondente a valores inteiros destas variáveis, pesquisaram-se todas as combinações possíveis de valores inteiros destas variáveis em torno do valor real corresponde a solução ótima inicial.

Assim para os valores iniciais de  $NCL = 3,4$ ,  $NCT = 2,0$  e  $NE = 2,7$ , tem-se as 4 combinações possíveis

NCL	NCT	NE
3	2	2
3	2	3
4	2	2
4	2	3

A tabela 7.6 resume os resultados obtidos no processo de otimização com o custo função apenas de 4 variáveis independentes (V, LC, BC, H), para os valores pré-fixados de NCL, NCT e NE.

Tabela 7.6 - Soluções obtidas com as variáveis NCL, NCT e NE assumindo valores inteiros em torno do ponto ótimo.

NCL	NCT	NE	V(nós)	TPBx10 <sup>-3</sup> (t)	C(Cr\$t)
3	2	2	8,0	30,5	53,46
3	2	3	5,4	28,2	44,20
4	2	2	8,0	30,5	52,43
4	2	3	5,5	27,3	43,18

Observa-se que existem 2 soluções equivalentes para a formação do comboio. O comboio 4 x 2 (NCL x NCT) a apresenta o mesmo custo de transporte que a solução com variáveis reais determinada inicialmente. O comboio 3 x 2 apresenta um custo de transporte 2,4% superior, mas apresenta sob o aspecto operacional duas vantagens:

- chata com dimensões maiores, e em menor número, facilitando a operação portuária e reduzindo o tempo de "recheio" do porão de carga (retirada da última camada de minério que fica no fundo do porão).
- maior segurança de navegação devido a maior rigidez do comboio formado com 6 chatas em relação ao comboio de 8 chatas.

### 7.3 Conclusões

Da análise desenvolvida no ítem 7.2 resultam as seguintes conclusões:

- a) A solução ótima para o sistema de transporte em estudo é a utilização da rota do Boiuçũ para 3 comboios com formação 4 x 2 ou 3 x 2, com as seguintes características principais:

	formação 4 x 2	formação 3 x 2
V	5,5	5,4
H	5,0	5,0
HL	62,7	83,0
BC	13,4	14,0
NCL	4,0	3,0
NCT	2,0	2,0
NE	3,0	3,0
TPB	$27,2 \times 10^3$	$28,2 \times 10^3$
$\nabla$	$30,5 \times 10^3$	$31,7 \times 10^3 \text{ m}^3$
IHP	$1,5 \times 10^3 \text{ CV}$	$1,5 \times 10^3 \text{ CV}$

- b) A velocidade ótima resultante é baixa tendo-se em decorrência elevados valores da razão  $\nabla/\text{IHP}$ . A imposição de um valor limite para este coeficiente, com base em valores observados, conduz a obtenção de soluções com velocidades mais altas

(~ 6,5 n<sup>o</sup>s). A análise de sensibilidade da variável velocidade mostrou que variações na faixa de 5,5 a 7,0 n<sup>o</sup>s levam a aumentos no custo de no máximo 4,7 %.

- c) A possibilidade de desmembramento do conjunto empurrador-comboio nos portos não deve ser descartada. Verificou-se que a alternativa de manter-se um comboio de espera no porto de Vila do Conde, reduzindo ao mínimo o tempo de empurrador no porto, conduz a uma solução com custo cerca de 7% maior, mas com a vantagem de diminuir o investimento inicial (menor número de empurradores) e apresentar uma velocidade ótima mais elevada, resultando empurradores de maior potência e conseqüentemente valores da razão  $\nabla/\text{IHP}$  dentro do usual.

A utilização do conceito de desmembramento para a formação 3 x 2 apresentada no ítem a, resulta na seguinte solução:

$$\begin{aligned} \text{NE} &= 2 \\ \text{V} &= 7,0 \text{ n}^{\circ}\text{s} \\ \text{IHP} &= 4000 \text{ CV} \\ \text{C} &= 48,31 \text{ Cr\$/t} \end{aligned}$$

A escolha final cabe ao armador e seu projetista, a

partir da solução ótima e das possíveis variações em torno desta solução ótima. Outros parâmetros além do custo de transporte devem ser considerados, tais como grau de confiabilidade da solução, competitividade em relação a proposições de possíveis concorrentes, possibilidade de aumento da demanda no futuro, etc..



## 8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O modelo proposto permite o equacionamento geral das variáveis que caracterizam o dimensionamento de uma frota de comboios integrados de chatas, e a aplicação de técnicas de otimização de tal forma que a escolha final do armador ou seu projetista será feita com base na avaliação de um número reduzido de alternativas otimizadas dentro de certas premissas.

Os resultados obtidos no caso estudado conduzem a chatas de grande porte, muito acima do que usualmente se utiliza em outras hidrovias, mas coerente com o máximo aproveitamento das dimensões oferecidas por uma hidrovia com características naturais excepcionalmente favoráveis.

Esta solução dificilmente seria obtida pela aplicação clássica do método de comparação exaustiva do desempenho de alternativas convencionais.

O Modelo mostrou ser eficiente na otimização conjunta das características embarcação-hidrovia. Para a rota do Caxuanã os resultados obtidos tanto para as dimensões da embarcação, quanto para a geometria do canal artificial são coerentes e usuais para hidrovias com fluxo de transporte equivalente.

Uma vez estabelecida a configuração geral do modelo e comprovada a sua validade para dimensionamento de comboios integrados de chatas, recomendam-se desenvolvimentos adicionais de forma a aumentar a sua confiabilidade e abrangência. Assim, recomenda-se:

- pesquisa sobre manobrabilidade de comboios de grande porte em função dos equipamentos de governo e da relação  $\nabla$ /IHP;
- determinação, através de ensaios com modelo em Tanque de Provas, do acréscimo da resistência hidrodinâmica devido a possíveis descontinuidades do escoamento ao longo do comprimento do comboio;
- análise de critérios de reserva de potência necesária em empurradores para comboios de grande porte.

## NOMENCLATURA

- B : boca total do comboio (m)
- b : largura requerida do canal
- BC : boca de uma chata do comboio (m)
- BHP : potência absorvida pelos hlices (CV)
- $B_{m\acute{a}x}$  : boca máxima do comboio permitida pela hidrovia (m)
- C : custo total anual com a frota
- c : custo de transporte (Cr\$/t)
- CA : custo anual com administração da frota
- CAT : custo anual com tripulação
- $C_b$  : coeficiente de bloco do comboio
- CC : custo anual com óleo combustível e óleo lubrificante de frota
- CI : custo anual com amortização do investimento
- CIH : custo de preparação da hidrovia
- CR : custo anual com reparos e docagens periódicas
- D : pontal da chata (m)
- EHP : potência efetiva de reboque
- H : calado do comboio (m)
- $H_{m\acute{a}x}$  : calado máximo do comboio permitido pela hidrovia (m)
- I : investimento total na frota
- IHP : potência total instalada (CV)
- L : comprimento total do comboio
- LC : comprimento de uma chata do comboio (m)
- $L_e$  : comprimento do corpo de entrada do comboio
- $L_{m\acute{a}x}$  : comprimento máximo do comboio permitido pela hidrovia
- $L_{WL}$  : comprimento na linha d'água do comboio
- NE : número de empurradores da frota (igual ao número de comboios quando não há desmembramento nos portos.)

- NCL : número de chatas no sentido longitudinal do comboio  
NCT : número de chatas no sentido transversal do comboio  
NVR : número de viagens redondas/ano de um comboio  
R : raio de curvatura do canal  
SM : superfície molhada do comboio  
S<sub>s</sub> : distância percorrida pelo comboio até parada total em manobra de parada brusca  
T<sub>e</sub> : taxa horária de embarque da bauxita (t/h)  
TE : tempo de embarque  
TEE : tempo de espera na fila do terminal de embarque  
TD : tempo de desembarque  
T<sub>d</sub> : taxa horária de desembarque de bauxita (t/h)  
TED : tempo de espera na fila do terminal de desembarque  
TPB : tonelagem de porte bruto do comboio (t)  
TVR : tempo de viagem redonda (h)  
V : velocidade do comboio (nós ; 1 nó = 1,853 km/h)  
W<sub>c</sub> : largura do canal

## BIBLIOGRAFIA

1. ALLAN, J.F. ; WALKER, W.P. Resistance of barges in deep and shallow water. Institution of naval architects, 1947.
2. AUCHER, M. Stopping of ships. A General Survey 139 International Towing Tank Conference, Hamburgo, 1972.
- 3. BALAU, J.A.C. Dimensionamento de comboio fluvial para transporte de Bauxita na Região Amazônica. Seminário de pós-graduação, EPUSP, São Paulo, 1976.
4. BOX, J.M. ; DAVIES, D. & SWANN, W.N. Nonlinear optimization techniques. Oliver & Boyd, Edinburgh, 1969.
5. CANO FERNANDES, L.C. Programa de síntese estrutural de chatas fluviais de casco duplo. DINAV, relatório interno, IPT, São Paulo, 1978.
6. COMSTOCK, J.P. (Editor) Principles of naval architecture. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, SNAME, New York, 1967.
7. DESALVO, T.S. On acceleration of barge tows. Journal of the Waterways and Harbors Division, ASCE, 1969.
8. ELSE, V.H. ; SCHER, R.M. Great lakes transport of western coal: Economic and technical analysis. Marine Technology, abril, 1978.
- 9. ESTAI-IPT-ENGEVIX Transporte de bauxita na Amazônia. Docenave, São Paulo, 1980.
10. ESTAI-IPT-ENGEVIX Levantamentos topobatimétricos do furo dos Macacos e estreito do Boiuçú. Docenave, Rio de Janeiro, 1979.
11. FOX, R. Optimization methods for engineering design. Addison-Wesley, London, 1973.
12. GERMANISCHER LLOYD Rules for the classification and construction of inland steel ships. Edição de 1976.
13. HESS, G. et alii, Engenharia econômica. Forum Editora, Rio de Janeiro, 1971.

14. HOWE, C. H. Methods for equipment selection and benefit evaluation in inland waterway transportation. Water Resources Research, 1965.
15. IDESP Considerações preliminares sobre a Hidrovia de Caxuanã. IDESP, Belém, 1974.
16. INSA Report Inland navigation systems analysis. Insa Flotilla Model, U.S. Army corps of engineers, Washington, 1977.
17. IPT Determinação da resistência à propulsão de uma série de comboios fluviais integrados. CNPq, São Paulo, 1978.
18. IPT Ensaio de resistência à propulsão de comboio fluvial para operação no rio Amazonas. DINAV, relatório nº 8346, São Paulo, 1975.
19. IPT Projeto e memorial descritivo de empurrador fluvial de 1000 CV. DINAV, relatório nº 8712, São Paulo, 1975.
- 20. IPT Estudo das características físicas, econômicas e operacionais de embarcações graneleiras para a rede hidroviária do Rio Grande do Sul. DINAV, relatório nº 11829, São Paulo, 1977.
21. IPT Estudo de embarcações fluvio-marítimas. DINAV, relatório nº 12402, São Paulo, 1979.
22. KRAPPINGER, O. Great lakes ore carrier economics and preliminary design. Universidade de Michigan, Detroit, 1966.
- 23. MARIOTTO, M. Métodos para otimização de características principais de navios graneleiros. Tese de Doutorado, EPUSP, São Paulo, 1973.
24. NOVAES, A.G.N. Métodos de otimização. Edgard Blücher, São Paulo, 1978.
25. NOVAES, A.G.N. Pesquisa operacional e transportes. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1975.
26. OOSTERVELD, M.W.C. Ducted propeller characteristics. RINA, Londres, 1973.



27. PIANC. Permanent International Association of Navigation Congressess, XX<sup>o</sup> Congresso, seção 1, Bruxelas, 1961.
28. PIANC, Permanent International Association of Navigation Congressess, XX<sup>o</sup> Congresso, seção 1, Estocolmo, 1965.
29. SCHALE, F. Systematische widerstands und propulsionsuntersuchungen an verschieterer schubbooten und schublerchtern in verband, sowie die gegenüberstellung des schlepleistungsbdarfs fünfzehn unterschiedlicher schubformationen. schiffstecnik, Duisburg, 1961.

ANEXO I

RESULTADOS DOS ENSAIOS COM MODELOS

O método utilizado para extrapolação dos resultados obtidos nos ensaios de Tanque de Provas com modelos, foi o recomendado pela ITTC (International Towing Tank Conference).

Em resumo a formulação utilizada foi:

$$C_T = C_F + C_R \quad (1)$$

sendo:

$C_T$  : coeficiente de resistência total

$C_F$  : coeficiente de resistência de atrito

$C_R$  : coeficiente de resistência residual

Estes adimensionais são expressos por:

$$C_T = \frac{R_T}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^2} \quad (2)$$

$$C_F = \frac{R_F}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^2} \quad (3)$$

$$C_R = \frac{R_R}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^2} \quad (4)$$

sendo:

$V$  : velocidade (m/s)

$R_T$  : resistência total

$R_F$  : resistência de atrito

$R_R$  : resistência residual

$S$  : superfície molhada (m)

$\rho$  : densidade da água ( $\text{kgf} \cdot \text{m}^{-4} \cdot \text{s}^2$ )

Do ensaio com modelo em Tanque de Provas obtêm-se  $R_T$  do modelo ( $R_{TM}$ ) e por conseguinte o  $C_T$  do modelo ( $C_{TM}$ ).

Para determinação do coeficiente da resistência de atrito utiliza-se a formulação dada por:

$$C_F = \frac{0,075}{(\log_{10} R_n - 2)^2} \quad (5)$$

onde o número de Reynolds ( $R_n$ ) é o adimensional definido por:

$$R_n = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad (6)$$

sendo  $L$  o comprimento da embarcação e  $\nu$  a viscosidade de cinemática.

Conhecendo-se portanto  $C_{TM}$  e  $C_{FM}$ , tem-se:

$$C_{RM} = C_{TM} - C_{FM} \quad (7)$$

A hipótese básica deste método de extrapolação é a de que, para um mesmo número de Froude (adimensional dado por  $F_R = V/\sqrt{9,81 \cdot L}$ ) o coeficiente de resistência residual do navio ( $C_{RN}$ ) é igual ao coeficiente de resistência residual do modelo ( $C_{RM}$ ):

$$C_{RN} = C_{RM} \quad (8)$$

Podendo-se calcular o coeficiente de resistência de atrito do navio ( $C_{FN}$ ) pela expressão 5. Assim obtêm-se para o navio:

$$C_{TN} = C_{RN} + C_{FN} \quad (9)$$

obtendo-se a resistência a propulsão para uma determinada velocidade por:

$$R_{TN} = C_{TN} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_N \cdot V^2$$

A potência efetiva (EHP) é calculada por:

$$|EHP|_{\text{tanque}} = \frac{R_{TN} \cdot V}{75} \quad (CV)$$

Com base nesta formulação foram extrapolados os resultados de ensaios com modelos para comboios com deslocamento variando entre 500 m<sup>3</sup> e 30.000 m<sup>3</sup>. A escala correspondente (e) entre navio e modelo é obtida por:

$$\frac{\nabla_N}{\nabla_M} = e^3$$

$$e = \left| \frac{\nabla_N}{\nabla_M} \right|^{1/3}$$

As figuras I.1 a I.12 apresentam os resultados obtidos para  $6,5 \leq L/B \leq 10,1$ .

Referência:

- (17) IPT Determinação da resistência à propulsão de uma série de comboios fluviais integrados. CNPq, São Paulo, 1978.

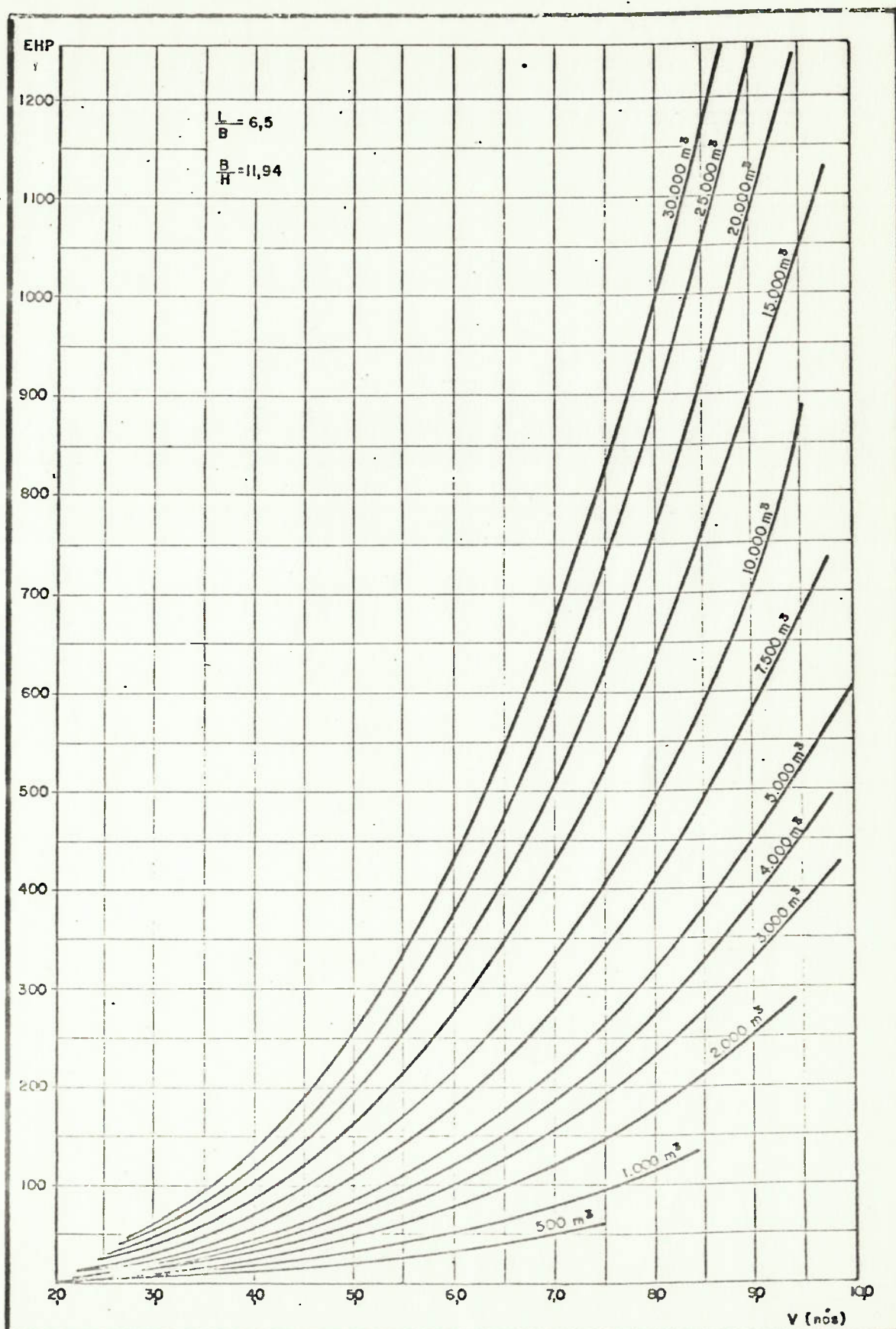


Fig. I.1 - Extrapolação dos resultados obtidos com modelo "C"



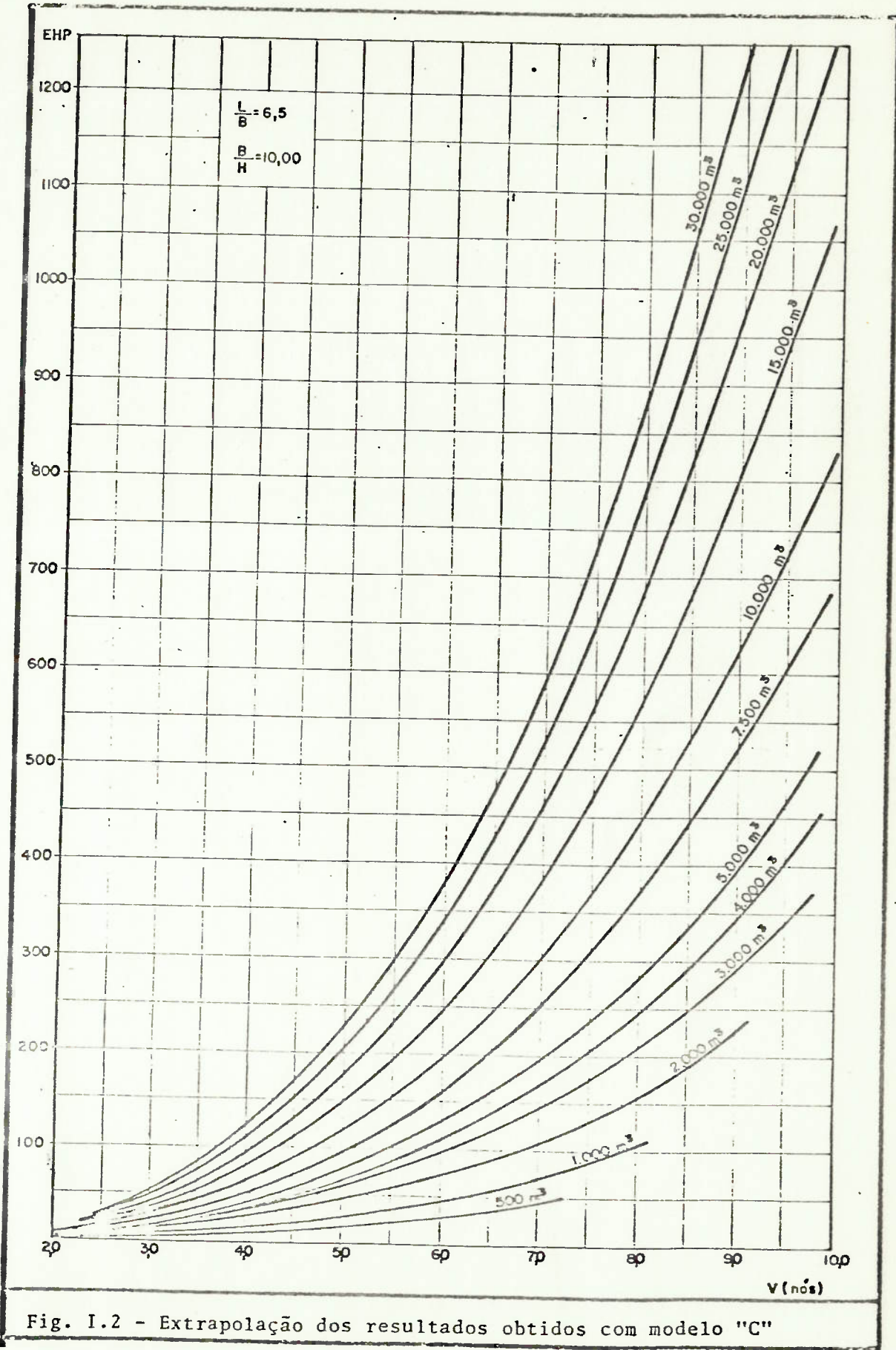


Fig. I.2 - Extrapolação dos resultados obtidos com modelo "C"

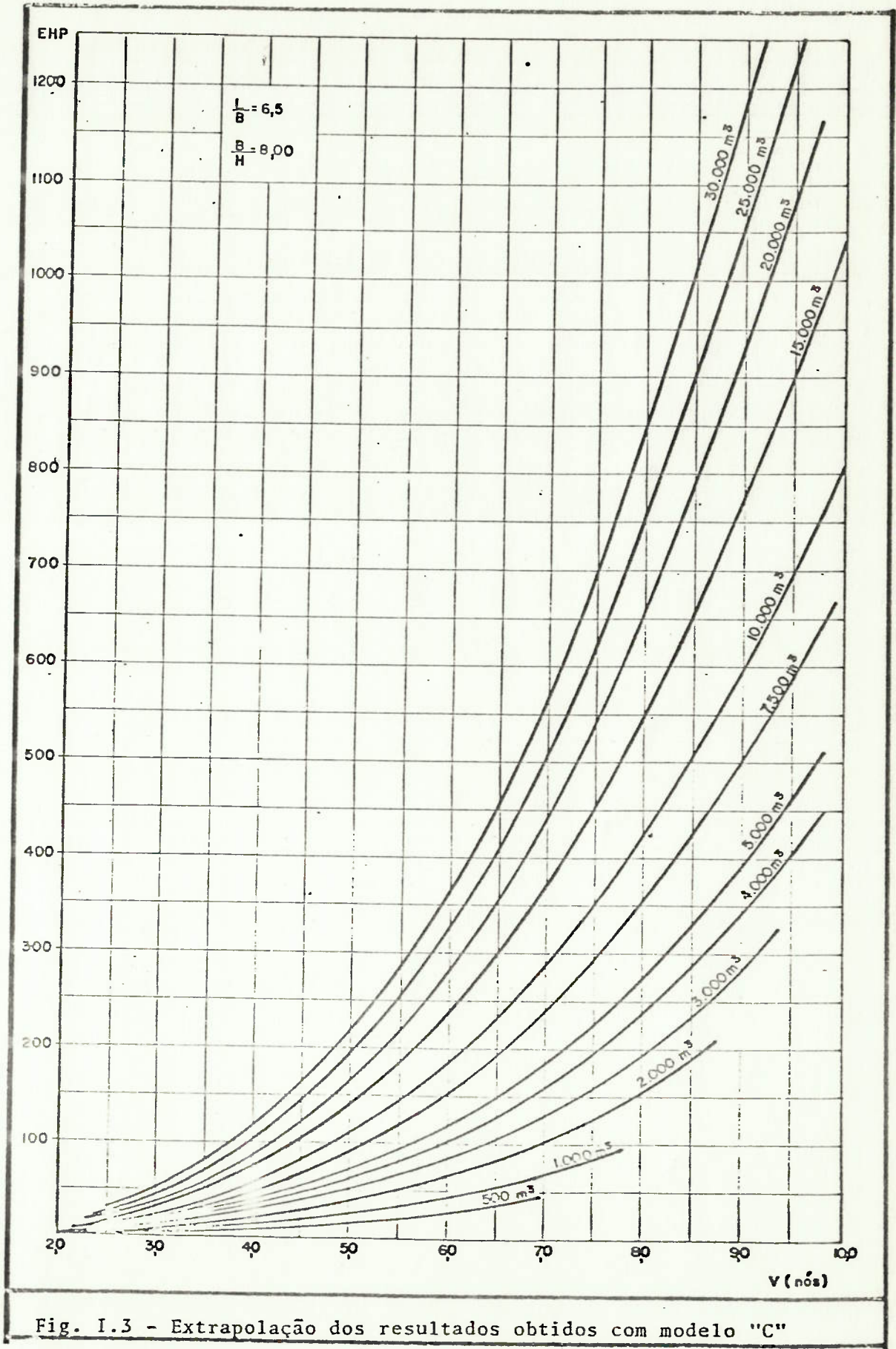


Fig. I.3 - Extrapolação dos resultados obtidos com modelo "C"

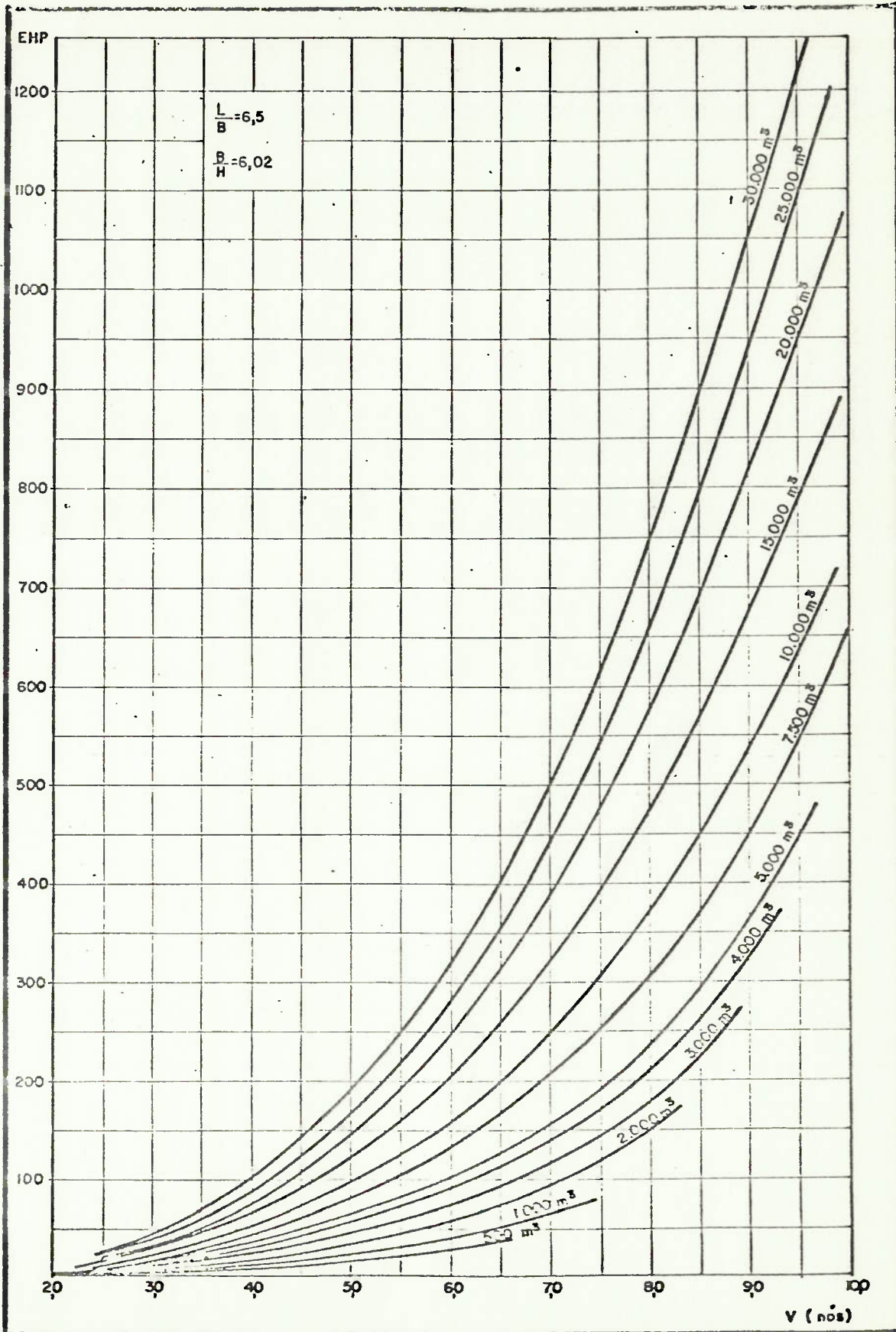


Fig. I.4 - Extrapolação dos resultados obtidos com modelo "C"



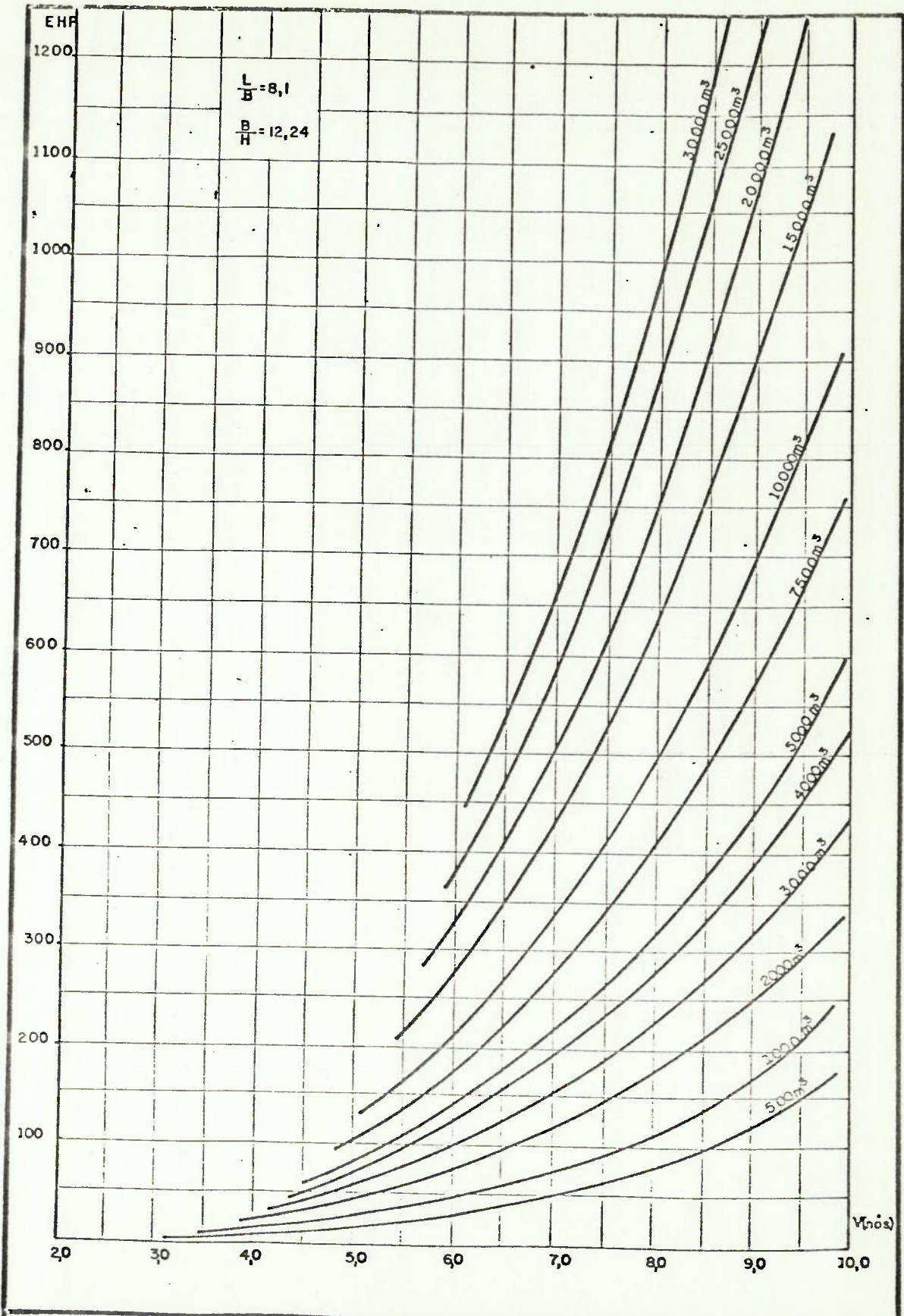


Fig. I.5 - Extrapolação dos resultados obtidos com modelo "D"

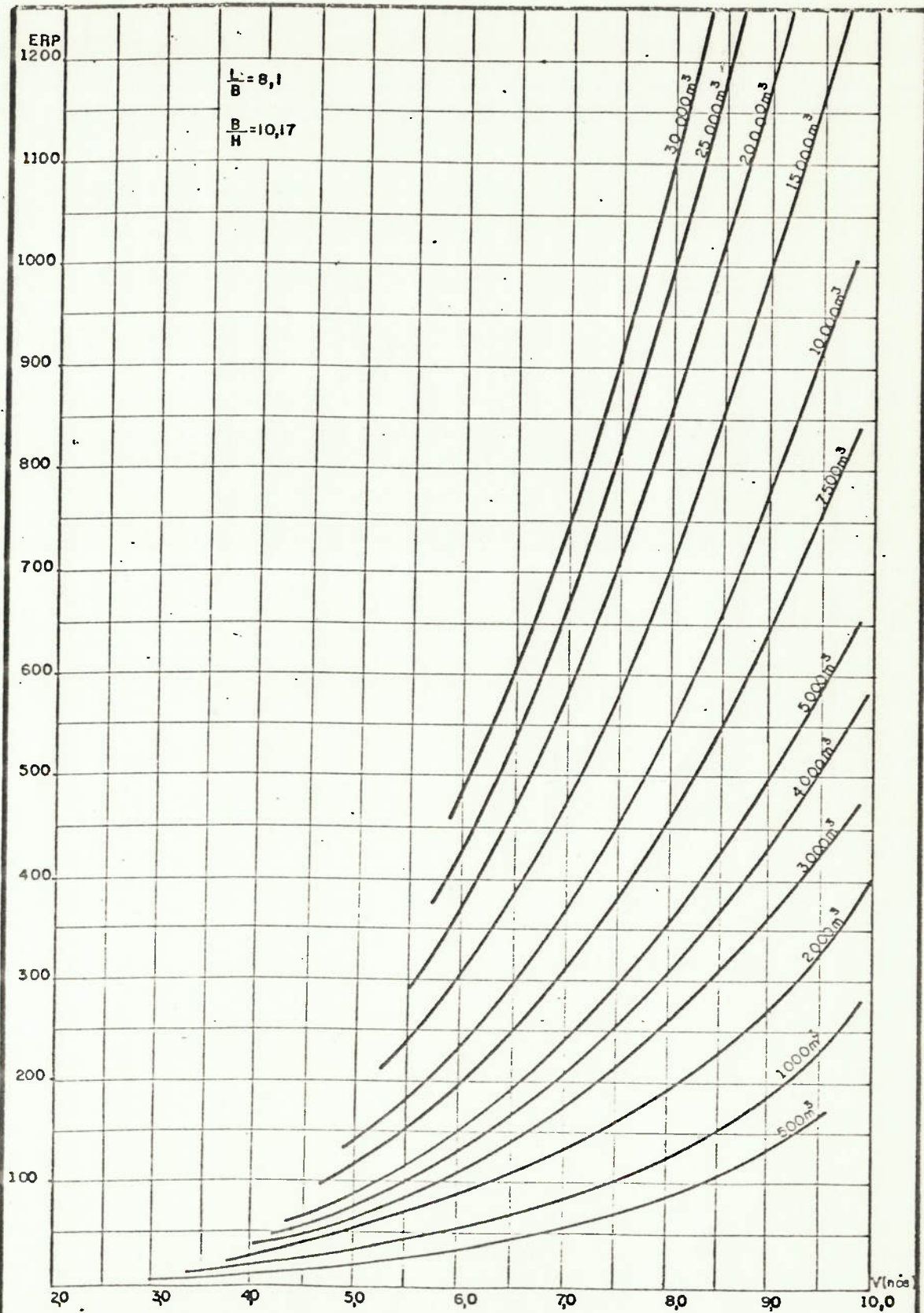


Fig. I.6 - Extrapolação dos resultados obtidos com modelo "D"



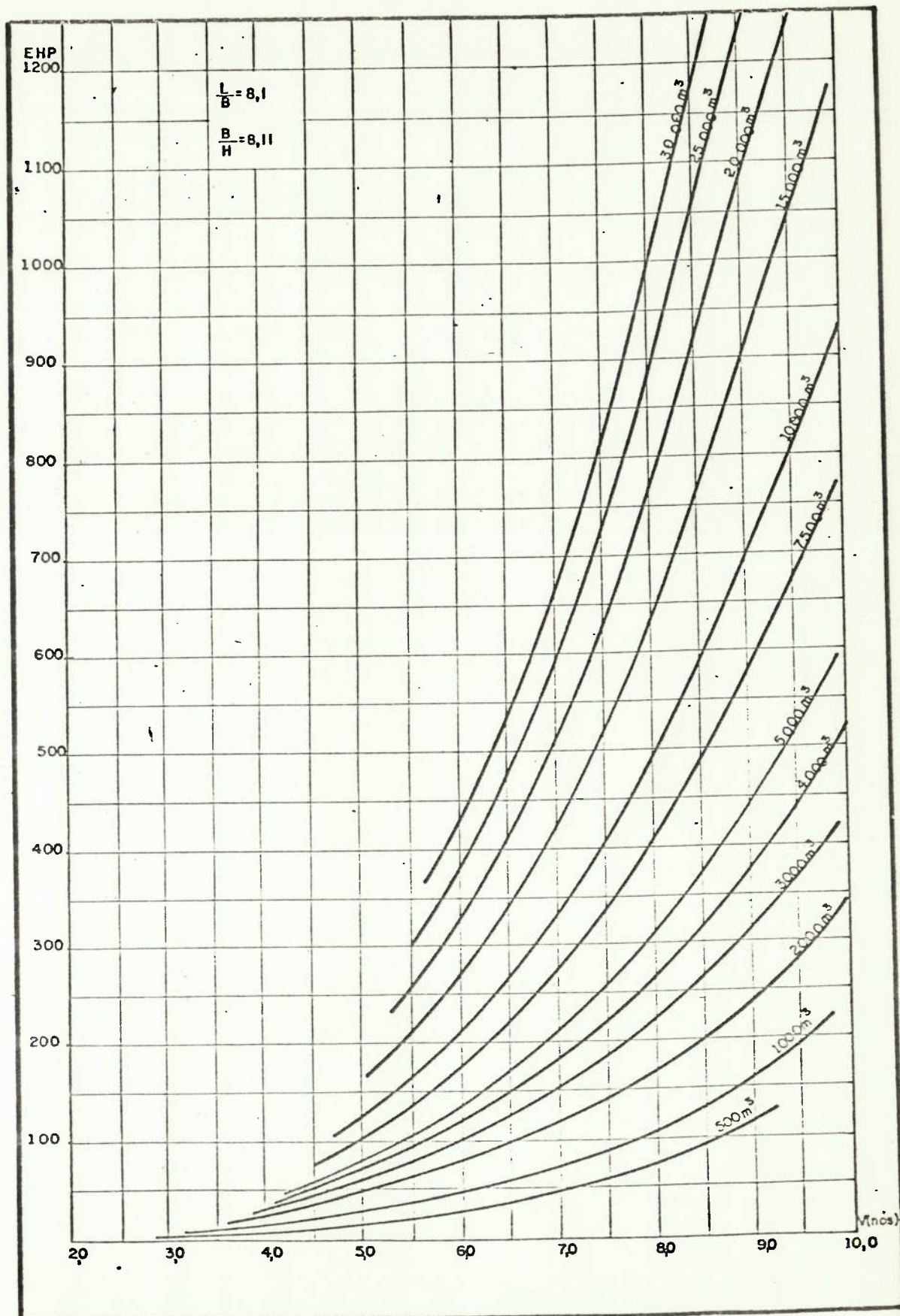


Fig. I.7 - Extrapolação dos resultados obtidos com modelo "D"



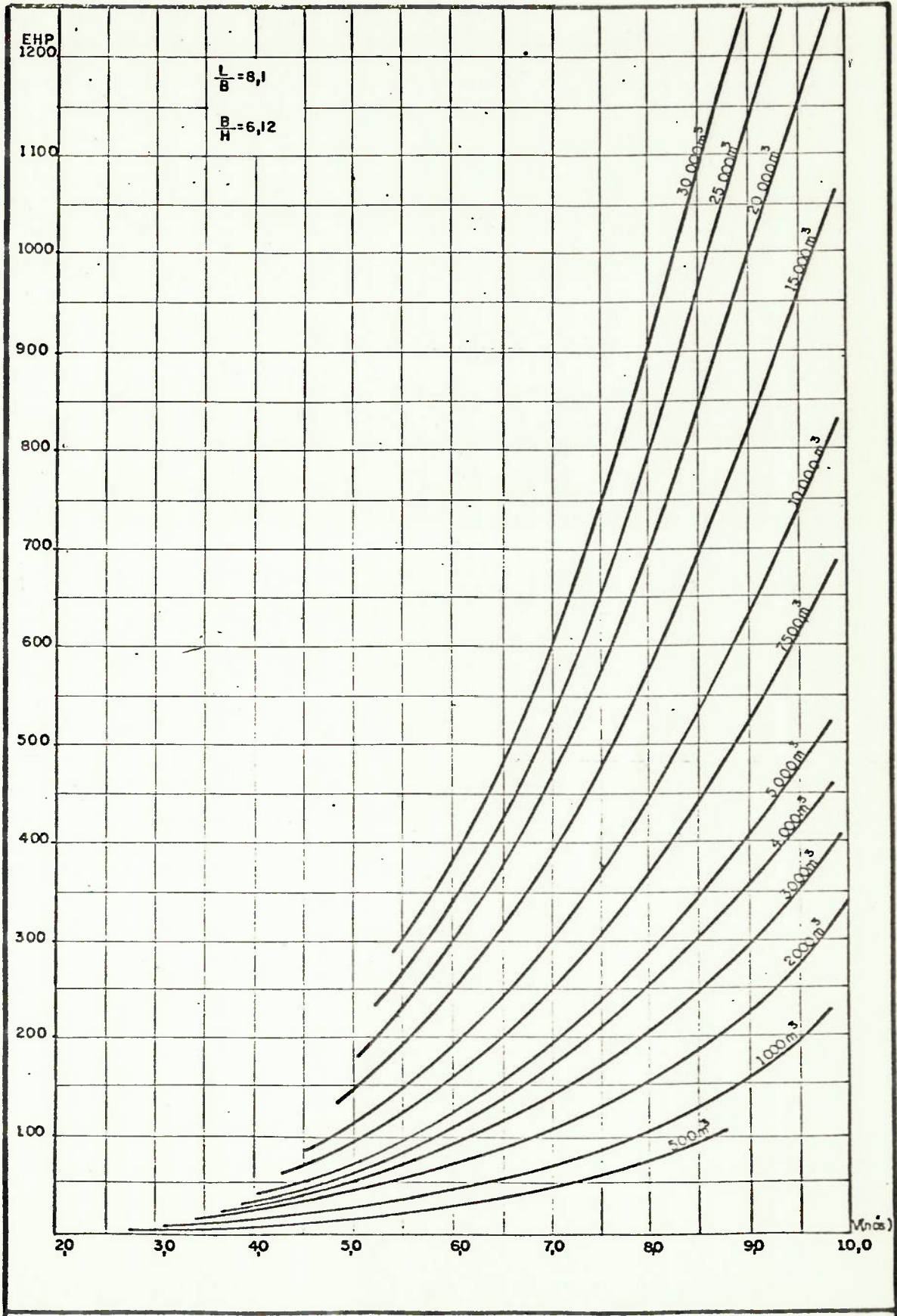


Fig. I.8- Extrapolação dos resultados obtidos com modelo "D"

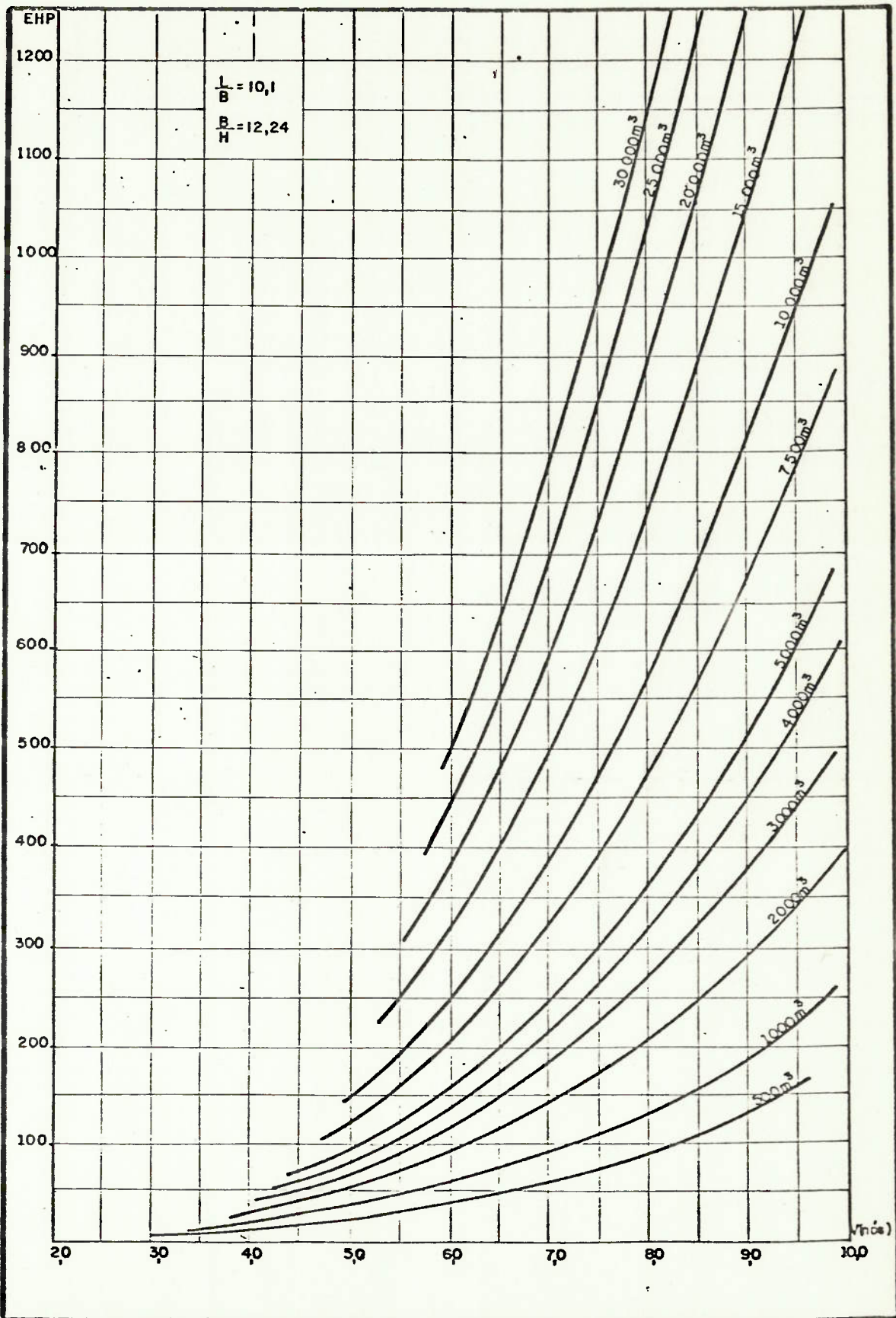


Fig. I.9 - Extrapolação dos resultados obtidos com modelo "E"

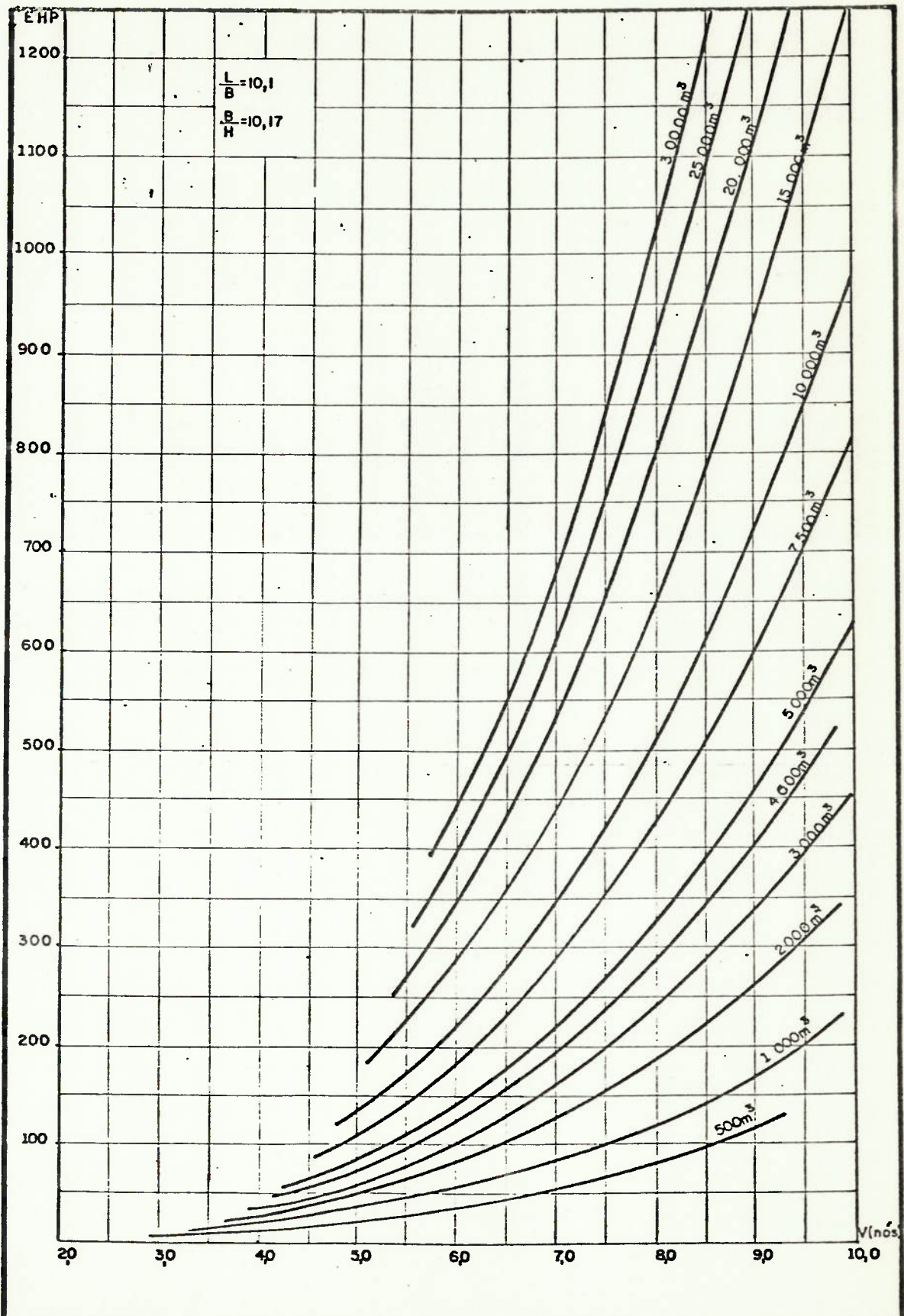


Fig. I.10 - Extrapolação dos resultados obtidos com modelo "E"



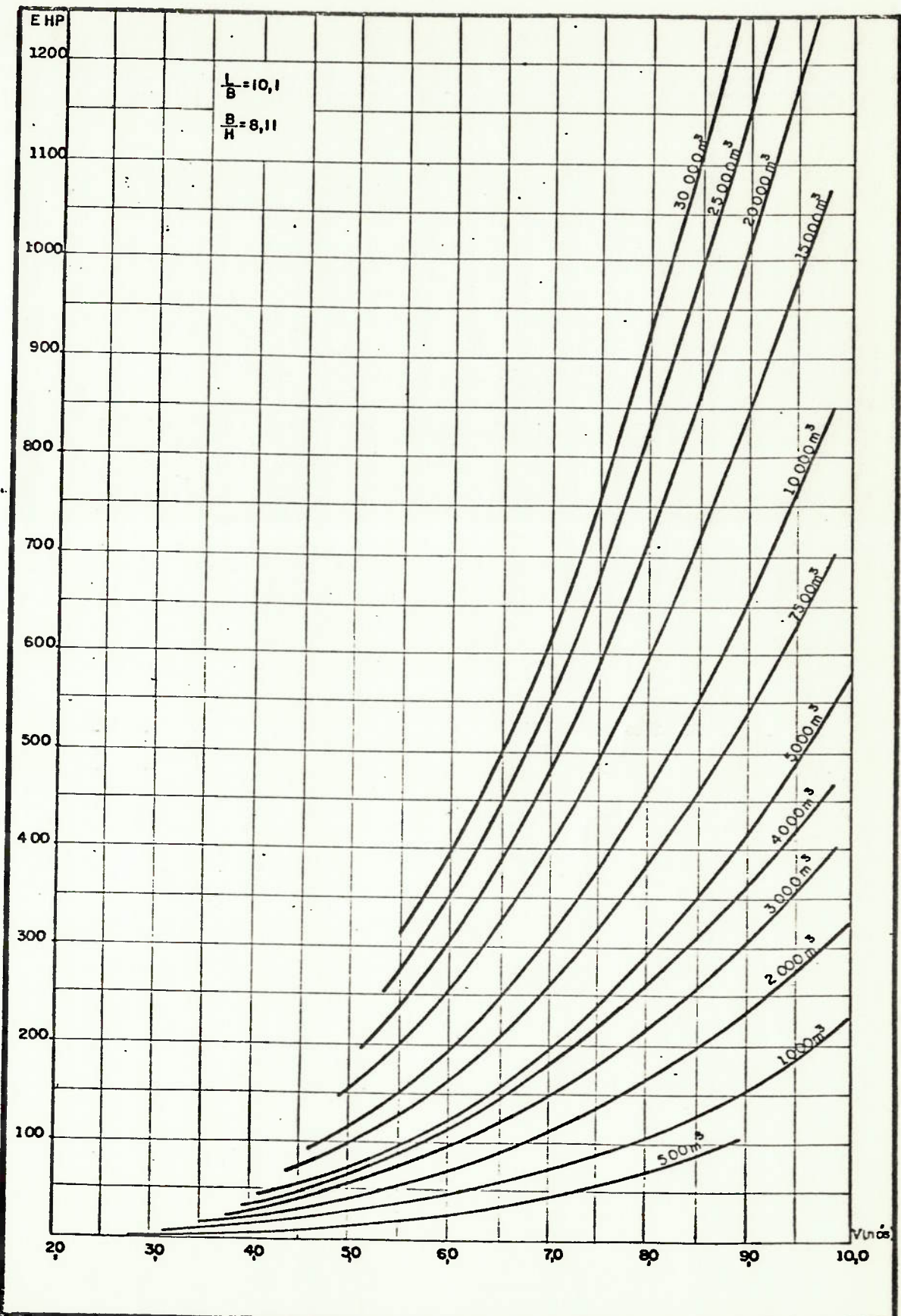


Fig. I.11- Extrapolação dos resultados obtidos com modelo "E"

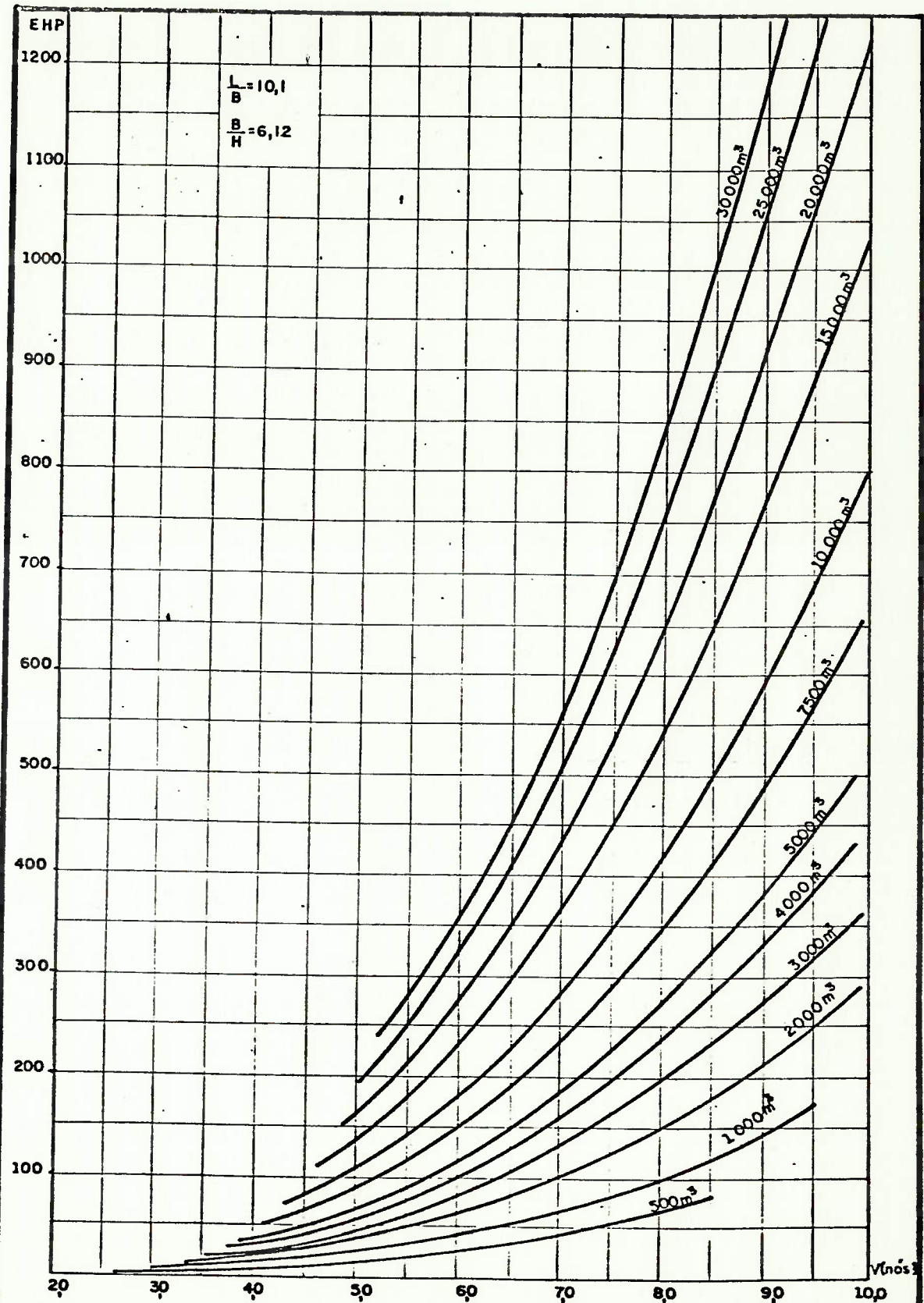


Fig. I.12 - Extrapolação dos resultados obtidos com modelo "E"

ANEXO II

EFEITO DE ÁGUAS RASAS



## EFEITO DE ÁGUAS RASAS NA VELOCIDADE DA EMBARCAÇÃO

Sempre que a profundidade do canal navegável não é significativamente maior do que o calado da embarcação o corre o efeito de águas rasas.

Em termos práticos isto significa que, quando a embarcação passa de um trecho da hidrovia com águas profundas, para um trecho com águas rasas ocorre um acrêscimo na resistência à propulsão com conseqüente diminuição da velocidade da embarcação em relação a velocidade anterior em águas profundas. Caso contrário é necessário aumen-tar a potência entregue pelo motor ao hélice de forma a manter constante a velocidade. O mais usual é o motor o-perar sempre numa potência máxima contínua de serviço, e ocorrer uma redução de velocidade no trecho de águas ra-sas da hidrovia.

A referência 1, com base no trabalho realizado por O. Shlichting, ajustou, pelo método dos mínimos quadrados, a seguinte expressão:

$$\frac{V_{\infty}}{V} = 0,891 + 0,228 \frac{\sqrt{A}}{d}$$

Sendo:

- V : velocidade do comboio em águas profundas
- V : velocidade em águas rasas
- A : área da máxima seção transversal imersa da embarcação (boca total x calado, no caso de

comboio).

$d$  : profundidade do canal navegável.

Esta expressão é válida para canais de largura irrestrita (pelo menos 5 vezes maior que a boca da embarcação) e para:

$$0,477 < \frac{\sqrt{A}}{d} < 1,36$$

O limite superior de validade impediria a utilização desta expressão para comboios com boca elevada operando em locais em que a profundidade é pouco superior ao calado. No entanto, de acordo com a referência 1, devido a linearidade da expressão, a mesma pode, numa primeira aproximação ser utilizada acima da faixa determinada por Schlichting.

Na figura II.1 tem-se a redução de velocidade em águas rasas para diferentes características do comboio e diferentes profundidades do canal navegável.

Referência:

- (1) MACBURY, F. "Least-Energy Operation of River Shipping" Marine Technology, abril de 1979, vol. 16.

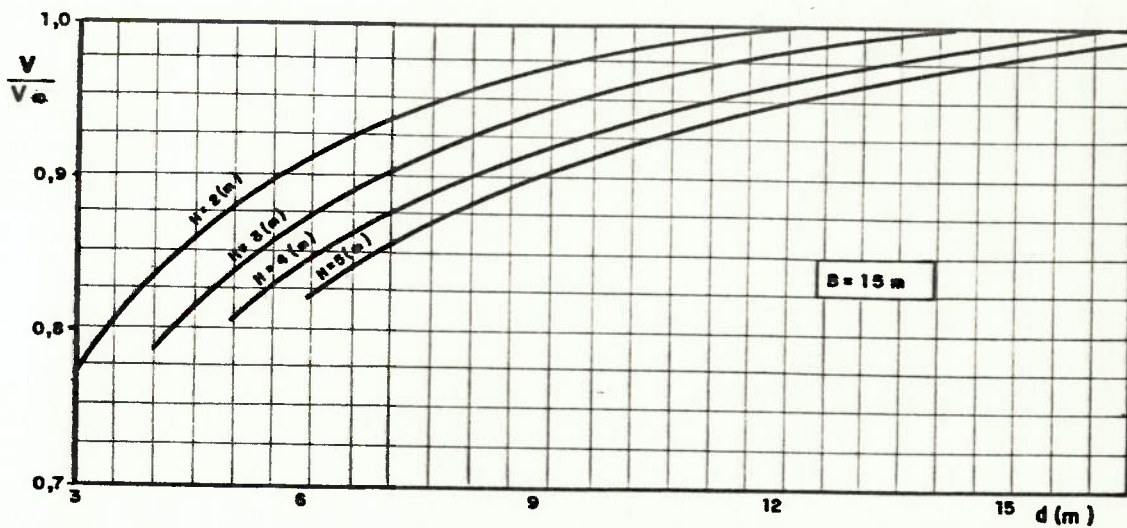
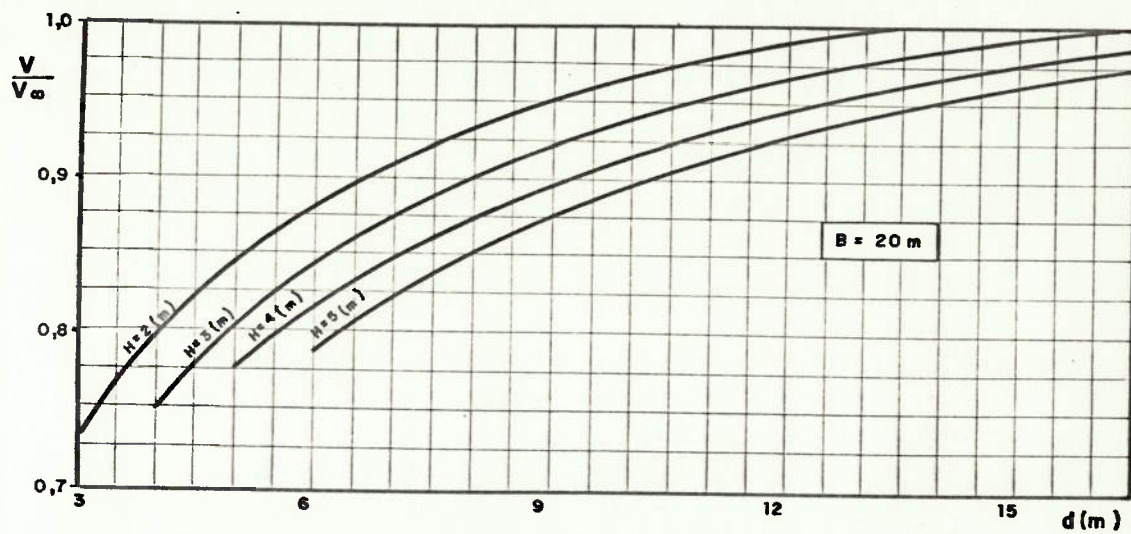


Figura. II -1. REDUÇÃO DE VELOCIDADE EM ÁGUAS RASAS

d: PROFUNDIDADE

H: CALADO

B: BOCA TOTAL DO COMBOIO

V: VELOCIDADE EM ÁGUAS RASAS

$V_0$ : VELOCIDADE EM ÁGUAS PROFUNDAS

ANEXO III

RESULTADOS DO PROGRAMA DE CÁLCULO DA  
DISTÂNCIA PERCORRIDA EM MANOBRA DE  
PARADA BRUSCA

\*\*\*\*\*  
 DISTANCIA PERCORRIDA PARA PARADA TOTAL DA EMBARCACAO  
 A PARTIR DA VELOCIDADE DE OPERACAO  
 \*\*\*\*\*

DESLOCAMENTO.....	32000.0 TON
COMPRIMENTO.....	277.3 METROS
POTENCIA DE CADA MOTOR.....	3500.00 HP
VELOCIDADE DE OPERACAO.....	8.00 NOS
RESISTENCIA DA EMBARCACAO NA VELOCIDADE DE OPERACAO..	23.927 TON
NUMERO DE HELICES.....	2
EMPUXO DO(S) HELICE(S) OPERANDO A RE.....	42.807 TON
TEMPO DE REVERSAO DO(S) MOTOR(ES).....	30. SEG
DISTANCIA PERCORRIDA ATE PARAR(P/METODO SIMPLIFICADO)	746. METROS

TEMPO(MIN)	VELOCIDADE(NOS)	DISTANCIA(METROS)
0.500	8.00	124.
0.875	7.20	212.
1.277	6.40	296.
1.707	5.60	376.
2.163	4.80	449.
2.646	4.00	514.
3.153	3.20	571.
3.681	2.40	616.
4.227	1.60	650.
4.784	0.80	671.
5.347	-0.00	678.

\*\*\*\*\*  
 DISTANCIA PERCORRIDA PARA PARADA TOTAL DA EMBARCACAO  
 A PARTIR DA VELOCIDADE DE OPERACAO  
 \*\*\*\*\*

DESLOCAMENTO..... 30000,0 TON  
 COMPRIMENTO..... 277,3 METROS  
 POTENCIA DE CADA MOTOR..... 4000,00 HP  
 VELOCIDADE DE OPERACAO..... 8,00 NOS  
 RESISTENCIA DA EMBARCACAO NA VELOCIDADE DE OPERACAO.. 23,927 TON  
 NUMERO DE HELICES..... 2  
 EMPUXO DO(S) HELICE(S) OPERANDO A RE..... 46,751 TON  
 TEMPO DE REVERSAO DO(S) MOTOR(ES)..... 30, SEG  
 DISTANCIA PERCORRIDA ATE PARAR(P/METODO SIMPLIFICADO) 704, METROS

TEMPO(MIN)	VELOCIDADE(NOS)	DISTANCIA(METROS)
0,500	8,00	124,
0,854	7,20	207,
1,231	6,40	286,
1,632	5,60	360,
2,057	4,80	428,
2,505	4,00	489,
2,973	3,20	541,
3,459	2,40	583,
3,960	1,60	614,
4,471	0,80	633,
4,987	-0,00	639,



\*\*\*\*\*  
 DISTANCIA PERCORRIDA PARA PARADA TOTAL DA EMBARCACAO  
 A PARTIR DA VELOCIDADE DE OPERACAO  
 \*\*\*\*\*

DESLOCAMENTO.....	30000,0 TON
COMPRIMENTO.....	277,3 METROS
POTENCIA DE CADA MOTOR.....	3000,00 HP
VELOCIDADE DE OPERACAO.....	8,00 NOS
RESISTENCIA DA EMBARCACAO NA VELOCIDADE DE OPERACAO..	23,927 TON
NUMERO DE HELICES.....	2
EMPUXO DO(S) HELICE(S) OPERANDO A RE.....	38,666 TON
TEMPO DE REVERSAO DO(S) MOTOR(ES).....	30, SEG
DISTANCIA PERCORRIDA ATE PARAR(P/METODO SIMPLIFICADO)	796, METROS

TEMPO(MIN)	VELOCIDADE(NOS)	DISTANCIA(METROS)
0,500	8,00	124,
0,901	7,20	218,
1,333	6,40	308,
1,797	5,60	394,
2,292	4,80	474,
2,818	4,00	545,
3,373	3,20	607,
3,954	2,40	657,
4,556	1,60	694,
5,172	0,80	717,
5,795	-0,00	725,

ANEXO IV

LISTAGEM E RESULTADOS DO PROGRAMA DE COM  
PUTADOR UTILIZADO PARA OTIMIZAÇÃO DAS CA  
RACTERÍSTICAS DO COMBOIO

IPT - DINAV

```

001 C *****
002 C OTIMIZACAO DE COMBOIO INTEGRADO DE CHATAS - JOSE ANTONIO CRISTOVAO
003 C BALAU-MESTRADO - EPUSP
004 C *****
005 C
006 C PROGRAMA PRINCIPAL
007 C
008 C *** DEFINICAO DE PARAMETROS ***
009 C N - NUMERO DE VARIAVELIS INDEPENDENTES
010 C NR - NUMERO DE RESTRIC0ES
011 C EPS - PRECISAO DESEJADA (FRACAO DO INTERVALO)
012 C D - PASSO (FRACAO DO INTERVALO)
013 C S - S=-1 PARA MAXIMIZAR S= 1 PARA MINIMIZAR
014 C R - CONSTANTE MULTIPLICADORA DAS RESTRIC0ES (H(X)=F(X)+R*P(X))
015 C M - CALADO MAXIMO
016 C DIST - DISTANCIA ENTRE PORTOS
017 C KV - FATOR DE REDUCAO DA VELOCIDADE
018 C TXEB - TAXA DE MOVIMENTACAO DE CARGA NO TERMINAL DE EMBARQUE (T/
019 C TXDC - TAXA DE MOVIMENTACAO DE CARGA NO TERMINAL DE DESEMBARQUE
020 C QEE - CARGA EMBARCADA EM NAVIOS NAO PERTENCENTES AO SISTEMA
021 C QED - CARGA DESEMBARCADA EM NAVIOS NAO PERTENCENTES AO SISTEMA
022 C DELTAT - TEMPO MINIMO DO EMPURRADOR NO PORTO (SUPRIMENTOS)
023 C QEZAO - DEMANDA ANUAL
024 C CLMAX - COMPRIMENTO MAXIMO DO COMBOIO PERMITIDO PELA HIDROVIA
025 C CHMAX - BOCA MAXIMA DO COMBOIO PERMITIDA PELA HIDROVIA
026 C COINT - CUSTO DO OLEO INTERMEDIARIO (CR$/KG)
027 C CODIE$ - CUSTO DO OLEO DIESEL (CR$/KG)
028 C CSTL - CUSTO ANUAL COM SALARIOS E ENCARGOS DE UMA TRIPULACAO
029 C CATI - CUSTO ANUAL COM ALIMENTACAO DE UMA TRIPULACAO
030 C LBL - NUMERO DE SISTEMAS A SEREM ANALISADO
031 C COMMENT - COMENTARIO SOBRE O SISTEMA EM ANALISE
032 C *** DEFINICAO DAS VARIAVELIS ***
033 C X(1) - VELOCIDADE (NOS)
034 C X(2) - COMPRIMENTO DA CHATA (M)
035 C X(3) - BOCA DA CHATA (M)
036 C X(4) - NUMERO DE CHATAS NO SENTIDO LONGITUDINAL DO COMBOIO
037 C X(5) - NUMERO DE CHATAS NO SENTIDO TRANSVERSAL DO COMBOIO
038 C X(6) - NUMERO DE COMBOIOS DA FROTA
039 C X(7) - CALADO (M)
040 C *** PARA FAZER USO DO PROGRAMA MUDAR FUNCAO A MAXIMIZAR OU MINIMI
041 C NO FUNCTION FUNC E MUDAR RESTRIC0ES NO FUNCTION G, AS FUNCOES
042 C E FUNC(W) DEVEM UTILIZAR O VETOR W COMO VARIAVEL INDEPENDENTE
043 C REAL KV, IHP
044 C DIMENSION FA(20), GA(9,20)
045 C COMMON NPAS, N, AMV(9), XMX(9), XSTRT(9), DI(9), EPS, TA(9), TB(9), X(9), D,
046 C IW(9), F, R, S, NR
047 C COMMON/AJUDA/M, DIST, KV, TXEB, TXDC, QEE, QED, COINT, CODIE$, QTOTAL,
048 C * TEPFRE, TENAVE, TEPRT, REHPES, DESLOC, DL, IHP, DELTAT
049 C COMMON/CUSTOS/LI, CC, CST, CAT, CS, CR, CA, CSTI, CATI
050 C COMMON / BAUXI / QEZAO, CLMAX, CHMAX
051 C READ(5,1) LHL
052 C DO 317 KKK = 1, LHL
053 C READ(5,9) COMMENT
054 C READ(5,1) N, NR, EPS, D, S, R
055 C READ(5,2) (XMX(I), I=1, N), (XSTRT(I), I=1, N)
056 C READ(5,2) M, DIST, KV, TXEB, TXDC, QEE, QED, COINT, CODIE$, DELTAT, CSTI, CATI
057 C READ(5,2) QEZAO, CLMAX, CHMAX
058 C NPAS1 = 0
059 C
060 C INICIO DO PROCESSO DE BUSCA - METODO DE HOOKE-JEEVES ASSOCIADO A F

```

## IPT - DINAV

```

001 C *****
002 C OTIMIZACAO DE COMBOIO INTEGRADO DE CHATAS - JOSE ANTONIO CRISTOVAO
003 C MESTRADO - FFIUSP
004 C *****
005 C
006 C PROGRAMA PRINCIPAL
007 C
008 C *** DEFINICAO DE PARAMETROS ***
009 C N - NUMERO DE VARIAVEIS INDEPENDENTES
010 C NR - NUMERO DE RESTRICOES
011 C EPS - PRECISAO DESEJADA (FRACAO DO INTERVALO)
012 C D - PASSO (FRACAO DO INTERVALO)
013 C S - S=1 PARA MAXIMIZAR S= -1 PARA MINIMIZAR
014 C R - CONSTANTE MULTIPLICADORA DAS RESTRICOES (H(X)=F(X)+R*P(X))
015 C H - CALADO MAXIMO
016 C DIST - DISTANCIA ENTRE PORTOS
017 C KV - FATOR DE REDUCAO DA VELOCIDADE
018 C TXEB - TAXA DE MOVIMENTACAO DE CARGA NO TERMINAL DE EMBARQUE (T/
019 C TXDC - TAXA DE MOVIMENTACAO DE CARGA NO TERMINAL DE DESEMBARQUE
020 C QEE - CARGA EMBARCADA EM NAVIOS NAO PERTENCENTES AO SISTEMA
021 C QED - CARGA DESEMBARCADA EM NAVIOS NAO PERTENCENTES AO SISTEMA
022 C DELTAT - TEMPO MINIMO DO EMPURRADOR NO PORTO (SUPRIMENTOS)
023 C QEZAO - DEMANDA ANUAL
024 C CLMAX - COMPRIMENTO MAXIMO DO COMBOIO PERMITIDO PELA HIDROVIA
025 C CRMAX - BOCA MAXIMA DO COMBOIO PERMITIDA PELA HIDROVIA
026 C COINT - CUSTO DO OLEO INTERMEDIARIO (CRS/KG)
027 C CODIES - CUSTO DO OLEO DIESEL (CRS/KG)
028 C CSTL - CUSTO ANUAL COM SALARIOS E ENCARGOS DE UMA TRIPULACAO
029 C CATI - CUSTO ANUAL COM ALIMENTACAO DE UMA TRIPULACAO
030 C LHL - NUMERO DE SISTEMAS A SEREM ANALISADO
031 C COMMENT - COMENTARIO SOBRE O SISTEMA EM ANALISE
032 C *** DEFINICAO DAS VARIAVEIS ***
033 C X(1) - VELOCIDADE (NOS)
034 C X(2) - COMPRIMENTO DA CHATA (M)
035 C X(3) - BOCA DA CHATA (M)
036 C X(4) - NUMERO DE CHATAS NO SENTIDO LONGITUDINAL DO COMBOIO
037 C X(5) - NUMERO DE CHATAS NO SENTIDO TRANSVERSAL DO COMBOIO
038 C X(6) - NUMERO DE COMBOIOS DA FROTA
039 C X(7) - CALADO (M)
040 C *** PARA FAZER USO DO PROGRAMA MUDAR FUNCAO A MAXIMIZAR OU MINIMI
041 C NO FUNCTION FUNC E MUDAR RESTRICOES NO FUNCTION G, AS FUNCOES
042 C E FUNC(W) DEVEM UTILIZAR O VETOR W COMO VARIAVEL INDEPENDENTE
043 C
044 C REAL KV,IMP
045 C DIMENSION FA(20),GA(9,20)
046 C COMMON NPAS,N,AMN(9),XMX(9),XSTRT(9),DI(9),EPS,TA(9),TB(9),X(9),D,
047 C IW(9),F,R,S,NR
048 C COMMON/AJUDA,H,DIST,KV,TXEB,TXDC,QEE,QED,COINT,CODIES,DTOTAL,
049 C TEPFRE,TEHAVE,TEPORT,HEMPES,DESLOC,DL,IMP,DELTAT
050 C COMMON/CUSTOS/LI,CC,CST,CAT,CS,CR,CA,CSTI,CATI
051 C COMMON / BAUXI / QEZAO,CLMAX,CRMAX
052 C READ(5,1) LHL
053 C DO 517 KKK = 1,LHL
054 C READ(5,9)COMMENT
055 C READ(5,1) N,NR,EPS,D,S,R
056 C READ(5,2) (XMN(I),I=1,N),(XMX(I),I=1,N),(XSTRT(I),I=1,N)
057 C READ(5,2)H,DIST,KV,TXEB,TXDC,QEE,QED,COINT,CODIES,DELTAT,CSTI,CATI
058 C READ(5,2)QEZAO,CLMAX,CRMAX
059 C NPAS1 = 0
060 C INICIO DO PROCESSO DE BUSCA - METODO DE MOORE-JEEVES ASSOCIADO A F

```

## IPT - DINAV

```

061 C PFNALIDADE
062 C
063 4 CALL HOOKE
064 NPAS1 = NPAS1 + NPAS
065 FR=FUNC(X)
066 IF(NR)10,10,11
067 C
068 C VERIFICACAO DAS RESTRICOES
069 C
070 11 DO 3 I=1,NR
071 GXIS = G(I,W)
072 IF(GXIS.LE,-EPS) GO TO 44
073 3 CONTINUE
074 GO TO 10
075 C
076 C RESTRICOES NAO ATENDIDAS
077 C
078 44 R=R+10,0
079 IF(R.GT,1,RE+57) GO TO 10
080 C
081 C INCREMENTO EM N = REINICIO DO PROCESSO DE BUSCA
082 C
083 DO 45 I=1,N
084 45 XSTRT(I)=X(I)
085 GO TO 4
086 10 CONTINUE
087 C
088 C TERMINO DO PROLESSO DE BUSCA E IMPRESSAO DA SOLUCAO OTIMA
089 C
090 WRITE(6,7) R,NPAS1,EPS,FR
091 DO 275 I = 1,N
092 275 WRITE(6,6) I,X(I)
093 WRITE(6,8) HEMPLE,IHP,M,DESLOC,TEPEBE,DIST,DTOTAL,TENAVE,TEPORT
094 CTOT = CI + CC + CST + CAT + CS + CR + CA
095 CIPOR = 100,0*CI/CTOT
096 CCPOR = 100,0*CC/CTOT
097 CSTPOR = 100,0*CST/CTOT
098 CATPOR = 100,0*CAT/CTOT
099 CSPOR = 100,0*CS/CTOT
100 CRPOR = 100,0*CR/CTOT
101 CAPOR = 100,0*CA/CTOT
102 CTOPOR = CIPOR + CCPOR + CSTPOR + CATPOR + CSPOR + CRPOR + CAPOR
103 WRITE(6,200)CI,CIPOR,CC,CCPOR,CST,CSTPOR,CAT,CATPOR,CS,CSPOR,
104 * CR,CRPOR,CA,CAPOR,CTOT,CTOPOR
105 317 CONTINUE
106 STOP
107 1 FORMAT(2I5,7F10,3)
108 2 FORMAT(AF10,3)
109 6 FORMAT(1X,/,/,31X,"X(",I1,") = ",E10,3)
110 7 FORMAT(1H1,1X,3(/),21X,3R(" "),/,21X,"METODO DE HOOKE-JEEVES COM P
111 ENALIDADES",/,21X,3R(" "),4(/),15X,"CONSTANTE MULTIPLICADORA DAS R
112 ESTRICOES = ",E8,1,/,/,29X,"NUMERO DE PASSOS = ",I7,/,/,30X,"PRECISA
113 30 = ",E10,3,3(/),18X,"VALOR EXTREMANTE DA FUNCAO = ",E13,5,/)
114 8 FORMAT(///,5X,
115 1" RHP .....",F7,0,/,/,5X,
116 1" IHP .....",F7,0,/,/,5X,
117 2" CALADO .....",F5,1," M",/,/,5X,
118 2" DESLOCAMENTO DO COMBOIO .....",F8,0,/,/,5X,
119 3" TPR DO COMBOIO .....",F8,0,/,/,5X,
120 4" DISTANCIA .....",F7,0," KM",/,/,5X,

```

## IPT - DINAV

```

121      5"          CAPACIDADE DE TRANSPORTE",//,5X,
122      6"          DO SISTEMA .....",E12.4," T",//
123      6,5X,
124      7"          TEMPO NAVEGANDO .....",F7.1," HRS",//,5X,
125      8"          TEMPO DE PORTO .....",F7.1," HRS")
126      9 FORMAT(A5)
127      200 FORMAT(1H1,5(/),2PX,24(" "),/,28X,"DISCRIMINACAO DOS CUSTOS",/,
128      A28X,24(" "),8(/),10X,
129      H"ITEM DE CUSTO          VALOR (CR$)   PORCENTAGEM",5(/),
130      C10X,
131      D"INVESTIMENTO          " ,E12.5,8X,F5.1,3(/),10X,
132      E"COMBUSTIVEL E LUBRIFICANTE " ,E12.5,8X,F5.1,3(/),10X,
133      F"SALARIOS E ENCARGOS SOCIAIS " ,E12.5,8X,F5.1,3(/),10X,
134      G"ALIMENTACAO           " ,E12.5,8X,F5.1,3(/),10X,
135      H"SEGURO                 " ,E12.5,8X,F5.1,3(/),10X,
136      I"REPAROS                " ,E12.5,8X,F5.1,3(/),10X,
137      J"ADMINISTRACAO         " ,E12.5,8X,F5.1,3(/),10X,
138      L"TOTAL                  " ,E12.5,8X,F5.1)
139      END

```



## IPT - DINAV

```

001      SUBROUTINE ORJT(FUNC1)
002      C
003      SUBROUTINE ORJT(FUNC1)
004      C
005      CALCULA FUNCAO COM PENALIDADES
006      C
007      COMMON NPAS,N,AMN(9),XMX(9),XSTRT(9),DI(9),EPS,TA(9),TR(9),X(9),D,
008      IW(9),F,R,S,NR
009      P=0.0
010      FUNC1=FUNC(W)*S
011      NPAS=NPAS+1
012      IF(NR)4,4,5
013      C
014      CALCULO DA FUNCAO RESPOSTA
015      C
016      5 DO 1 I=1,NR
017      GX=G(I,W)
018      IF(GX.GT.0.0) GO TO 1
019      P=P+GX**2
020      1. CONTINUE
021      FUNC1=FUNC1+R*P
022      4 RETURN
023      END

```

IPT - DINAV

```

001 SURROUTINE HOOKE
002 C
003 C CALCULA MINIMO DE UMA FUNCAO UNIMODAL DENTRO DA REGIAO LIMITADA PO
004 C INTERVALOS DE VARIACAO DAS VARIAVEIS INDEPENDENTES - METODO DE BUS
005 C DIRETA DE HOOKE E JEEVES
006 C
007 C CONFORME PROPOSTO POR ANTONIO GALVAO NOVAES - REF. 24
008 C
009 C INICIALIZACAO
010 C
011 COMMON NPAS,N,XMN(9),XMX(9),XSTRT(9),DI(9),EPS,TA(9),TB(9),X(9),D,
012 1W(9),F,R,S,NR
013 DO=0
014 NPAS=0
015 TED=20,0
016 DO 10 I=1,N
017 DI(I)=D*(XMX(I)-XMN(I))
018 X(I)=XSTRT(I)
019 10 W(I)=X(I)
020 CALL OBJT(DUM1)
021 IF(R,GT,1,0E+57) RETURN
022 C
023 C EXPLORATORY SEARCH
024 C
025 50 DO 100 I=1,N
026 RED=1,0
027 51 TA(I)=X(I)+DI(I)/RED
028 IF(TA(I)-XMX(I)) 53,53,52
029 52 RED=RED+2,0
030 IF(RED=1000,0) 51,51,45
031 45 TA(I)=XMX(I)
032 53 W(I)=TA(I)
033 CALL OBJT(DUM2)
034 IF(NPAS=950) 40,5000,5000
035 40 IF(DUM2=DUM1) 40,54,54
036 54 RED=1,0
037 55 TA(I)=X(I)-DI(I)/RED
038 IF(TA(I)-XMN(I)) 56,57,57
039 56 RED=RED+2,0
040 IF(RED=1000,0) 55,55,47
041 47 TA(I)=XMN(I)
042 57 W(I)=TA(I)
043 CALL OBJT(DUM2)
044 IF(R,GT,1,0E+57) RETURN
045 IF(DUM2=DUM1) 40,60,60
046 60 TA(I)=X(I)
047 W(I)=TA(I)
048 GO TO 100
049 90 DUM1=DUM2
050 100 CONTINUE
051 C
052 C TESTAR SE TA=X OU NAO
053 C
054 DO 200 I=1,N
055 IF(TA(I)-X(I)) 101,200,101
056 200 CONTINUE
057 IF(D=EPS) 5000,250,250
058 C
059 C REGULAR O PASSO
060 C

```

## IPT - DINAV

```

061      250 D=0/TEO
062      DO 260 I=1,N
063      DI(I)=D+(XMX(I)-XMN(I))
064      260 W(I)=X(I)
065      GO TO 50
066      C
067      C      PATTERN MOVE
068      C
069      101 DO 120 I=1,N
070      RED=1.0
071      102 TB(I)=X(I)+(1.0+1.0/RED)*(TA(I)-X(I))
072      IF (TB(I)-XMX(I)) 106,106,105
073      105 RED=RED*2.0
074      IF (RED=1000.0) 102,102,110
075      110 TB(I)=XMX(I)
076      GO TO 120
077      106 IF (TB(I)-XMN(I)) 111,120,120
078      111 RED=RED*2.0
079      IF (RED=1000.0) 112,112,113
080      112 TB(I)=X(I)+(1.0+1.0/RED)*(TA(I)-X(I))
081      GO TO 106
082      113 TB(I)=XMN(I)
083      120 CONTINUE
084      DO 130 I=1,N
085      130 W(I)=TB(I)
086      CALL OBJT(DUM2)
087      IF (R.GT.1.0E+57) RETURN
088      IF (DUM2=DUM1) 135,150,150
089      135 DO 140 I=1,N
090      X(I)=TB(I)
091      140 W(I)=X(I)
092      DUM1=DUM2
093      GO TO 50
094      150 DO 160 I=1,N
095      X(I)=TA(I)
096      160 W(I)=X(I)
097      GO TO 50
098      5000 D=D0
099      RETURN
100      END

```

## IPT - DINAV

```

001      FUNCTION G(I,W)
002      C
003      C      VERIFICACAO DAS RESTRICOES
004      C
005      C      G(I)=RESTRICOES SEMPRE MAIORES OU IGUAIS A ZERO (I=1,NR)
006      C
007      C      FUNC=FUNCAO A MAXIMIZAR OU MINIMIZAR
008      C
009      REAL KV,LC,NCL,NCT,IMP
010      DIMENSION W(1)
011      COMMON NPAS,N,AMN(9),XMX(9),XSTRT(9),DI(9),EPS,TA(9),TB(9),X(9),D,
012      IZ(9),F,R,S,NR
013      COMMON/AJUDA/H,DIST,KV,TXEB,TXDC,QFE,QED,COINT,CODIES,QTOTAL,
014      *      TEPEHE,TEHAVE,TEPORT,BEHPES,DESLOC,DL,IMP,DELTAT
015      COMMON / HAUXI / DEZAO,CLMAX,CBMAX
016      V = W(1)
017      LC = W(2)
018      BC = W(3)
019      NCL = W(4)
020      NCT = W(5)
021      GO TO (1,2,3,4,5,6,7,8,9),I
022      1 G = 1,0 - LC/(53,0*DL)
023      GO TO 10
024      2 G = 1,0 - BC/(6,0*H)
025      GO TO 10
026      3 G = LC/(4,0*BC) - 1,0
027      GO TO 10
028      4 G = 1,0 - BC*NCT/CBMAX
029      GO TO 10
030      5 G = 1,0 - LC*NCL/CLMAX
031      GO TO 10
032      6 G=1,0- BC/15,0
033      GO TO 10
034      7 G = 1,0 - LC/(7,0*BC)
035      GO TO 10
036      8 G = QTOTAL / DEZAO - 1,0
037      GO TO 10
038      C
039      C      TOLERANCIA PARA DEMANDA ANUAL
040      C
041      9 G = 1,03 * DEZAO / QTOTAL - 1,0
042      10 RETURN
043      END

```

## IPT - DINAV

```

001      FUNCTION BHP(W)
002      C
003      C      CALCULO DE BHP E IHP DO COMBOIO INTEGRADO
004      C
005      REAL LC,NCL,NCT,K,KV,L,IHP,K1,K2,NE,NL
006      DIMENSION W(1)
007      COMMON/AJUDA/H,DIST,KV,TFH,TXDC,DEE,DED,COINT,CODIES,RTOTAL,
008      *      TEPEHE,TI,NAVE,TEPORT,HFHPES,DESLOC,DL,IHP,DELTAT
009      COMMON/CUSTOS/LI,CC,CST,CAT,CS,CR,CA,CST1,CAT1
010      COMMON / BAUXI / DEZAO,CLMAX,CBMAX
011      C
012      C      DEFINICAO DE VARIAVEIS
013      C
014      V = W(1)
015      LC = W(2)
016      BC = W(3)
017      NCL = W(4)
018      NCT = W(5)
019      B = NCT*RC
020      L = NCL*LC
021      C
022      C      FATOR DE CORRECAO K DEVIDO A DESCONTINUIDADES
023      C
024      DESLUM=NCT*RC*M*(2,0*LC-0,55*H)
025      K = 9,360E-05*V**(2,901)*DESLUM**(0,6312)*(B/H)**0,3378*
026      *(2,0*LC/H)**(0,2555)
027      IF(NCL,LE,1,0)*K=0,0
028      C
029      C      EMP
030      C
031      EMP1 = 1,872E-05 *V**2,901*DESLOC**0,6312*(B/H)**0,3378*(L/B)**(-0
032      *,0555)
033      EMP = 1,30*(EMP1 + (NCL=1,0)*K)
034      C
035      C      RHP
036      C
037      RHP = 2,5*EMP
038      C
039      C      CALCULO DO IHP
040      C
041      C      CRITERIO DE PARADA BRUSCA
042      C
043      IHP = (1,024*CLMAX)**(-2,392)*V**3,755*DESLOC**1,375
044      C
045      C      VELOCIDADE DE REGIME
046      C
047      TESTE = 1,47*RHP
048      C
049      C      ESCOLHA DO MAIOR VALOR
050      C
051      IF(IHP,LT,TESTE)IHP=TESTE
052      RETURN
053      END

```

IPT - DINAV

```
001      FUNCTION TPORT(W)
002      C
003      C      CALCULA TEMPO NO PORTO (HORAS)
004      C
005      REAL KV,NE,IMP
006      DIMENSION W(1)
007      COMMON/AJUDA/H,DIST,KV,TEXB,TXDC,QEE,QED,COINT,CODIES,RTOTAL,
008      *      TLPEBF,TENAVE,TEPORT,BEHPES,DESLOC,DL,IMP,DELTAT
009      NE = W(6)
010      A = 7920,0*NE*TEPERE
011      B = TENAVE
012      TPORT = A/RTOTAL * B
013      RETURN
014      END
```



## IPT - DINAV

```

001      FUNCTION QSIST(W)
002      C
003      C      USO DO METODO DE NEWTON-RAPHSON PARA CALCULO DA CAPACIDADE DE CARG
004      C      SISTEMA (QSIST)
005      C
006      C      CALCULO DA RAIZ DO POLINOMIO  $(Q**3) + A*(Q**2) + B*Q + C = 0$ 
007      C
008      REAL I,J,L,KV,I-E,IHP
009      DIMENSION W(1)
010      COMMON/AJUDA/P,DIST,KV,TXEB,TXDC,WEB,QED,COINT,CODIES,QTOTAL,
011      *      TEPEBE,TENAVE,TEPORT,HEHPES,DESLOC,DL,IHP,DELTAT
012      NE = W(6)
013      A = 7920.0*NE*TEPEBE
014      B = TENAVE
015      C = TEPEBE/TXEB
016      D = TEPEBE/TXDC
017      E = 1.25*TEPEBE
018      F = QEE
019      GG = 17520.0*TXEB*TXEB
020      H = TXEB+TXER
021      I = QED
022      J = 17520.0*TXDC*TXDC
023      L = TXDC*TXDC
024      AZAO = E*(L+H) - H*L*(C+D+B)
025      HEZAO = A*H*L + (C+D+B)*(GG*L+H*(J-L*F-L*I)) - E*(J+GG-(I+F)*(L+H))
026      CEZAO = -(A*(GG*L+H*(J-L*F-L*I)) + (C+D+B)*(J-L*I)*(GG-H*F) +
027      *      E*(F*(J-L*I-I*H)+I*GG))
028      DEZAO = A*(J-L*I)*(GG-H*F)
029      A = HEZAO/AZAO
030      B = CEZAO/AZAO
031      C = DEZAO/AZAO
032      C
033      C      INICIALIZADOR DO PROCESSO
034      C
035      QUM = NE*TEPEBE*7920.0/(TENAVE + 50.0)
036      CAP=1.0
037      10 Q = QUM
038      Y=(D*(D*(Q+A)+H)+C)
039      QUM=Q-Y/(D*(3.0*Q+A)+B)
040      IF(QUM.GE.0.0) GO TO 20
041      CAP=CAP+1.0
042      IF(CAP.GT.50.)STOP
043      IF(Y) 30,30,40
044      40 QUM = CAP*NE*TEPEBE*7920.0/(TENAVE + 50.0)
045      GO TO 10
046      30 QUM = NE*TEPEBE*7920.0/(CAP*(TENAVE + 50.0))
047      GO TO 10
048      20 Z = ABS(QUM-Q)/Q
049      IF(Z.GT.0.001) GO TO 10
050      QSIST = QUM
051      GO TO 50
052      60 QSIST = NE * TEPEBE * 7920.0 / (TENAVE + 6.0)
053      50 RETURN
054      END

```

IPT - DINAV

```
001      FUNCTION TNAVE(W)
002      C
003      C      CALCULA O TEMPO NAVEGANDO (HORAS)
004      C
005      REAL KV,IHP
006      DIMENSION W(1)
007      COMMON/AJUDA/H,DIST,KV,TFB,TXDC,HEE,RED,COINT,CODIES,OTOTAL,
008      •      TEPEHE,TENAVE,TEPORT,BEHPES,DESLOC,DL,IHP,DELTAT
009      V = W(1)
010      TNAVE = 1.08*DIST/(KV*V)
011      RETURN
012      END
```

IPT - DINAV

```

001      FUNCTION TPB(W)
002      REAL KV,NCT,NCL,LC,IMP
003      DIMENSION W(1)
004      COMMON/AJUDA/H,DIST,KV,TEXH,TXDC,QEE,QED,COINT,COOIES,OTOTAL,
005      *          TEPERE,TFNAVE,TEPORT,HEMPES,DESLOC,DL,IMP,DELTAT
006      C
007      C      CALCULA TPB DO COMBOIO
008      C
009      LC = W(2)
010      BC = W(3)
011      NCL = W(4)
012      NCT = W(5)
013      TPB = NCT*( BC*NCL+LC*H = 4,55*H+H*BC =
014      1          0,2176*(NCL - 2,0)*(LC+BC+DL)**0,8931 -
015      2          0,1765*(LC+BC+DL)**0,9801 )
016      RETURN
017      END

```

## IPT - DINAV

```

001      FUNCTION FUNC(*)
002      REAL LC,NCL,NCT,NE,KV,IHP
003      DIMENSION W(1)
004      COMMON/AJUDA/H,DIST,KV,TXER,TXDC,WFE,DEF,COINT,CODIES,QTOTAL,
005      *   TEPERE,TENAVE,TEPORT,BEHPES,DESLOC,DL,IHP,DELTAT
006      COMMON/CUSTOS/CI,CC,CST,CAT,CS,CR,CA,CST1,CAT1
007      C
008      C
009      C
010      V = W(1)
011      LC = W(2)
012      BC = W(3)
013      NCL = W(4)
014      NCT = W(5)
015      NE = W(6)
016      DL = H = 0,05 + 0,018*LC
017      C
018      C
019      C
020      DESLOC=NCT*H*BC*(NCL*LC-4,55*H)
021      BEHPES = BHP(W)
022      TENAVE = TNAVE(W)
023      TEPERE = TPB(W)
024      QTOTAL = QSIST(W)
025      TEPORT = TPORT(W) + DELTAT
026      C
027      C
028      C
029      CE = 16513,33*IHP + 24,77E+06
030      C
031      C
032      C
033      CCH = 2907,44*(LC*BC*DL)**0,9801*NCL*NCT
034      C
035      C
036      C
037      CI = 0,1165 * NE * ( CE + CCH )
038      C
039      C
040      C
041      TNA = 7920,0*TENAVE*NE/(TENAVE + TEPORT)
042      TPA = TEPORT*TNA/TENAVE
043      CC = BEHPES*(TNA      *(0,178*COINT + 0,016*CODIES) +
044      *   0,006*TPA      *CODIES)
045      C
046      C
047      C
048      C
049      C
050      C
051      C
052      CAT = CAT1*NE
053      C
054      C
055      C
056      CS = 0,172*CI
057      C
058      C
059      C
060      CR = NE * ( 0,12 * CCH + 0,04 * CE )

```

## IPT - DINAV

```
061 C
062 C CUSTO DE ADMINISTRACAO (CR$/ANO)
063 C
064 C CA = 0,5*CSY
065 C
066 C CUSTO UNITARIO(CR$/TON/KM)
067 C
068 C FUNC = (CI + CC + CST + CAT + CS + CR + CA)/(DTST*QTOTAL)
069 20 RETURN
070 END
```

. solução ótima para a rota do Ituquara



\*\*\*\*\*  
 METODO DE HOOKE-JEEVES COM PENALIDADES  
 \*\*\*\*\*

CONSTANTE MULTIPLICADORA DAS RESTRICOES = 0,1E+02

NUMERO DE PASSOS = 356

PRECISAO = 0,100E-01

VALOR EXTREMANTE DA FUNCAO = 0,56476E-01

X(1) = 0,496E+01

X(2) = 0,768E+02

X(3) = 0,108E+02

X(4) = 0,195E+01

X(5) = 0,231E+01

X(6) = 0,474E+01

BHP .....	489.
IMP .....	2062.
CALADO .....	7.0 M
DESLOCAMENTO DO COMBOIO .	20683.
TPR DO COMBOIO .....	18378.
DISTANCIA .....	1102, KM
CAPACIDADE DE TRANSPORTE	
DO SISTEMA .....	0,2207E+07 T
TEMPO NAVEGANDO .....	275,9 HRS
TEMPO DE PORTO .....	45.1 HRS

. solução ótima para a rota do Boiuçú

\*\*\*\*\*  
 METODO DE FORKE-JEEVES COM PENALIDADES  
 \*\*\*\*\*

CONSTANTE MULTIPLICADORA DAS RESTRICOES =  $0.1E+02$

NUMERO DE PASSOS = 764

PRECISAO =  $0.100E-01$

VALOR EXTREMANTE DA FUNCAO =  $0.42367E-01$

X(1) =  $0.552E+01$

X(2) =  $0.727E+02$

X(3) =  $0.149E+02$

X(4) =  $0.344E+01$

X(5) =  $0.201E+01$

X(6) =  $0.268E+01$

BHP .....	1109.
IHP .....	1810.
CALADO .....	5.0 M
DESLOCAMENTO DO COMBOIO .	34126.
TPR DO COMBOIO .....	30436.
DISTANCIA .....	1028. KM
CAPACIDADE DE TRANSPORTE	
DO SISTEMA .....	$0.2219E+07$ T
TEMPO NAVEGANDO .....	231.2 HRS
TEMPO DE PONTO .....	67.4 HRS

- . comboios com formação 4 x 2 e 3 x 2 rota Boiuçũ (impo\_ sição de NCL, NCT e NE como variáveis inteiras)

\*\*\*\*\*  
 METODO DE HOCHE-JEEVES COM PENALIDADES  
 \*\*\*\*\*

CONSTANTE MULTIPLICADORA DAS RESTRICOES = .1E+02

NUMERO DE PASSOS = 636

PRECISAO = .100E-01

VALOR EXTREMANTE DA FUNCAO = .42086E-01

X(1) = .552E+01

X(2) = .627E+02

X(3) = .134E+02

X(4) = .400E+01

X(5) = .200E+01

X(6) = .300E+01

BHP .....	997.
IHP .....	1547.
CALADO .....	5.0 M
DESLUCAMENTO DO COMBOIO .	50532.
TPE DO COMBOIO .....	27229.
DISTANCIA .....	1028. KM
CAPACIDADE DE TRANSPORTE	
DO SISTEMA .....	.2259E+07 T
TEMPO NAVEGANDO .....	231.2 HRS
TEMPO DE PCFTO .....	61.2 HRS

\*\*\*\*\*  
 METODO DE HOOKE-JEEVES COM PENALIDADES  
 \*\*\*\*\*

CONSTANTE MULTIPLICADORA DAS RESTRICOES = .1E+02

NUMERO DE PASSOS = 1871

PRECISAO = .100E-02

VALOR EXTREMANTE DA FUNCAO = .43289E-01

X(1) = .534E+01

X(2) = .830E+02

X(3) = .140E+02

X(4) = .300E+01

X(5) = .200E+01

X(6) = .300E+01

BHP .....	930.
IHP .....	1462.
CALADO .....	5.0 M
DESLUCAMENTO DO COMBOIO .	31675.
TPB DO COMBOIO .....	28206.
DISTANCIA .....	1028. KM
CAPACIDADE DE TRANSPORTE	
DO SISTEMA .....	.2264E+07 T
TEMPO NAVEGANDO .....	238.6 HRS
TEMPO DE PORTO .....	63.2 HRS



- . desmembramento do comboio nos portos (rota Boiuçū)
  - a) 1 comboio de espera em Vila do Conde
  - b) 1 comboio de espera em cada porto

\*\*\*\*\*  
 METODO DE HOCHE-JEEVES COM PENALIDADES  
 \*\*\*\*\*

CONSTANTE MULTIPLICADORA DAS RESTRICOES = .1E+02

NUMERO DE PASSOS = 2009

PRECISAO = .100E-01

VALOR EXTREMANTE DA FUNCAO = .49245E-01

X(1) = .676E+01

X(2) = .577E+02

X(3) = .144E+02

X(4) = .435E+01

X(5) = .190E+01

X(6) = .200E+01

BHP .....	1844.
IHP .....	3402.
CALADO .....	5.0 M
DESLUCAMENTO DO COMBOIO .	31224.
TPE DO COMBOIO .....	27869.
DISTANCIA .....	1028. KM
CAPACIDADE DE TRANSPORTE	
DO SISTEMA .....	.2266E+07 T
TEMPO NAVEGANDO .....	188.0 HRS
TEMPO DE PORTE .....	12.0 HRS

. Hidrovia do Caxuanã com profundidade de 5,00 m.

\*\*\*\*\*  
 METODO DE MOORE-JEEVES COM PENALIDADES  
 \*\*\*\*\*

CONSTANTE MULTIPLICADORA DAS RESTRICOES = 0.1E+02

NUMERO DE PASSOS = 257

PRECISAO = 0.100E-01

VALOR EXAT DA FUNCAO = 0.75874E-01

X(1) = 0.560E+01

X(2) = 0.698E+02

X(3) = 0.115E+02

X(4) = 0.355E+01

X(5) = 0.197E+01

X(6) = 0.364E+01

EMP .....	822.
IMP .....	1288.
QUALIDADE .....	4.0 M
REABOQUEMENTO DO COMBUSTIVEL .....	20856.
TEMP. DO COMBUSTIVEL .....	18052.
DISTANCIA .....	988. KM
VELOCIDADE DE TRANSPORTE	
COMBUSTIVEL .....	0.2273E+07 T
TEMPO AVESANDO .....	196.8 HRS
TEMPO DE PORTO .....	37.5 HRS

\*\*\*\*\*  
 METODO DE COEFICIENTES COM PENALIDADES  
 \*\*\*\*\*

CONSTANTE MULTIPLICADORA DAS RESTRICOES =  $0.1E+02$

NUMERO DE PASSOS = 426

PRECISAO =  $1.10E-01$

VALOR EXTREMANTE DA FUNCAO =  $1.61377E-01$

$X(1) = 0.588E+01$

$X(2) = 0.605E+02$

$X(3) = 0.123E+02$

$X(4) = 0.412E+01$

$X(5) = 0.185E+01$

$X(6) = 0.346E+01$

NUM	961.
TEM	1412.
VALAD	4.8
DESLOCAMENTO DO COMBUST	21042.
TEM DO COMBUST	18672.
DISTANCIA	888, KM
QUANTIDADE DE TRANSPORTE	
DE COMBUST	$1.2270E+07$ T
TEMPO DE COMBUST	187,5 HRS
TEMPO DE PORTO	37,9 HRS

. Restrição adicional  $\frac{\nabla}{IHP} = 10.0$



\*\*\*\*\*  
 METODO DE HOOKE-JEEVES COM PENALIDADES  
 \*\*\*\*\*

CONSTANTE MULTIPLICADORA DAS RESTRICOES =  $0,1E+02$

NUMERO DE PASSOS = 264

PRECISAO =  $0,100E-01$

VALOR EXTREMANTE DA FUNCAO =  $0,43804E-01$

X(1) =  $0,656E+01$

X(2) =  $0,693E+02$

X(3) =  $0,136E+02$

X(4) =  $0,360E+01$

X(5) =  $0,207E+01$

X(6) =  $0,247E+01$

RRF .....	1719.
IRF .....	3197.
CALADO .....	5,0 M
RELOCAMENTO DO COMBUIO ,	31966.
TRE DO COMBUIO .....	28499.
DISTANCIA .....	1028, KM
CAPACIDADE DE TRANSPORTE	
NO SISTEMA .....	$0,2212E+07$ T
TEMPO AVERANDE .....	104,5 HRS
TEMPO DE EST-TO .....	63,5 HRS