

ANDRÉ LUIZ TONSO FABIANI

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DAS ONDAS GERADAS  
PELA RUPTURA DE BARRAGENS.

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica promovido pelo Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, como cumprimento parcial dos requisitos para obtenção do título de Mestre, sob orientação do professor Marcos José Tozzi.

CURITIBA

1995

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DAS ONDAS PROVOCADAS  
PELA RUPTURA DE BARRAGENS.

por

**ANDRÉ LUIZ TONSO FABIANI**

Dissertação aprovada como cumprimento parcial dos requisitos para obtenção do título de Mestre no Curso de Pós- Graduação em Engenharia Hidráulica, do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela comissão formada pelos professores

ORIENTADOR:

Prof. Marcos José Tozzi  
Setor de Tecnologia, UFPR

MEMBROS:

Prof. Flávio César Borba Mascarenhas  
Escola de Engenharia UFRJ, COPPE/UFRJ

Prof. Nelson Luís da Costa Dias  
Setor de Tecnologia, UFPR

CURITIBA, 08 DE DEZEMBRO DE 1995.

Que os nossos esforços  
desafiem as  
impossibilidades. Lembrai-  
vos de que as grandes  
proezas da história foram  
conquistas do que parecia  
impossível.

**Charles Chaplin**

Dedico este trabalho  
à minha esposa **Eliana** e  
à minha filha **Camila**

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao CEHPAR- CENTRO DE HIDRÁULICA E HIDROLOGIA PROFESSOR PARIGOT DE SOUZA, à COPEL- COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA e à UFPR- UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ pela oportunidade de realizar o curso de mestrado que culmina com este trabalho.

Devo agradecer a todos os funcionários do CEHPAR, por permitirem a minha ausência, assumindo alguns dos trabalhos que originalmente seriam a mim destinados e, também, por auxílios na parte computacional, de edição do texto e na elaboração das figuras.

Quero agradecer, também, aos professores do CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA HIDRÁULICA, pelos ensinamentos transmitidos durante o curso e, em especial, aos professores Marcos José Tozzi e Eloy Kaviski (respectivamente, orientador e co-orientador deste trabalho), e ao professor Nelson Dias, por algumas informações muito valiosas; aos alunos-colegas, quero agradecer pelo incentivo recebido ao longo de toda a elaboração deste trabalho.

Por último, mas não menos importante, gostaria de agradecer a todos os meus familiares (esposa, filha, pais, sogros, irmã, cunhados e sobrinhas) e amigos, que souberam compreender a importância deste trabalho para mim.

## SUMÁRIO

|                                                                                                        |               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>ELEMENTOS PRÉ-TEXTUAIS .....</b>                                                                    | <b>i</b>      |
| Termo de Aprovação .....                                                                               | ii            |
| Epígrafe .....                                                                                         | iii           |
| Dedicatória .....                                                                                      | iv            |
| Agradecimentos .....                                                                                   | v             |
| Sumário .....                                                                                          | vi            |
| Lista de Símbolos .....                                                                                | ix            |
| Lista de Figuras .....                                                                                 | xi            |
| Lista de Tabelas .....                                                                                 | xv            |
| Resumo .....                                                                                           | xvi           |
| <br><b>Capítulo 1 INTRODUÇÃO .....</b>                                                                 | <br><b>1</b>  |
| <br><b>Capítulo 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                                                      | <br><b>5</b>  |
| <br><b>Capítulo 3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E ABORDAGENS EXISTENTES</b>                                    | <br><b>10</b> |
| 3.1 Generalidades .....                                                                                | 10            |
| 3.2 Número de Barragens Existentes e Rupturas Ocorridas                                                | 12            |
| 3.3 Introdução ao Escoamento não Permanente em Canais e<br>aos Métodos Computacionais Associados ..... | 30            |
| 3.4 Escoamento não Permanente em Canais .....                                                          | 31            |

|                   |                                                                                                         |           |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.4.1             | Modelos Numéricos Utilizando o Método das Características .....                                         | 36        |
| 3.4.2             | Modelos Numéricos Utilizando o Método das Diferenças Finitas .....                                      | 40        |
| 3.4.3             | Modelos Numéricos Utilizando o Método dos Elementos Finitos .....                                       | 45        |
| 3.5               | Onda de Choque .....                                                                                    | 46        |
| 3.5.1             | Introdução .....                                                                                        | 46        |
| 3.5.2             | Modelos Analíticos .....                                                                                | 47        |
| 3.5.3             | Onda de Choque Provocada por Ruptura de Barragem - Método Numérico (Equações de Hugoniot-Rankine) ..... | 55        |
| <b>Capítulo 4</b> | <b>MODELO ADOTADO E PROGRAMA COMPUTACIONAL PROPOSTO .....</b>                                           | <b>60</b> |
| 4.1               | Programa Computacional ANALITIC .....                                                                   | 60        |
| 4.2               | Modelo Adotado para o Programa ROTRET .....                                                             | 61        |
| 4.3               | Programa Computacional Proposto .....                                                                   | 72        |
| <b>Capítulo 5</b> | <b>APLICAÇÕES .....</b>                                                                                 | <b>76</b> |
| 5.1               | Generalidades .....                                                                                     | 76        |
| 5.2               | Aplicação a um Exemplo Clássico (Apresentado por ON e LICH[1990] e por PASINATO e TUCCI[1992] .....     | 76        |
| 5.3               | Aplicação ao Exemplo do WES, proposto por CHEN[1980] e MASCARENHAS[1990] .....                          | 88        |

|                   |                                                                                |            |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.4               | Aplicação a uma Barragem FICTÍCIA.....                                         | 94         |
| 5.5               | Análise da Conservação da Massa.....                                           | 102        |
| <b>Capítulo 6</b> | <b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>                                        | <b>104</b> |
| 6.1               | Conclusões .....                                                               | 104        |
| 6.2               | Recomendações para Pesquisas Futuras .....                                     | 107        |
|                   | <b>BIBLIOGRAFIA .....</b>                                                      | <b>109</b> |
|                   | <b>ANEXO A - DISCRETIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES .....</b>                              | <b>118</b> |
| A.1               | Discretização das Equações de Saint-Venant .....                               | 119        |
| A.2               | Discretização das Equações de Hugoniot-Rankine .....                           | 125        |
| A.3               | Discretização do Primeiro Intervalo de Tempo .....                             | 131        |
| A.4               | Cálculo dos Pontos Intermediários .....                                        | 132        |
| A.5               | Método de Newton para Solução de Sistema de Equações<br>não-Lineares .....     | 135        |
|                   | <b>ANEXO B - LISTAGENS DOS PROGRAMAS, DOS DADOS<br/>E DOS RESULTADOS .....</b> | <b>137</b> |
|                   | <b>ANEXO C - MANUAIS COMPACTOS DE CONSULTA AOS<br/>PROGRAMAS .....</b>         | <b>177</b> |
| C.1               | Programa ANALITIC .....                                                        | 178        |
| C.2               | Programa ROTRET .....                                                          | 184        |

## LISTA DE SÍMBOLOS

- A - área da seção transversal ( $m^2$ );
- $A_s$  - área da seção de armazenamento ( $m^2$ );
- $A_x^h$  - Variação da área com a abcissa, para uma profundidade constante, ou seja  $\left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)_h = \text{constante}$  ;
- B - largura da superfície livre de escoamento (m);
- $B_s$  - largura da superfície livre de armazenamento (m);
- c - celeridade da onda (m/s), calculada como sendo  $c = \sqrt{g \cdot h}$  ;
- $c_1$  - celeridade a montante da onda (m/s);
- f - representa uma função genérica (v, h, A, B, etc...) nos esquemas de diferenças finitas;
- g - aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );
- h - profundidade do escoamento (m), ou profundidade na seção distante  $\underline{x}$  metros da barragem (m);
- $\bar{h}$  - profundidade do centro de pressão em relação à superfície livre (m);
- $h(0,t)$  - profundidade na seção da barragem, ao longo do tempo (m);
- $h_1$  - profundidade a montante da barragem antes da ruptura (m);
- $h_3$  - profundidade do escoamento a montante da onda de choque gerada (m);
- $h_4$  - profundidade a jusante da barragem, antes da ruptura (m);
- n - coeficiente de rugosidade ( $m^{-1/3}.s$ );

- $q_L$  - contribuição lateral ( $m^3/s.m$ );
- $Q(0,t)$  - vazão na seção da barragem, ao longo do tempo ( $m^3/s$ );
- $R$  - número de Chézy adimensional, onde  $C$  é o coeficiente de Chézy convencional ( $m^{1/2}.s^{-1}$ ), e é calculado por:

$$R = \frac{g}{C^2}$$

- $R_h$  - raio hidráulico da seção (m);
- $S_0$  - declividade do fundo (m/m);
- $S_f$  - declividade da linha de energia (m/m);
- $t$  - tempo a partir do início da retirada do obstáculo, ou da ruptura da barragem (s);
- $T$  - tempo adimensional, definido pela equação:

$$T = t. \sqrt{g/h_1}$$

- $u$  - velocidade média (m/s);
- $v$  - velocidade média ou velocidade de deslocamento da frente de onda (m/s);
- $v_3$  - velocidade do escoamento a montante da onda de choque gerada (m/s);
- $w$  - velocidade de retirada do obstáculo, ou velocidade de deslocamento da onda de choque (m/s);
- $x$  - coordenada espacial ou distância a partir da posição inicial da barragem (m);
- $z$  - Cota da superfície livre da água (m).

## LISTA DE FIGURAS

|      |                                                                                              |    |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1  | Número de rupturas classificadas por altura e pelo material constituinte da barragem .....   | 18 |
| 3.2  | Número de barragens existentes e rupturas ocorridas .....                                    | 18 |
| 3.3  | Análise percentual das rupturas ocorridas .....                                              | 19 |
| 3.4  | Número de rupturas classificadas pela idade da barragem na ruptura .....                     | 19 |
| 3.5  | Dados estatísticos de rupturas .....                                                         | 25 |
| 3.6  | Representação das grandezas componentes das equações de Saint-Venant .....                   | 35 |
| 3.7  | Representação gráfica no plano x-t das linhas características .....                          | 39 |
| 3.8  | Malha de diferenças finitas .....                                                            | 40 |
| 3.9  | Pontos normalmente utilizados para o cálculo através das diferenças finitas explícitas ..... | 42 |
| 3.10 | Pontos normalmente utilizados para o cálculo através das diferenças finitas implícitas ..... | 44 |
| 3.11 | Definição dos parâmetros para aplicação do esquema de Preissmann generalizado .....          | 45 |
| 3.12 | Solução de Ritter para a remoção total de uma parede retangular .....                        | 49 |
| 3.13 | Geometria das seções transversais- método de Sakkas e Strelkoff .....                        | 50 |
| 3.15 | Perfil longitudinal para os tempos $t=0$ e $t>0$ - Método de Stoker .....                    | 54 |

|      |                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.16 | Localização da frente de onda e das linhas características associadas .....                                                                                                                                                                  | 57 |
| 4.1  | Representação do desenvolvimento do choque nos planos x-t e x-h, mostrando a onda de depleção ....                                                                                                                                           | 64 |
| 4.2  | Representação da onda de ruptura no plano real- x-h e no plano x-t .....                                                                                                                                                                     | 67 |
| 4.3  | Representação do desenvolvimento das ondas positiva e negativa no plano x-t e localização dos pontos intermediários .....                                                                                                                    | 69 |
| 4.4  | Inclinações das linhas características .....                                                                                                                                                                                                 | 70 |
| 4.5  | Localização do escoamento crítico .....                                                                                                                                                                                                      | 71 |
| 4.6  | Fluxograma do programa principal .....                                                                                                                                                                                                       | 73 |
| 4.7  | Fluxograma do procedimento de cálculo propriamente dito .....                                                                                                                                                                                | 74 |
| 5.1  | Aplicação 1 - caso 1 - Comparação dos resultados do programa ROTRET com os valores analíticos e com os resultados apresentados por ON e LICH[1990] .....                                                                                     | 82 |
| 5.2  | Aplicação 1 - caso 1 - Comparação dos resultados do programa ROTRET com os valores analíticos e com os resultados apresentados por PASINATO e TUCCI[1992].                                                                                   | 83 |
| 5.3  | Aplicação 1 - caso 2 - Comparação dos resultados do programa ROTRET com os valores analíticos e com os resultados apresentados por ON e LICH[1990], para o caso de rugosidade não nula ( $n = 0,012 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ ) ..... | 84 |

|     |                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.4 | Aplicação 1 - caso 3 - Comparação dos resultados do programa ROTRET com os valores analíticos, considerando velocidade inicial a montante não nula ( $v = 1,0 \text{ m/s}$ ) .....                                                 | 85 |
| 5.5 | Aplicação 1 - caso 4 - Comparação dos resultados do programa ROTRET para o estudo da variação da largura com a consideração de velocidade a montante constante ( $v = 0,5 \text{ m/s}$ ) .....                                     | 86 |
| 5.6 | Aplicação 1 - caso 5 - Comparação dos resultados do programa ROTRET para o estudo da variação da largura com a consideração de vazão constante ( $Q = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ ) .....                                             | 87 |
| 5.7 | Aplicação 2 - Comparação dos resultados obtidos com a aplicação do programa ROTRET com os resultados experimentais e com os valores numéricos obtidos por CHEN[1980] e por MASCARENHAS[1990] - cotagramas em quatro posições ..... | 92 |
| 5.8 | Aplicação 2 - Comparação dos resultados obtidos com a aplicação do programa ROTRET com os resultados experimentais e com os valores numéricos obtidos por CHEN[1980] e por MASCARENHAS[1990] - velogramas em três posições .....   | 93 |
| 5.9 | Aplicação 3 - Caso 1 - Comparação dos resultados obtidos com a aplicação do programa ROTRET com a variação da rugosidade dos contornos - perfis longitudinais para quatro instantes de tempo .....                                 | 98 |

|      |                                                                                                                                                                                                                    |     |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.10 | Aplicação 3 - Caso 1 - Níveis de água máximos e tempo para a chegada do choque (trecho inicial) ou de início de elevação do nível de água (trecho final) .....                                                     | 99  |
| 5.11 | Aplicação 3 - Caso 2 - Comparação dos resultados obtidos com a aplicação do programa ROTRET com a variação da declividade do fundo - perfis longitudinais para dois instantes de tempo para cada declividade ..... | 100 |
| 5.12 | Aplicação 3 - Caso 3 - Comparação dos perfis da superfície livre da água calculados pelo programa ROTRET com a variação do intervalo temporal, para dois instantes de tempo .....                                  | 101 |

## LISTA DE TABELAS

|     |                                                                                                                                               |    |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 | Número de barragens existentes, classificadas por altura .....                                                                                | 21 |
| 3.2 | Número de barragens construídas e rupturas ocorridas entre os anos de 1900 e 1969, classificadas pelo material constituinte da barragem ..... | 22 |
| 3.3 | Dados de rupturas de barragens brasileiras .....                                                                                              | 26 |
| 3.4 | Dados de rupturas de barragens estrangeiras - Concreto .....                                                                                  | 27 |
| 3.5 | Dados de rupturas de barragens estrangeiras - Terra.                                                                                          | 28 |
| 3.6 | Dados de rupturas de barragens estrangeiras - Terra e Enrocamento .....                                                                       | 29 |
| 4.1 | Descrição das unidades componentes do programa ROTRET .....                                                                                   | 75 |
| 5.1 | Dados fornecidos ao programa - Aplicação 1 .....                                                                                              | 78 |
| 5.2 | Dados fornecidos ao programa - Aplicação 2 .....                                                                                              | 89 |
| 5.3 | Dados fornecidos ao programa - Aplicação 3 .....                                                                                              | 96 |
| 5.4 | Dissipação do choque para diferentes rugosidades ...                                                                                          | 96 |
| 5.5 | Dissipação do choque para diferentes declividades ..                                                                                          | 97 |

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre os temas ruptura de barragem e escoamento não permanente em canais. Apresenta, também, dois programas de computador para cálculo da onda gerada pela ruptura de uma barragem: um para ruptura considerada ideal e outro para ruptura em canal retangular de largura, declividade longitudinal e rugosidade constantes ao longo do desenvolvimento do canal.

O modelo computacional proposto é aplicado a (e comparado com) dois casos constantes na literatura sobre ruptura de barragens e a um caso hipotético. Nesses exemplos de aplicação são avaliados, também, o efeito que alterações em diversas características do problema (rugosidade, velocidade inicial, largura do canal, entre outras) apresentam no resultado final da dissipação da onda.

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, fatos e atitudes relacionados com o meio ambiente têm recebido cada vez mais importância junto à opinião pública e a órgãos governamentais. Essa importância demonstra-se através de legislações mais rígidas para crimes contra o meio ambiente e, também, na busca de melhor conhecimento do meio ambiente e de soluções para os acidentes ambientais, sejam eles naturais ou causados pelo próprio homem. Um dos fenômenos muito estudados na área de engenharia hidráulica nos últimos trinta anos é conhecido como "Ruptura de Barragens". Dentro dessa área de estudo concentram-se não só as catástrofes, como o próprio nome sugere, mas também a rápida abertura de comportas em vertedouros de usinas hidrelétricas. Ambos os fatos geram uma onda abrupta no leito do rio (ou canal) a jusante, de grandes altura e velocidade de deslocamento.

A ruptura de uma barragem pode causar danos de grande monta, sejam esses econômicos ou sociais, com a possibilidade de perda de muitas vidas humanas. O prejuízo ao meio ambiente é geralmente muito grande, porém o interesse em quantificá-lo é recente, não se dispondo de dados qualitativos ou quantitativos da maioria das rupturas ocorridas (justificado em parte

pela atenção total dada ao salvamento das pessoas e dos bens a jusante da barragem durante e após a ruptura).

A ruptura de uma barragem ocorre, na maioria das vezes, em uma velocidade muito alta (ou seja, em escala de tempo reduzida), sendo por muitos autores assumida como instantânea, o que pode simplificar a abordagem matemática e, em geral, maximizar os efeitos danosos. No entanto, antes do seu rompimento, a barragem pode apresentar sinais de anormalidades (com desenvolvimento mais lento nas barragens de enrocamento e mais rápido, ou quase instantâneo, nas barragens em arco) o que dá à população ribeirinha tempo, normalmente pequeno, para deslocar-se para regiões seguras, se houver um eficiente trabalho de informação. O estudo da onda gerada pela ruptura de uma barragem busca, dentre outros fatores, obter as cotas de inundação e o tempo decorrido entre a ruptura e a chegada dos picos dos valores de máximos associados à onda.

O interesse por essa área de conhecimento é demonstrado por inúmeros pesquisadores em todas as partes do mundo, os quais centralizam os seus estudos nos seguintes aspectos:

- legais;
- sociais e/ou ambientais;
- econômicos;
- tecnológicos (construção, monitoramento e normatização); e
- matemáticos e/ou computacionais.

A abordagem do tema na bibliografia é realizada com dois enfoques preventivos distintos:

- 1- Através de estudos teóricos e de caso, procurando-se definir normas de projeto que visem minimizar a probabilidade de ocorrência de rupturas; e
- 2- Através de modelos computacionais ou modelos físicos reduzidos, procurando-se quantificar as características do fenômeno da "ruptura de barragem", dado que tal evento ocorra.

Esta dissertação atua com o segundo enfoque preventivo, procurando avaliar as características da onda gerada após a ruptura de uma barragem.

O capítulo 2 contém uma revisão bibliográfica englobando trabalhos na mesma linha desta dissertação.

No capítulo 3 são apresentados os danos causados por algumas rupturas de barragens ocorridas e uma análise do risco associado às diferentes formas de ruptura e tipos de barragens. Esse capítulo contém, também, os métodos utilizados para cálculo das ondas geradas ou pela ruptura de uma barragem ou por uma enchente natural (escoamento não-permanente em canais).

O ponto de vista adotado neste trabalho é o Lagrangeano, ou seja, isola-se o choque e analisa-se o seu deslocamento ao longo do tempo. A região próxima ao choque (onda abrupta gerada na ruptura e que caminha para jusante pelo canal) é tratada a seguir, sob o ponto de vista Euleriano (a análise da variação das propriedades do escoamento é realizada em posições fixas no espaço, mas variáveis em cada intervalo de tempo). Após a dissipação do choque, o ponto de vista transforma-se em Euleriano puro, com a análise das variações das propriedades em seções fixas no espaço, para todos os intervalos de tempo.

Essa dissertação objetiva desenvolver (e apresentar detalhadamente) um modelo computacional para cálculo da onda de ruptura e aplicá-lo a casos apresentados na literatura, procurando iniciar o estudo de métodos numéricos na Divisão de Hidráulica do CEHPAR, até então ligada quase exclusivamente a modelos físicos reduzidos de aproveitamentos hidrelétricos. Esse estudo procura, também, incentivar a análise do comportamento da onda de ruptura de barragens por órgãos públicos e a sua utilização em relatórios de impacto ambiental. O método aqui descrito pode vir a subsidiar a Defesa Civil e/ou outras entidades, civis ou governamentais, para que possam melhor zelar pelas vidas das populações ribeirinhas e, tanto quanto possível, pelos seus bens materiais.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresentam-se neste capítulo alguns trabalhos de pesquisa referentes ao estudo da ruptura de barragens, e que centralizam suas atenções na obtenção das alturas e velocidades do escoamento após a ruptura.

A linha de pesquisa mais antiga ainda em atividade foi desenvolvida por Danny Fread ( ver FREAD[1971, 1973, 1976 e 1989]; FREAD e HARBOUGH[1973] e FREAD e SMITH[1978]), e que culminou com o modelo DAMBRK, com a última versão publicada em 1988 (FREAD[1988]). Este modelo, o DAMBRK, é o mais difundido a nível mundial para análise de ruptura de barragens de acumulação de água ou detritos, em canais com escoamentos sub ou supercríticos. Sua abordagem é euleriana, ou seja, preocupa-se com as condições em seções pré-definidas, não se importando com a onda em si.

CHEN e ARMBRUSTER[1980] apresentam uma solução utilizando o método das características e ajuste do choque, aplicando o seu modelo a um canal de seção transversal qualquer (caso real).

ALAM e BHUIYAN[1995], KATOPODES[1984] e DZIEDZIC[1988] apresentam modelos de solução utilizando o método dos elementos finitos, aplicado a canais retangulares. Tais modelos ainda não apresentam bons resultados, nem mesmo para casos ideais.

FENNEMA e CHAUDHRY[1986] apresentam dois modelos baseados em diferenças finitas explícitas e implícitas, com aproximação de segunda ordem; tais métodos utilizam o ponto de vista euleriano e apresentam uma atenuação das ondas geradas, pois o cálculo é realizado em seções pré-definidas (normalmente não coincidentes com a posição do choque a cada instante de cálculo). AMEIN et al.[1983] simplificam a questão do posicionamento do choque deslocando-o para a seção mais próxima (em cada instante de tempo); esta simplificação pode conduzir a erros de cálculo e/ou de análise, dependendo do incremento espacial utilizado.

Alguns autores (XANTOPOULOS e KOUTITAS[1976], KATOPODES e STRELKOFF[1978], BELLOS et al.[1992], ELLIOT e CHAUDHRY[1993], MILLER e CHAUDHRY[1989], DAMULLER et al.[1989], BELL et al.[1989], TINGSANCHALI e RATTANAPITIKON[1993], FENNEMA e CHAUDHRY[1990] e ZHAO et al.[1994]) estudaram a ruptura de barragens em modelos bidimensionais e os aplicaram a canais curvos ou rupturas com brechas (rupturas não em toda a largura do canal). ALMEIDA e RODRIGUES[1986] aplicaram um modelo misto

em uma e duas dimensões a um canal com planície de inundação em seu trecho intermediário.

AMEIN et al.[1983] apresentaram um método para cálculo direto da onda gerada pela ruptura de uma barragem, aplicando-o a um canal horizontal e a um canal com escoamento supercrítico, comparando os resultados com dados obtidos em laboratório. KATOPODES e SCHAMBER[1983] apresentaram cinco modelos baseados no método das características, e os aplicaram aos mesmos dados de laboratório.

FAURE e NAHAS[1961] apresentaram um estudo numérico (método das características) e experimental de ondas com grandes gradientes na frente de onda.

KORDAS e WITKOWSKA[1976] compararam a aplicação de métodos numéricos considerando isoladamente a frente de onda (ponto de vista lagrangeano) ou com a descontinuidade 'alisada' (ponto de vista euleriano). Concluíram que a consideração das descontinuidades 'alisadas' apresenta bons resultados quando as seções transversais não apresentam grandes variações e a onda gerada não possui mais de dois metros de altura.

TONWSON e AL-SALIHI[1989] estudaram a onda gerada pela ruptura instantânea de uma barragem em um sistema de coordenadas  $r-t$  (canal retangular com paredes laterais

convergentes, paralelas ou divergentes). O método de solução utilizado é o das características; os resultados são coerentes com resultados obtidos em laboratório.

ON e LICH[1990] desenvolveram um método de análise baseado no método das características e o aplicaram a dois casos, um canal retangular e um canal real; o método é altamente iterativo.

MUSKATIROVIC[1973], MUSKATIROVIC e KAPOR[1985], FRANCO e ALMEIDA[1989] e ALMEIDA e ORNELAS[1989] estudaram a ruptura de barragens em uma seqüência de reservatórios, procurando encontrar uma regra de operação para proteção das barragens e de outras obras existentes a jusante no caso da ruptura da barragem localizada a montante.

BASCO[1989] comenta algumas limitações das equações de Saint-Venant quando aplicadas à ruptura de barragens e propõe a adoção das equações de Boussinesq, que contém uma derivada cruzada no espaço e no tempo (derivada segunda nesse caso).

BALLOFET et al.[1974] apresentaram um método de diferenças finitas explícito aplicado a um canal qualquer. O método utiliza vários pontos em vários instantes de tempo anteriores ao calculado, e com valores de vazão e profundidade em seções alternadas.

RAJAR[1978] apresenta um esquema difusivo de solução, e o compara com resultados obtidos em modelo reduzido.

No Brasil, destacam-se os trabalhos de PASINATO e TUCCI[1992], MASCARENHAS e SILVA[1987], SILVA e MASCARENHAS[1989], MASCARENHAS[1990], COSTA[1978] e de NOGUEIRA[1984]. PASINATO e TUCCI apresentaram uma forma de resolução e a aplicaram a canais retangulares com rugosidade, declividade e largura constantes. MASCARENHAS (em seu trabalho isolado e nos trabalhos em co-autoria com SILVA) apresentou os métodos de solução do problema, utilizando os pontos de vista euleriano e/ou lagrangeano. Os modelos apresentados por MASCARENHAS são aplicáveis a canais retangulares ou trapezoidais. COSTA aplicou o modelo SMPDBK (modelo DAMBRK simplificado), procurando quantificar os danos provenientes da ruptura hipotética da barragem de Três Marias, no rio São Francisco. NOGUEIRA procurou estabelecer o mecanismo de erosão do maciço das barragens de terra durante a ruptura e obter o hidrograma efluente pela brecha.

Todos os trabalhos aqui citados não apresentam os códigos dos programas computacionais e nem um grau de detalhamento suficientemente didático a nível introdutório. Procurar detalhar o máximo possível os passos do cálculo realizado é um dos objetivos desta dissertação.

## CAPÍTULO 3

### DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E ABORDAGENS EXISTENTES

#### 3.1 - Generalidades

A sociedade civil atualmente está mais exigente com respeito à segurança, seja ela pessoal, da sociedade como um todo ou do meio ambiente. Isto pode ser observado em todos os campos do conhecimento, principalmente em áreas de grande impacto social, como a medicina, a engenharia química e a engenharia civil. Dentro da área de estudo da engenharia hidráulica (um dos ramos da engenharia civil), uma das questões ambientais mais importantes e um dos maiores riscos a que podemos expor a sociedade é a ruptura de uma barragem (pela extensão dos danos causados, sejam eles sociais ou econômicos).

Com isto em vista, os órgãos fiscalizadores (ou associações de engenheiros) em todo o mundo procuram revisar as barragens existentes e ditar normas para projeto e construção de novas barragens. São exemplos desta preocupação as seguintes publicações:

- "Segurança de Barragens- Recomendações para Formulação e Verificação de Critérios e Procedimentos", do COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS[1986], que procura ditar normas, desde o projeto até o abandono da obra, se necessário.

- "Safety of Existing Dams- Evaluation and Improvement", do National Research Council (ESTADOS UNIDOS[1983]), que comenta a segurança de barragens de uma maneira histórica e causal, sugerindo um glossário de termos a serem adotados nessa área de estudo.

- "Safety of Dams- Flood and Earthquake Criteria", do National Research Council (ESTADOS UNIDOS[1985]), que dita normas para segurança quanto a enchentes e terremotos.

- "Evaluation Procedures for Hydrologic Safety of Dams", da American Society of Civil Engineers (AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS[1988]), que analisa a segurança de uma barragem de uma maneira econômica, procurando quantificar o custo de uma possível ruptura, bem como o risco a ela associado.

- "Socioeconomic Considerations in Dam Safety Risk Analysis", do National Resources Council (COCHRANE[1987]), onde encontramos uma revisão sobre análise de riscos e sobre os sistemas de alerta contra enchentes.

- "Multiobjective Risk Partitioning: An Application to Dam Safety Risk Analysis", do National Resources Council (HAIMES[1988]), o qual comenta que a análise estatística do risco não é representativa da magnitude do dano e, também, não permite um gerenciamento do socorro e da reconstrução, o que é possível através de uma análise de múltiplos objetivos.

O Comitê Brasileiro de Grandes Barragens realizou dois seminários sobre segurança de barragens, sendo o último realizado em outubro de 1990, publicando-os na Revista Brasileira de Engenharia (RBE[1987] e RBE[1992]). Nesses simpósios discutiu-

se sobre os critérios de segurança (hidrológica, estrutural e operacional), recuperação de barragens "não seguras" e planos de emergência.

REITER[1992] comenta que existem três estratégias para enfrentar uma ruptura de barragem, concluindo que a análise de danos causados pela ruptura de barragens é muito importante. As estratégias são:

- *Reagir à crise quando ela ocorrer*: significa que não será feita nenhuma análise prévia de um possível acidente.
- *Planejar para a crise*: significa que uma análise preliminar será realizada, mas não serão implantadas medidas preventivas.
- *Planejar para ações eficientes*: significa planejar e implantar medidas preventivas e planos de emergência.

### 3.2 - Número de Barragens Existentes e de Rupturas Ocorridas

As barragens, principalmente as destinadas à geração de energia elétrica, transmitem para a sociedade uma sensação de segurança quase total. Os técnicos da área de engenharia hidráulica, porém, possuem a noção de segurança associada ao tempo de recorrência de uma enchente, o qual para grandes barragens resulta igual a 10.000 anos (genericamente, são denominadas de grandes barragens as que possuem altura maior que

15 metros- ou 50 pés em países de língua inglesa). Nas últimas décadas tem sido bastante utilizado, também, o conceito de vazão máxima provável (QMP), que pode ser associado ao conceito de precipitação máxima provável (PMP); esses valores são obtidos por meio de maximização dos fatores determinantes da precipitação e do escoamento. Maiores detalhes podem ser obtidos em ELETROBRÁS[1987]; nessa publicação constam tabelas para classificação da barragem (em função da altura e do volume armazenado), critérios para seleção do esquema de cálculo da cheia de projeto e os métodos sugeridos. O projeto do vertedouro das grandes obras hidráulicas é, normalmente, baseado no maior desses dois valores (decamilenar- via análise estatística- ou QMP). Essa noção de segurança, porém, só engloba fatores hidrológicos (os que conduzem a ruptura por galgamento, sem que haja falha de operação, construção ou problemas geológicos não detectados previamente).

Quando analisamos a segurança de uma barragem com uma visão global, observamos que uma barragem pode romper devido a várias causas (ver mais detalhes em MASCARENHAS[1990]):

*Galgamento* (ou "Overtopping"): É causado pela incapacidade do vertedouro de liberar grandes volumes de água, seja por subdimensionamento, acidente geológico (onda causada por deslizamento) ou problemas nas partes mecânicas. É particularmente importante para barragens de material solto (terra ou enrocamento).

*Entubamento* (ou "Piping"): É causado pela erosão interna da barragem ou da fundação por percolação de água. Normalmente se inicia na extremidade de jusante e regride até a superfície de montante. É importante em barragens de terra.

*Outros Problemas Geológicos*: Englobam-se nessa categoria as infiltrações, os deslizamentos das fundações ou do enrocamento, as acomodações geológicas e os abalos sísmicos, naturais ou induzidos. Os terremotos induzidos são causados pelo peso próprio da água do reservatório, pela lubrificação proporcionada pela água nas falhas existentes na rocha da fundação, ou pela alteração das tensões intersticiais no maciço das barragens de terra. Todos estes fenômenos de difícil caracterização no campo, devido à impossibilidade de se conhecer exatamente o comportamento da fundação e do maciço da barragem.

*Causas Humanas*: Abrangem as falhas de projeto e/ou construção, operação inadequada do reservatório e ações de guerra. São exemplos de falhas de projeto e/ou construção os critérios de projeto inadequados, projetos demasiadamente ousados e ensaios deficientes dos materiais. As falhas de operação são basicamente a demora na operação das comportas e a definição de volumes de amortecimento insuficientes. Como ações de guerra conhece-

se os casos das barragens de Möehne e Eder na Alemanha, durante a Segunda Guerra Mundial, e a tentativa de destruição da barragem de Peruca pelos sérvios na Bósnia (ver REYNOLDS[1993], REINA[1993] e MEGLA[1993]).

*Causas Combinadas:* representam a combinação de algumas das causas acima descritas.

A combinação de todos esses fatores conduz a um risco de ruptura da ordem de 1% (de acordo com DOLCIMASCOLO[1980], SERAFIM[1981], GOUBET[1979] e COMBELLES[1979]), muito maior que o esperado de 0,01% (risco de 1 em 10.000 anos).

A seguir são mostradas considerações e dados extraídos dessas e de outras publicações a respeito da segurança de barragens existentes e rupturas ocorridas.

DOLCIMASCOLO[1980] comenta que nos Estados Unidos da América (EUA) são construídas 1650 barragens por ano (50 delas de propriedade do Governo Federal). Foram inspecionadas 4918 barragens, das quais 349 (7,0%) apresentaram problemas de desempenho, sendo que 74 haviam rompido (1,5%) pelas mais variadas causas. Comenta, ainda, que 6 dos 50 estados norte-americanos possuem mais da metade das barragens vistoriadas classificadas como inseguras, sendo a média nacional nos EUA de 29%.

COMBELLES[1979] cita que das 13.500 grandes barragens existentes no mundo (com mais de 15 metros de altura), 131 romperam (0,97%).

BIVINS[1983] fornece alguns dados sobre rupturas de barragens norte-americanas, citando inicialmente que 91% das 63.419 barragens existentes são de terra. Do total de barragens norte-americanas, 12,6% são consideradas de alto risco (com custo de recuperação estimado em 6,8 bilhões de dólares); 33,4% são consideradas inseguras e 81% delas possuem problemas de subdimensionamento do vertedouro. Comenta que entre os anos de 1972 e 1977 ocorreram 6 rupturas nos EUA, causando a morte de 500 pessoas e prejuízos de 2 bilhões de dólares.

ROSE[1978] faz uma análise do prejuízo causado por uma ruptura somente em termos do custo das vidas perdidas. O estudo mostra que esse custo anual (para o caso da provável ruptura da barragem de Alburn- EUA) pode atingir a cifra de 10,4 milhões de dólares.

SERAFIM[1981] analisou as rupturas levando em conta a idade, o ano do acidente e o material constituinte da barragem, dados esses mostrados nas figuras 3.1 a 3.4. A figura 3.1 apresenta o número de rupturas classificadas por altura da barragem, com números sensivelmente menores para as de maior altura, fruto do maior conservadorismo adotado nas barragens maiores. A figura 3.2 apresenta a evolução do número de

barragens e do número de rupturas, mostrando o grande aumento no número de barragens após a segunda guerra mundial. Na figura 3.3 encontra-se a involução da porcentagem de ruptura em relação ao número de barragens; observa-se que existiu um grande incremento na segurança no período entre as grandes guerras mundiais. Podemos observar na figura 3.4 uma grande concentração de rupturas nos anos iniciais da utilização da barragem (e mesmo durante a sua construção), época em que quase todas as falhas de projeto e execução se manifestam.

Comenta, ainda, que para um tempo de recorrência de 10.000 anos, e uma vida útil de 100 anos, o risco de uma barragem romper ao longo de toda a sua vida útil é de 1%, apenas considerando os fatores hidrológicos. Faz, também, o seguinte comentário a respeito do futuro dos acidentes com barragens:

"A altura das barragens aumenta, como aumenta a altura das barragens que rompem, muito embora a maior barragem rompida esteja muito abaixo da altura da maior barragem construída. Esta importante observação mostra que as rupturas continuarão ocorrendo, e toda nova barragem, alta ou baixa, traz um risco que deve ser cuidadosamente analisado".

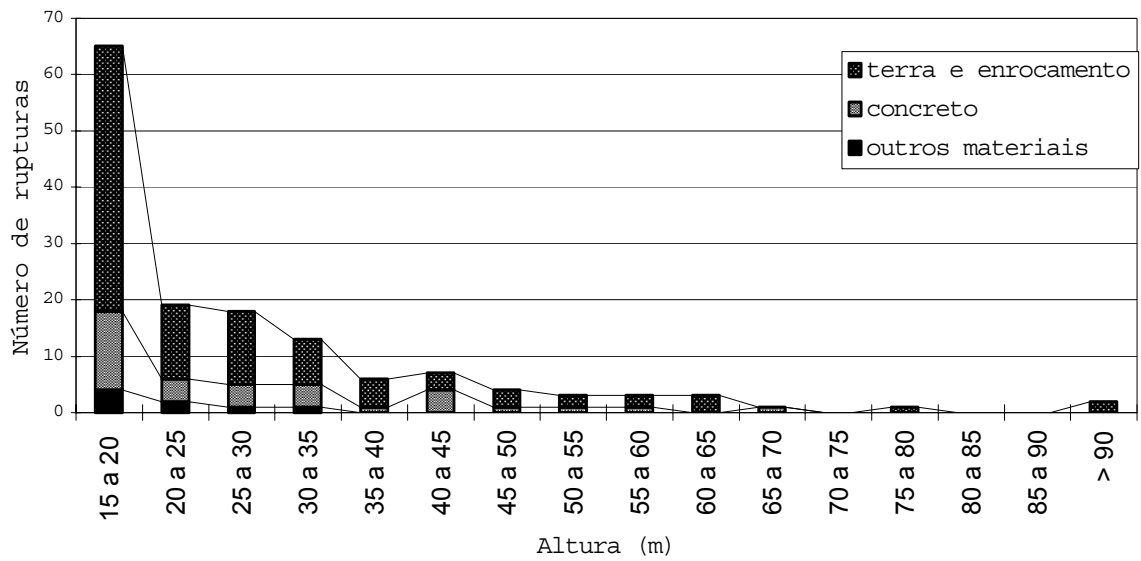


Figura 3.1 - Número de rupturas classificadas por altura e pelo material constituinte da barragem (SERAFIG[1981]).

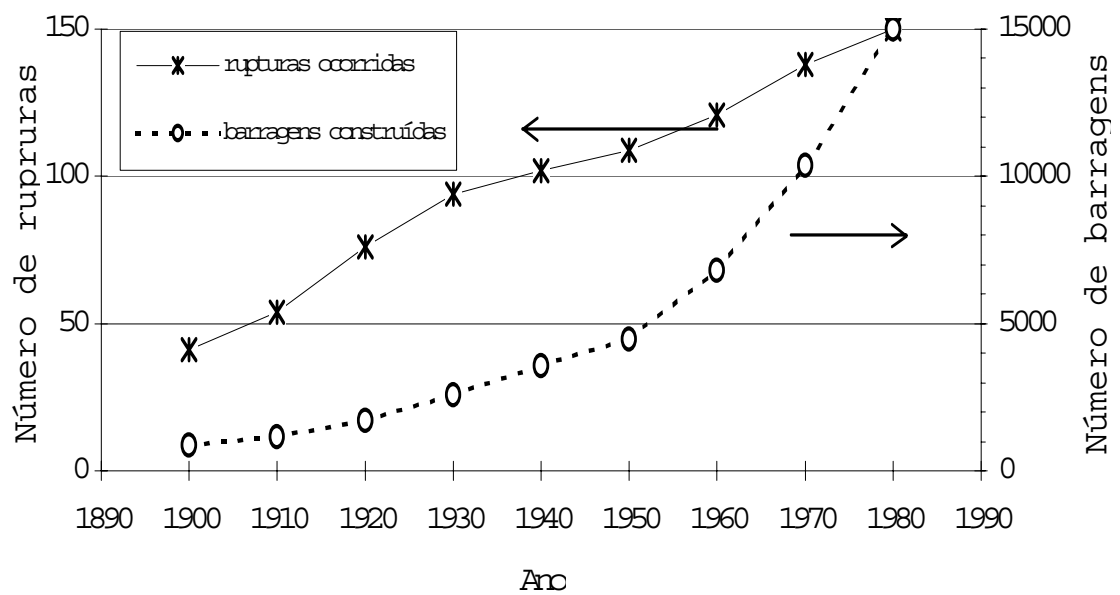


Figura 3.2 - Número de barragens existentes e rupturas ocorridas (SERAFIG[1981]).

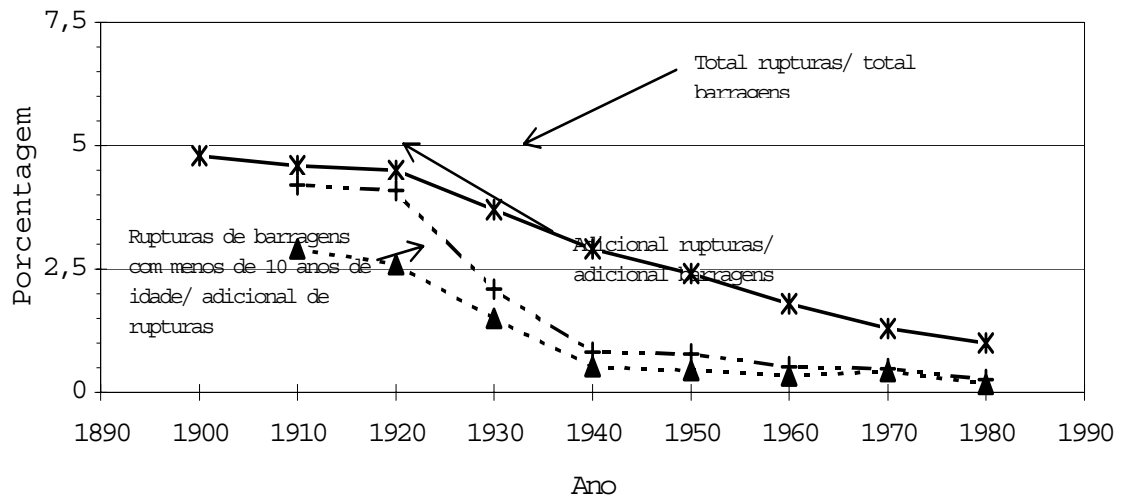


Figura 3.3 - Análise percentual das rupturas ocorridas (SERAFIG[1981]).

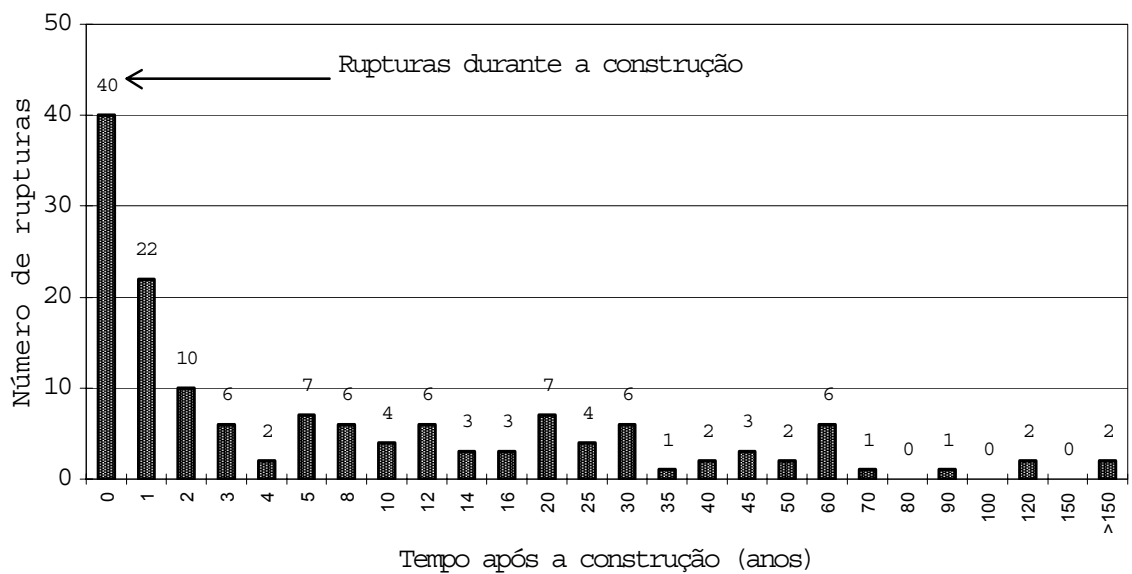


Figura 3.4 - Número de rupturas ocorridas classificadas pela idade da barragem na ruptura (SERAFIG[1981]).

GOUBET[1979] comenta que o acidente ocorrido com a barragem de Malpasset (ver tabela 3.4) foi a 7ª maior catástrofe

da humanidade. Em termos de vítimas fatais, uma análise probabilística mostra que em 1% dos acidentes podem ocorrer mais de 1000 vítimas, em 10 % mais de 100 vítimas e em 40 % não ocorrerão vítimas fatais. Observa ainda que o risco de ruptura durante a construção diminuiu de 0,3333% no século passado para 0,0625% atualmente; nos dez primeiros anos de operação, o risco de ruptura reduziu-se de 1,6 % no século passado para 0,2 % em 1950. O risco de ruptura durante os primeiros cinco anos de operação resulta, portanto, igual ao risco durante todo o restante da vida útil da barragem.

BAECHER, PATÉ e NEUFVILLE[1980] comentam que o risco anual de ruptura nos primeiros 5 anos é de 0,1% e passa a 0,005% nos anos seguintes.

FAURE e NAHAS[1965] estudaram a ruptura da barragem de Malpasset em modelos reduzidos, com escala geométrica de até 1:400 (distorcidos ou não) e com uma rugosidade variável ao longo do canal, e concluíram que o estudo em modelo reduzido não distorcido conduziu a resultados mais próximos ao real do que o modelo distorcido.

VELTROP[1991] enumera as barragens existentes no mundo com mais de 15 m de altura, e que estão na tabela 3.1; cita que estão em construção 48 barragens com mais de 150 m de altura, 17 delas só na América Latina.

COXON[1979] apresenta os acidentes ocorridos com barragens de mais de 15 m de altura nos Estados Unidos da América, Canadá e Europa Ocidental, com construção e ruptura entre os anos de 1900 e 1969. Um resumo dos resultados do trabalho é apresentado na tabela 3.2.

NAIHUA[1989] construiu, e depois destruiu, uma barragem em arco de 22 m de altura e 64 m de comprimento de crista em um vale não habitado na China. A ruptura foi provocada para estudar as tensões internas na estrutura da barragem no instante da ruptura. O estudo não contemplou, infelizmente, a ruptura em si e nem a onda gerada.

Tabela 3.1 - Número de barragens existentes, classificadas por altura (VELTROP[1991]).

| <i>Altura (m)</i> | <i>número de barragens</i> |
|-------------------|----------------------------|
| 15 a 30           | 28.546                     |
| 30 a 60           | 6.031                      |
| 60 a 100          | 1.247                      |
| 100 a 150         | 321                        |
| 150 a 200         | 64                         |
| mais de 200       | 26                         |

Tabela 3.2 - Número de barragens construídas e rupturas ocorridas entre os anos de 1900 e 1969, classificadas pelo material constituinte da barragem (COXON[1979]).

| <div> <div>Tipo →</div> <div>Descrição ↓</div> </div> |            | Arco | Contra-<br>forte | Gravi-<br>dade | Terra e<br>Enroca-<br>mento | Total |
|-------------------------------------------------------|------------|------|------------------|----------------|-----------------------------|-------|
| Número de barragens construídas                       |            | 420  | 308              | 1.445          | 3.008                       | 5.181 |
| R<br>U<br>P<br>T<br>U<br>R<br>A                       | Fundação   | 2    | 4                | 2              | 11                          | 19    |
|                                                       | Corpo      | 0    | 1                | 2              | 13                          | 16    |
|                                                       | Vertedouro | 1    | 1                | 0              | 6                           | 8     |
|                                                       | Outros     | 0    | 0                | 0              | 1                           | 1     |
|                                                       | Total      | 3    | 6                | 4              | 31                          | 44    |

LEBRETON[1985] fez uma análise estatística das rupturas ocorridas entre 1964 e 1983 em todo o mundo e chegou às seguintes conclusões:

- O número médio de rupturas ocorridas por ano foi de 3,6 para barragens com mais de 15 m de altura, e de 2,0 para as de menos de 15 m de altura.
- Ajustando uma distribuição de probabilidade de Poisson ao número de rupturas, concluiu que:

- em 13 % dos anos não ocorrem rupturas;
  - em 26 % dos anos ocorre 1 ruptura;
  - em 27 % dos anos ocorrem 2 rupturas;
  - em 19 % dos anos ocorrem 3 rupturas;
  - em 9,5 % dos anos ocorrem 4 rupturas;
  - em 4% dos anos ocorrem 5 rupturas; e
  - em 1,5 % dos anos ocorrem mais de 5 rupturas.
- Comparando a distribuição ajustada aos dados reais, observa-se que os extremos da distribuição real são maiores, com 30 % dos anos sem rupturas e 5 % com mais de 5 rupturas (máximo de 11 rupturas no ano de 1976).
  - Quanto à segurança dos maciços das barragens, Lebreton concluiu que o risco de ruptura durante a construção é de 0,19 %, reduzindo-se para 0,16 % a partir do primeiro enchimento e até o décimo ano de operação.
  - Quanto ao número médio de vítimas fatais, Lebreton concluiu que o número médio de vítimas por ano é de 130, com uma média de 36 vítimas fatais por ruptura.
  - Ajustando uma nova distribuição de probabilidade de Poisson ao número de vítimas fatais, Lebreton concluiu que:
    - em 75 % das rupturas não ocorrem vítimas fatais;
    - em 80 % das rupturas ocorrem menos de 7 vítimas fatais;

- em 90 % das rupturas ocorrem menos de 90 vítimas fatais;
- em 95 % das rupturas ocorrem menos de 250 vítimas fatais;
- em 99 % das rupturas ocorrem menos de 900 vítimas fatais;
- em 99,9 % das rupturas ocorrem menos de 4000 vítimas fatais.

SCHNITTER[1979] e ESTADOS UNIDOS[1983], citando INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS[1973], comentam sobre a evolução da segurança das barragens de terra e enrocamento e das barragens de concreto com o passar dos anos, da idade da barragem e da sua altura; os dados compilados encontram-se na figura 3.5.

Alguns dos autores acima e, também, os trabalhos de ELLINGWOOD et al.[1993], MASCARENHAS[1990], e ZOLOTOV e IVASHCHENKO[1991] descrevem as características de rupturas de barragens nacionais e estrangeiras, identificadas nas tabelas 3.3 a 3.6.

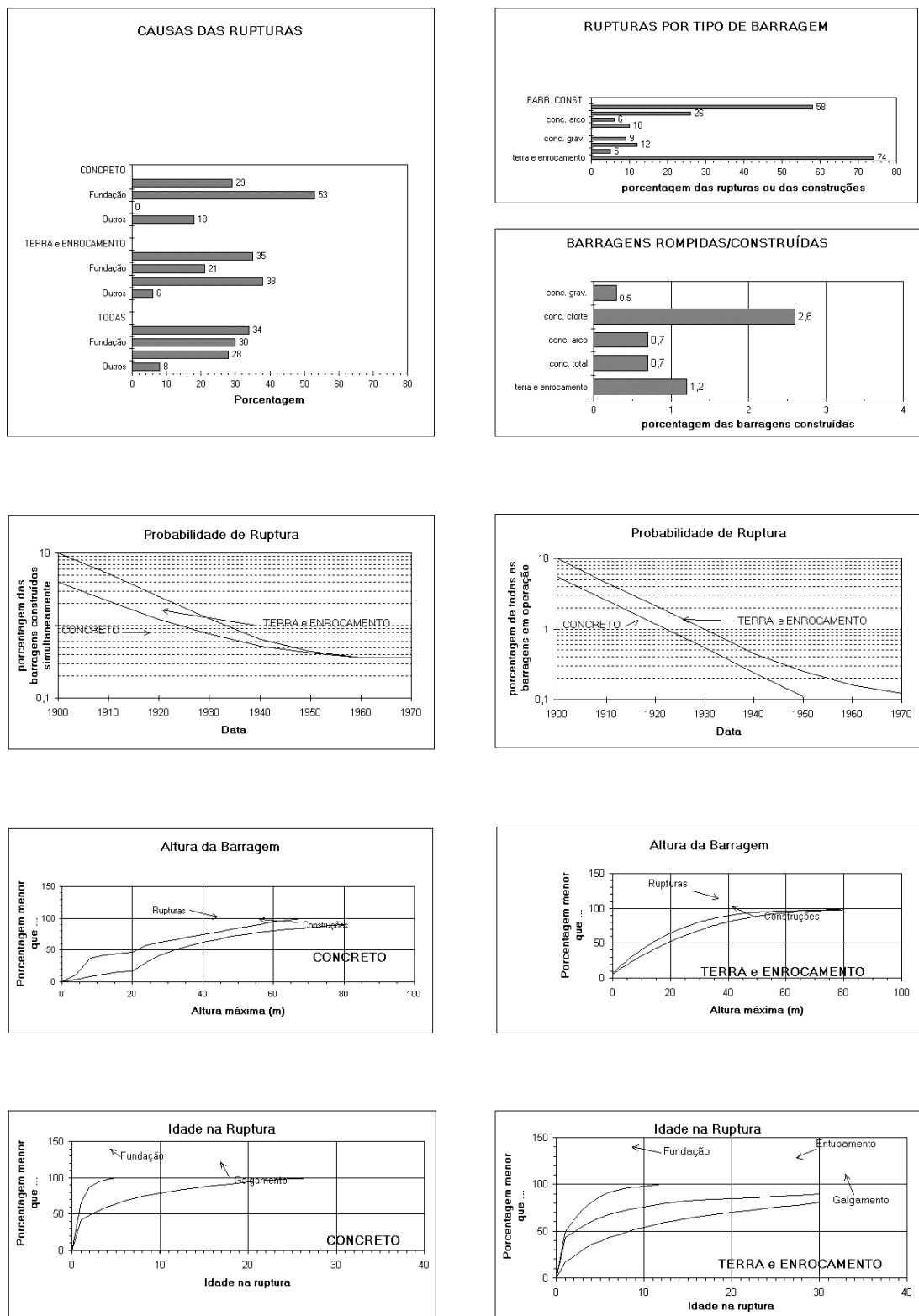


Figura 3.5 - Dados estatísticos de rupturas (ESTADOS UNIDOS [1983]).

### 3.3 - Escoamento não-permanente em canais e métodos computacionais associados

O escoamento de uma onda em um rio ou canal é classificado de não-permanente, pois tanto a velocidade como a profundidade da água variam ao longo do tempo. A rigor, o escoamento deveria ser chamado de não-permanente variado, pois o escoamento também varia no espaço. Entretanto, como o escoamento não-permanente uniforme não existe na prática, a denominação é simplificada. O escoamento não-permanente exige, para ser solucionado, o conhecimento das condições iniciais (normalmente aquelas que existem antes de qualquer alteração, ou seja, movimento permanente) e das condições de contorno. As condições de contorno podem variar em função do tipo de escoamento e da existência ou não de controles internos ao escoamento no problema; normalmente são necessárias duas condições de contorno, uma a montante e outra a jusante para escoamentos sub-críticos.

No item 3.4 descrevem-se as equações que governam o escoamento não-permanente, conhecidas como equações de Saint-Venant, e os métodos utilizados para sua solução numérica são apresentados e comentados (métodos das características, das diferenças finitas e dos elementos finitos). No item 3.5 descrevem-se os métodos analíticos e numérico para o cálculo de uma onda de choque proveniente da ruptura de uma barragem.

O cálculo da onda de choque pode ser realizado com dois enfoques distintos:

- Ajuste do choque: esse enfoque busca encontrar as características da frente de onda e, a seguir, obter as características dos demais pontos do canal. O ponto de vista adotado é o Lagrangeano.
- Captura do choque (ou cálculo continuado): nesse enfoque do cálculo, o choque em si não é considerado, importando apenas as características do escoamento em pontos fixos no espaço. Nesse caso, o ponto de vista é o Euleriano.

O enfoque adotado neste trabalho é o do ajuste do choque. As soluções pelo método de cálculo continuado encontram-se apresentadas em MASCARENHAS[1990], e não serão repetidas aqui, pois não fazem parte deste estudo.

### 3.4 - Escoamento Não-permanente em Canais

As equações que governam o escoamento não-permanente em canais são conhecidas como equações de Saint-Venant, em homenagem a Barré de Saint-Venant que as deduziu em 1871. A dedução partiu das equações de Navier-Stokes com as seguintes hipóteses simplificadoras:

- A distribuição de pressões ao longo da vertical na seção transversal é hidrostática;
- O escoamento é uni-dimensional;
- O fluido é considerado incompressível e homogêneo;
- A declividade do leito do canal é suficientemente pequena para que possamos aproximar o seno do seu ângulo por sua tangente;
- as perdas de carga por atrito são descritas por expressões do tipo das do movimento permanente.

Diversos autores apresentam a dedução dessas expressões (LIGGETT[1975], FREAD[1976], TUCCI[1985], entre outros), enquanto a maioria apenas apresenta essas equações, sem preocupação com a reprodução da dedução matemática (por exemplo, STRELKOFF[1970] e MASCARENHAS[1990]). A forma dessas equações pode variar, devido a outras considerações adicionais:

- Existência ou não de contribuição lateral (e a consideração ou não de sua energia cinética);
- A área da seção transversal ser inteiramente considerada como contribuindo para o escoamento, ou ser considerada a existência de parcelas de armazenamento (exemplo: bacias de acumulação e planícies de inundação);
- Seções transversais com formas quaisquer ou com formas bem definidas geometricamente (canal retangular, por exemplo);

- Consideração das variáveis dependentes como sendo a vazão ou a velocidade média, e o nível da água ou a área da seção transversal.

Tendo em vista o exposto acima, apresentamos a seguir a equação de Saint-Venant em sua forma completa, a qual foi apresentada por MASCARENHAS [1990]:

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + v \cdot \frac{B}{B_s} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{A}{B_s} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{q_L}{B_s} - \frac{v}{B_s} \cdot A_x^h & (3.1.A) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + g \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{q_L \cdot v}{A} = g \cdot (S_0 - S_f) & (3.1.B) \end{cases}$$

onde:

$h$  - profundidade do escoamento (m);

$v$  - velocidade média (m/s);

$x$  - coordenada espacial (m);

$t$  - tempo a partir do início da retirada do obstáculo(s);

$A$  - área da seção transversal (m<sup>2</sup>);

$A_s$  - área da seção de armazenamento (m<sup>2</sup>);

$A_x^h$  - Variação da área com a abcissa, para uma profundidade constante, ou seja  $\left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)_h = \text{constante}$ ;

$B$  - largura da superfície livre de escoamento (m);

$B_s$  - largura da superfície livre de armazenamento(m);

$g$  - aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);

$q_L$  - contribuição lateral (m<sup>3</sup>/s.m);

$S_0$  - declividade do fundo (m/m);

$S_f$  - declividade da linha de energia (m/m).

Graficamente, algumas dessas grandezas encontram-se identificadas na figura 3.6. As equações 3.1.A e 3.1.B acima foram escritas tendo como incógnitas a velocidade e a profundidade do escoamento e admitem canais com seção qualquer (inclusive com armazenamento lateral), contribuição lateral (com a consideração de sua energia cinética) e perdas por atrito.

A parcela da perda de carga por atrito ( $S_f$ ) é calculada pela equação de Manning-Strickler (FRENCH[1985]):

$$S_f = \frac{n^2 \cdot v \cdot |v|}{R_h^{4/3}}$$

onde:

$n$  - coeficiente de rugosidade ( $m^{-1/3}.s$ );

$R_h$  - raio hidráulico da seção (m).

Este termo pode incluir, além das perdas por atrito, as perdas localizadas (com aumento do coeficiente  $n$  de Manning no trecho considerado).

As equações diferenciais de Saint-Venant são conhecidas no meio matemático como equações diferenciais parciais quasi-lineares e hiperbólicas. Não existe, até o momento, um método analítico para a solução exata das equações de Saint-Venant na sua forma completa. As soluções analíticas atuais exigem muitas e grandes simplificações, sendo que as mais comuns

conduzem aos conhecidos modelos de difusão, da onda cinemática ou modelos de armazenamento, com grau de simplificação crescente (MILLER E CUNGE[1975], TUCCI[1985], FRENCH[1985]). A representação do escoamento não-permanente com as equações de Saint-Venant em sua forma completa origina os chamados modelos hidrodinâmicos.

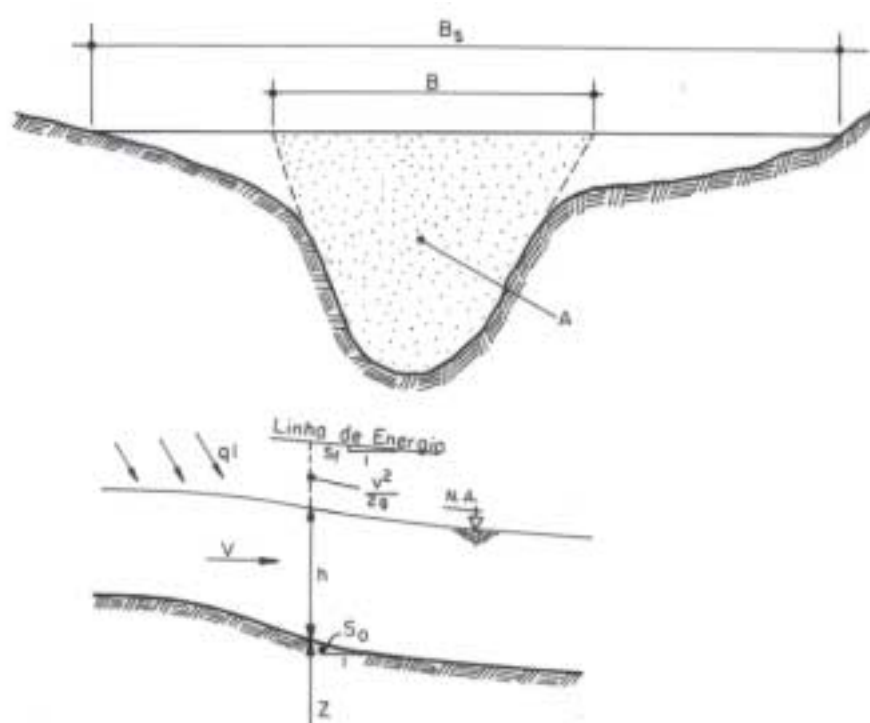


Figura 3.6- Representação das grandezas componentes das equações de Saint-Venant (LIGGETT[1975]).

A seguir são apresentados os métodos numéricos utilizados na solução das equações de Saint-Venant.

### 3.4.1 - Modelos numéricos utilizando o método das características

A solução de um par de equações diferenciais parciais simultâneas (como é o caso das equações de Saint-Venant) através da transformação destas em dois pares de equações diferenciais ordinárias é chamada de solução pelo método das características. SMITH[1985] apresenta a fundamentação matemática geral para esse método de solução.

ABBOTT[1975] apresenta o desenvolvimento destas equações características aplicadas às equações de Saint-Venant que para um canal retangular, sem contribuição lateral e sem atrito, possuem a forma mostrada pelas equações 3.2.A e 3.2.B abaixo, escritas na forma denominada conservativa ou divergente:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (v \cdot h)}{\partial x} = 0 \end{array} \right. \quad (3.2.A)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial (v \cdot h)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( v^2 \cdot h + \frac{g \cdot h^2}{2} \right) = 0 \end{array} \right. \quad (3.2.B)$$

onde:

$v$  - velocidade média (m/s).

As equações características resultantes são, portanto:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = v \pm c \end{array} \right. \quad (3.3.A)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} d(v \pm 2 \cdot c) = 0 \end{array} \right. \quad (3.3.B)$$

onde:

$c$  - celeridade da onda (m/s), calculada como sendo

$$c = \sqrt{g \cdot h}.$$

A equação 3.3.A nos fornece a inclinação das linhas características positiva (C+) e negativa (C-) no plano x-t (espaço-tempo), enquanto a equação 3.3.B nos fornece o valor da constante nas linhas, chamado de Invariante de Riemann (conforme o sinal selecionado seja positivo ou negativo).

Plotando-se as linhas características no plano x-t (equação 3.3.A com sinal positivo e negativo) obtém-se a figura 3.7.

MASCARENHAS[1990] (baseado em CHEN E ARMBRUSTER[1980]) apresenta este método aplicado às equações de Saint-Venant em sua forma completa (equações 3.1.A e 3.1.B), resultando nas equações características (equações 3.4.A e 3.4.B) seqüentes, onde:

$$\alpha = \frac{B}{B_s}, \quad \text{e} \quad D = \frac{A}{B}$$

$$\left\{ \begin{aligned}
 \left( \frac{dx}{dt} \right)_{\pm} &= \frac{1}{2} \cdot (1 + \alpha) \cdot v \pm \frac{1}{2} \cdot \left[ (1 - \alpha)^2 \cdot v^2 + 4 \cdot g \cdot \alpha \cdot D \right]^{\frac{1}{2}} & (3.4.A) \\
 \left\{ -\frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1 - \alpha}{\alpha} \right) \cdot \frac{v}{D} \pm \left[ \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{1 - \alpha}{\alpha} \cdot \frac{v}{D} \right)^2 + \frac{g}{\alpha \cdot D} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \cdot \frac{dh}{dt} + \frac{dv}{dt} &= g(S_0 - S_f) + \dots \\
 \dots + \left\{ -\frac{v}{\alpha \cdot D} - \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1 - \alpha}{\alpha} \right) \cdot \frac{v}{D} \pm \left[ \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{1 - \alpha}{\alpha} \cdot \frac{v}{D} \right)^2 + \frac{g}{\alpha \cdot D} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \cdot \alpha \cdot \frac{q_L}{B} + \dots & \\
 \dots - \left\{ -\frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1 - \alpha}{\alpha} \right) \cdot \frac{v}{D} \pm \left[ \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{1 - \alpha}{\alpha} \cdot \frac{v}{D} \right)^2 + \frac{g}{\alpha \cdot D} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \cdot \frac{\alpha \cdot v}{B} \cdot A_x^h & & (3.4.B)
 \end{aligned} \right.$$

As equações acima podem ser escritas de forma simplificada:

$$\left\{ \begin{aligned}
 \left( \frac{dx}{dt} \right)_{\pm} &= (v + \lambda^{\pm} \cdot \alpha \cdot D) & (3.5.A) \\
 \frac{dv}{dt} + \lambda^{\pm} \cdot \frac{dh}{dt} &= F^{\pm} & (3.5.B)
 \end{aligned} \right.$$

onde são utilizadas as funções abaixo definidas:

$$\lambda^{\pm} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{1 - \alpha}{\alpha} \cdot \frac{v}{D} \pm \sqrt{\left( \frac{1}{2} \cdot \frac{1 - \alpha}{\alpha} \cdot \frac{v}{D} \right)^2 + \frac{g}{\alpha \cdot D}} \quad (3.6.A)$$

$$F^{\pm} = g \cdot (S_0 - S_f) + \frac{\alpha \cdot q_L}{B} \cdot \left( \lambda^{\pm} - \frac{v}{\alpha \cdot D} \right) - \alpha \cdot \lambda^{\pm} \cdot \frac{v}{B} \cdot A_x^h \quad (3.6.B)$$

A solução de um problema de escoamento não-permanente em canais via método das características é, normalmente, obtida pela aplicação das equações características a três pontos (um em cada linha característica localizados na linha de tempo

anterior, e um ponto único na interseção das duas características, localizado na linha de tempo posterior); são necessárias, ainda, equações de interpolação das propriedades incógnitas na linha de tempo anterior. Este método de solução é aplicado isoladamente a cada ponto, na linha de tempo posterior.

O método das características é muito utilizado como método auxiliar para os demais (diferenças finitas e elementos finitos) pela facilidade de tratamento das condições de contorno, tanto externas quanto internas.

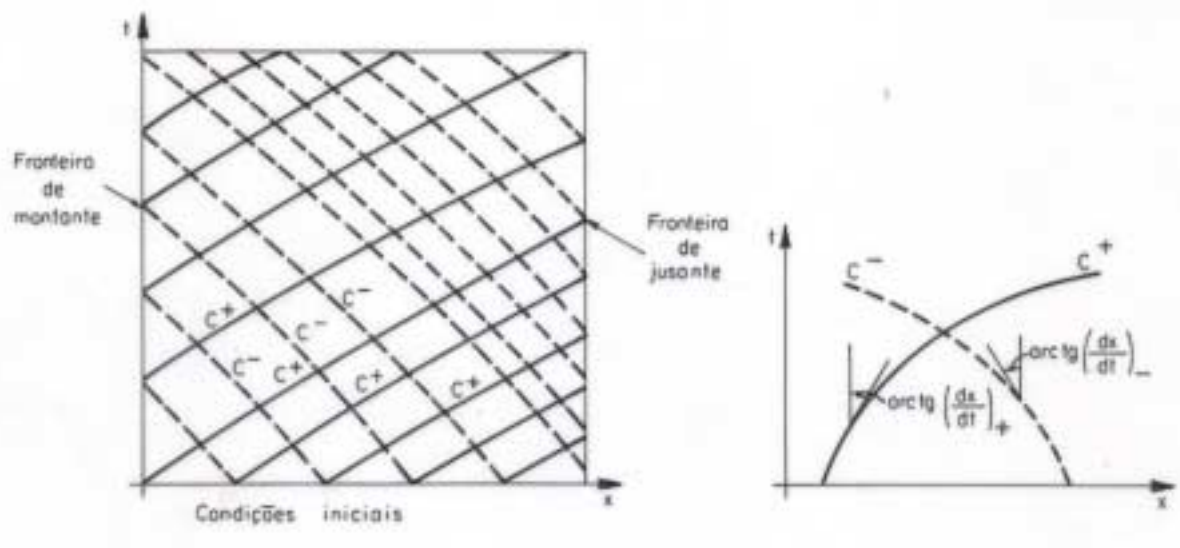


Figura 3.7 - Representação gráfica no plano  $x-t$  das linhas características (LIGGETT e CUNGE[1975]).

### 3.4.2 - Modelos Numéricos utilizando o método das diferenças finitas

Este método consiste em discretizar o espaço e o tempo através de uma malha de dimensões finitas fixas no espaço e no tempo. Normalmente, a discretização é feita em seções transversais com localização conhecida e intervalos de tempo pré-determinados, como pode ser visto na figura 3.8. Com isto, podem-se calcular os valores das variáveis nos pontos selecionados, para cada instante de tempo desejado.

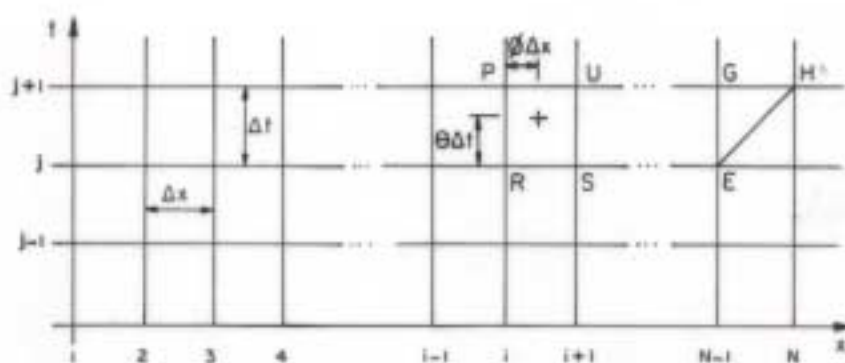


Figura 3.8 - Malha de diferenças finitas (AMEIN et al[1983]).

Os métodos das diferenças finitas são classificados em explícitos e implícitos, em função da forma das equações de aproximação e da forma da solução. Nos esquemas explícitos, as incógnitas (por exemplo, velocidade e profundidade-  $v$  e  $h$ ) no

instante de tempo  $t+\Delta t$  são discretizadas em função dos valores das propriedades somente no instante de tempo  $t$ ; nos esquemas implícitos a discretização é em função dos valores das propriedades em  $t$  e em  $t+\Delta t$ .

#### a) Esquemas Explícitos

São os mais simples, visto que a solução depende apenas das condições iniciais, ou no tempo anterior, e das condições de contorno, não dependendo das condições em pontos vizinhos no tempo desconhecido. Os valores das variáveis em cada posição e instante de tempo são calculados separadamente-figura 3.9. Destacam-se dentre os métodos explícitos os esquemas Difusivo, "Leap-frog", Lax-Wendroff (de 2ª ordem) e de Dronkers (para detalhes, ver LIGGETT e CUNGE[1975] e TUCCI[1986]). A principal limitação destes métodos é quanto à sua estabilidade numérica. A condição de Courant-Friedrichs-Lewis (ver MASCARENHAS[1990]) fornece uma relação entre os intervalos de espaço e de tempo para garantir que o esquema adotado seja estável, a qual é:

$$C_r = (|v| + c)_{\max} \cdot \Delta t / \Delta x \quad (3.7)$$

onde  $C_r$  é chamado de número de Courant. Em geral, para garantir a estabilidade nos métodos explícitos,  $C_r \leq 1$ . O número de Courant representa a relação entre as celeridades de propagação na solução analítica e na solução numérica.

A grande vantagem dos métodos explícitos é a facilidade computacional, apesar de consumir mais tempo de processamento, em função do menor intervalo de tempo permitido, para garantir a sua estabilidade numérica.

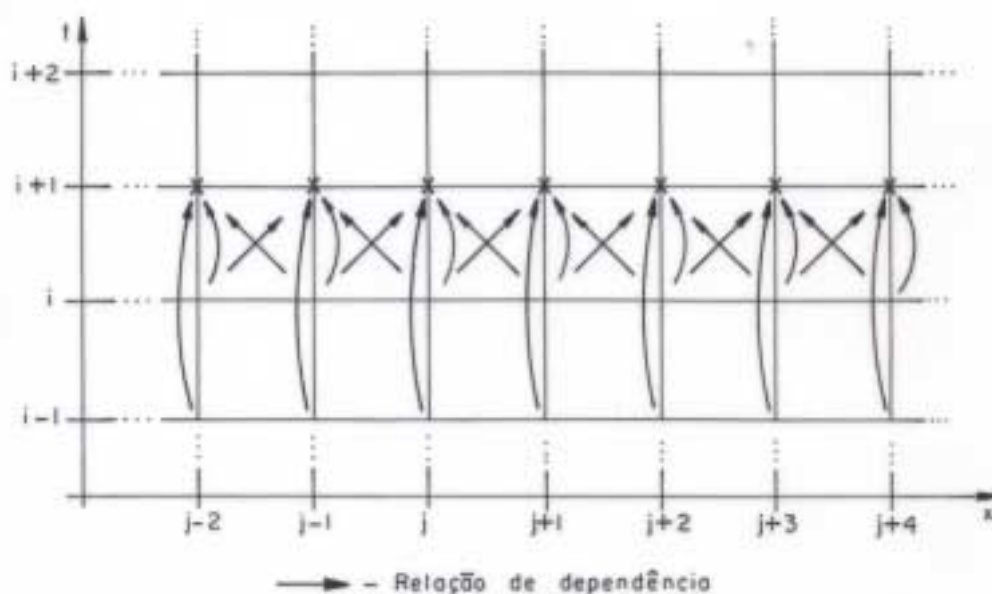


Figura 3.9- Pontos normalmente utilizados para cálculo através das diferenças finitas explícitas (LIGGETT e CUNGE[1975])

A solução de um problema de escoamento não-permanente em canais com a utilização de um método de diferenças finitas explícito é realizada isoladamente para cada ponto na linha de tempo posterior, baseado nas propriedades no mesmo ponto, na linha de tempo anterior (ou em linhas de tempo anteriores), e

nos pontos vizinhos (um a montante e um a jusante), também na linha de tempo anterior.

#### b) Métodos Implícitos

Os métodos implícitos distinguem-se dos explícitos pois a solução para um dado instante de tempo depende da solução para este instante de tempo (função dos valores nos pontos vizinhos) e da solução já obtida para o instante de tempo anterior (ver figura 3.10), o que conduz a modelos mais complexos, porém que tendem a ser mais estáveis. O cálculo no caso dos esquemas implícitos é realizado simultaneamente para todas as incógnitas no instante de tempo desconhecido. Os esquemas implícitos mais adotados são o de Vasiliev e o de Preissmann (ver LIGGETT e CUNGE[1975]). LIN e GOODWIN[1987] apresentam uma análise para o esquema de Preissmann generalizado, com ponderação no espaço e no tempo (o esquema de Preissmann tradicional utiliza a média aritmética simples-  $\phi=0,50$ - para ponderação no espaço). As funções de aproximação para o esquema de Preissmann generalizado são:

$$\left\{ \begin{array}{l} f = \theta [\phi \cdot f_{j+1}^{i+1} + (1 - \phi) \cdot f_j^{i+1}] + (1 - \theta) \cdot [\phi \cdot f_{j+1}^i + (1 - \phi) \cdot f_j^i] \quad (3.8.A) \\ \frac{\partial f}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} [\phi \cdot (f_{j+1}^{i+1} - f_{j+1}^i) + (1 - \phi) \cdot (f_j^{i+1} - f_j^i)] \quad (3.8.B) \\ \frac{\partial f}{\partial x} = \frac{1}{\Delta x} [\theta \cdot (f_{j+1}^{i+1} - f_j^{i+1}) + (1 - \theta) \cdot (f_{j+1}^i - f_j^i)] \quad (3.8.C) \end{array} \right.$$

onde  $f$  representa uma função contínua qualquer ( $v$ ,  $h$ ,  $A$ ,  $B$ , etc...),  $i$  e  $j$  são contadores dos passos de tempo e espaço,

respectivamente,  $\theta$  e  $\sigma$  são parâmetros de ponderação (números adimensionais definidos entre 0 e 1). A figura 3.11 mostra genericamente essas notações.

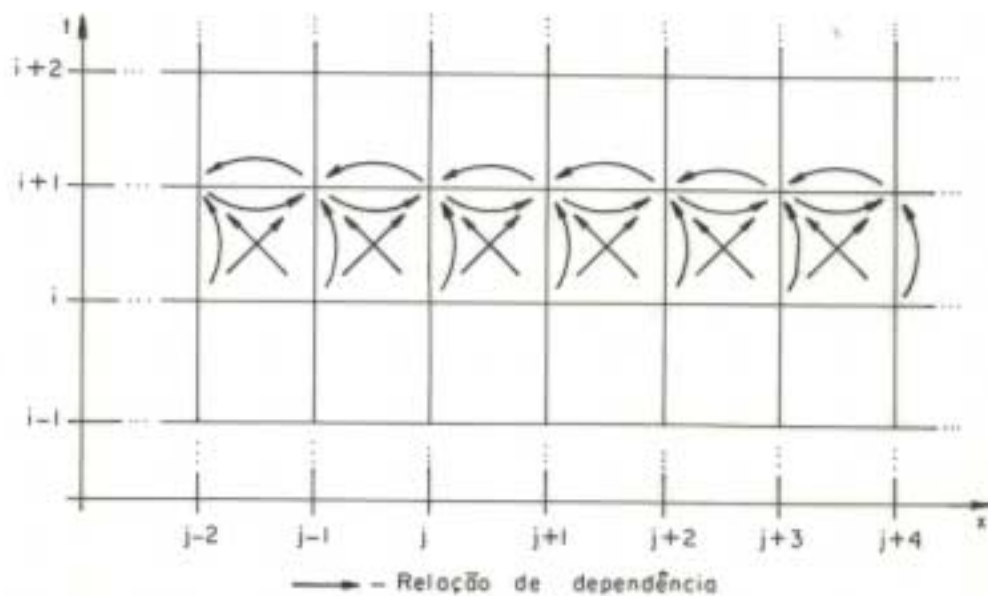


Figura 3.10- Pontos normalmente utilizados para cálculo através das diferenças finitas implícitas (baseado em LIGGETT e CUNGE[1975])

Segundo LIN e GOODWIN[1987] os valores de  $\theta$  e  $\sigma$  devem estar entre 0,5 e 1,0 para garantir a estabilidade do método, com melhores resultados com o valor de  $\theta$  superior a 0,60 (LIGGETT e CUNGE[1975]). MUSKATIROVIK e KAPOR[1985] propõem a utilização de um valor mais elevado de  $\theta$  (em torno de 0,80) nos primeiros instantes de tempo após a ruptura.

A solução de um problema de escoamento não-permanente em canais com a utilização de um método de diferenças finitas

implícito é realizada de uma só vez, através da solução de um sistema de equações não-lineares (em princípio  $2N \times 2N$ , onde  $N$  é o número de nós da malha) único para cada instante de tempo; os resultados não são, portanto independentes, pois dependem das propriedades em todos os pontos da malha, na linha de tempo anterior e, também, na linha de tempo posterior.

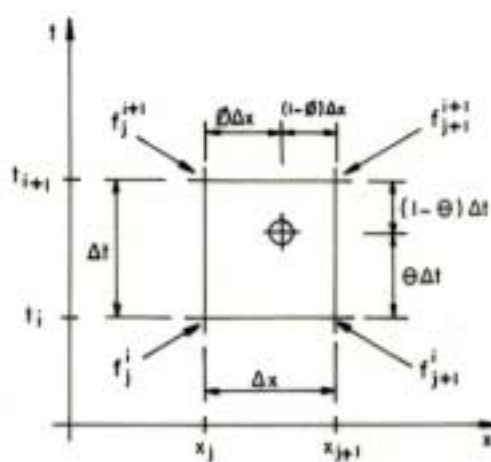


Figura 3.11 - Definição dos parâmetros para aplicação do esquema de Preissmann generalizado (LIN e GOODWIN[1987]).

### 3.4.3 - Modelos numéricos utilizando o método dos elementos finitos

O método dos elementos finitos é muito utilizado para a solução aproximada de equações diferenciais, e consiste em encontrar funções de interpolação das variáveis válidas em intervalos espaciais pré-definidos, os chamados elementos finitos. Entretanto, para os problemas com descontinuidades (como

é o caso da frente de onda gerada pela ruptura de um barragem) o método convencional dos elementos finitos não é aplicável. KATOPODES[1984] apresenta uma forma alternativa para as funções de interpolação que permite capturar descontinuidades no escoamento. DZIEDZIC[1988] apresentou este método de forma computacional aplicado a diversos exemplos em canal retangular. A utilização deste método, entretanto, ainda é acadêmica, necessitando aprimoramentos matemáticos.

### 3.5 - Onda de Choque

#### 3.5.1 Introdução

A onda gerada pela ruptura de uma barragem é uma onda solitária de grandes dimensões (celeridade, velocidade e profundidade). O estudo da sua formação e desenvolvimento pode ser realizado através de métodos analíticos (em casos especiais) ou numéricos (em casos reais). A ocorrência de choques em escoamentos de fluidos é descrita matematicamente em CUNGE et al.[1980]. A demonstração provém da natureza física do fenômeno, que conduz a equações diferenciais hiperbólicas (as equações de Saint-Venant); na região do espaço e do tempo onde ocorre o choque, as equações não mais admitem uma solução única. Assim, na região vizinha ao choque, as hipóteses básicas utilizadas na dedução das equações de Saint-Venant não são mais válidas (principalmente a hipótese de distribuição

hidrostática de pressões) e devemos utilizar outras equações que melhor representem o fenômeno e que façam a conexão entre as soluções descontínuas no espaço obtidas pelas equações de Saint-Venant aplicadas separadamente a montante e a jusante do choque.

Neste item serão comentados os métodos analíticos e um método numérico para solução desse problema.

### 3.5.2 - Modelos Analíticos

Os modelos analíticos para o estudo da onda provocada pela ruptura de uma barragem tratam de casos muito particulares. Na literatura encontramos muitos modelos deste tipo, que diferem basicamente pela ocorrência de ruptura em leito seco ou submerso a jusante. Dentre os modelos para leito seco a jusante podemos destacar os propostos por Ritter, em 1892, e Whitham, em 1955, como mostrado por YEVJEVICH[1975], e o método de SAKKAS e STRELKOFF[1973]. Para leitos submersos a jusante, o método mais tradicional é o proposto por STOKER[1957]. A seguir analisaremos esses métodos de maneira concisa.

#### Método de Ritter

É o mais antigo método proposto para o estudo da onda resultante da ruptura de uma barragem. Ele parte da retirada

gradual e com velocidade constante, no sentido do escoamento (de montante para jusante), de um obstáculo existente no leito do rio (ver figura 3.12.a). Suas hipóteses básicas são:

- contribuição lateral nula;
- Canal retangular com fundo horizontal e sem resistência;
- Abertura total (na largura), com retirada do obstáculo a velocidade constante.

No caso de ruptura de uma barragem, o obstáculo é retirado com grande velocidade, não interferindo no escoamento. A frente de onda avança no leito seco a jusante com velocidade igual ao dobro da celeridade inicial e a onda negativa (a que se desloca para montante) possui velocidade igual à celeridade (ver figura 3.12.b). A velocidade de retirada (simbolizada pela letra  $w$ ) deve ser assumida maior ou igual a duas vezes a celeridade da onda, isto é:

$$w \geq 2 \cdot \sqrt{g \cdot h_1} \quad (3.9)$$

Devido a estas simplificações, o perfil da superfície livre resulta parabólico, seguindo as equações:

$$\left\{ \begin{array}{l} v(x, t) = \frac{2}{3} \cdot \left( \frac{x}{t} + \sqrt{g \cdot h_1} \right) \end{array} \right. \quad (3.10.A)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} h(x, t) = \frac{1}{9 \cdot g} \cdot \left( 2 \cdot \sqrt{g \cdot h_1} - \frac{x}{t} \right)^2 \end{array} \right. \quad (3.10.B)$$

Na seção da barragem ( $x = 0$ ) teremos escoamento permanente, com profundidade e velocidade constantes fornecidos pelas relações:

$$\begin{cases} h(0, t) = \frac{4}{9} \cdot h_1 & (3.11.A) \\ v(0, t) = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{g \cdot h_1} & (3.11.B) \end{cases}$$

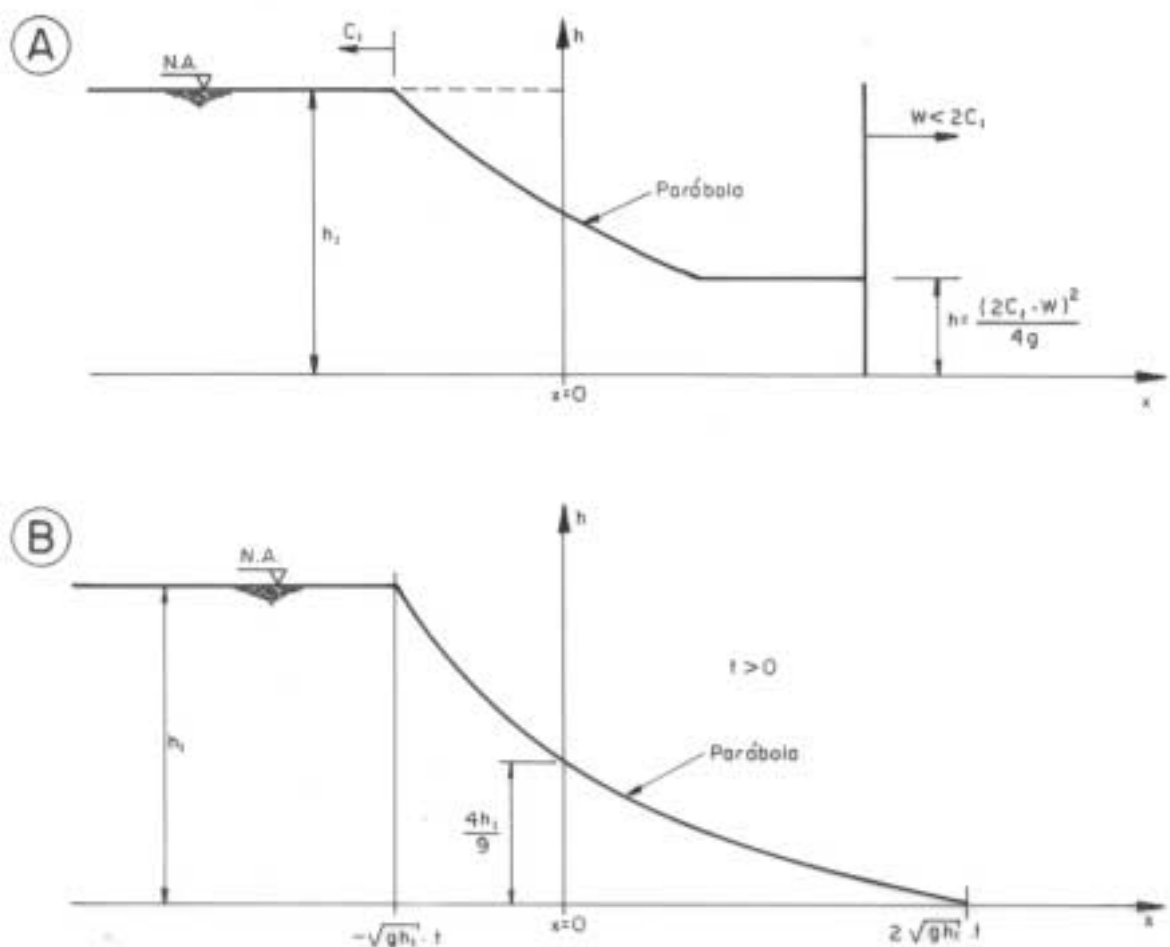


Figura 3.12 - Solução de Ritter para a remoção total de uma parede retangular; a retirada é a) "gradual" ou b) "instantânea" (HENDERSON[1966] e MASCARENHAS[1990]).

### Método de Sakkas e Strelkoff

Este método amplia o campo de aplicação do método de Ritter para canais que possuam variação da largura com a profundidade dada pela expressão (ver figura 3.13):

$$B = k \cdot h^M \quad (3.12)$$

onde:

$B$  - largura da seção transversal na profundidade  $h$  (m);

$k, M$  - constantes para cada tipo de canal estudado:

retangular:  $k = B, M = 0$ ;

parabólico:  $k$  e  $M$  quaisquer;

triangular:  $k = 2 \cdot \text{tg}(\alpha/2); M = 1$ .

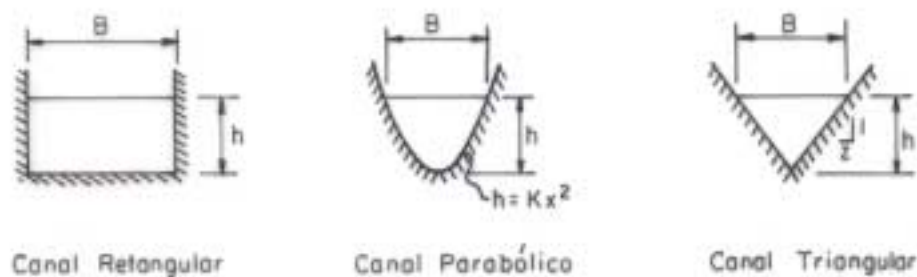


Figura 3.13 - Geometria das seções transversais- método de Sakkas e Strelkoff (SAKKAS e STRELKOFF[1973]).

As equações de Ritter (equações 3.10.A e 3.10.B) transformam-se em:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{v}{c_1} = \left( \frac{2 \cdot M + 2}{2 \cdot M + 3} \right) \cdot \left( 1 + \frac{x}{c_1 \cdot t} \right) \end{array} \right. \quad (3.13.A)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{h}{h_1} = \left( \frac{2 \cdot M + 2}{2 \cdot M + 3} \right) \cdot \left( 1 - \frac{x}{w_1 \cdot t} \right)^2 \end{array} \right. \quad (3.13.B)$$

A celeridade a montante ( $c_1$ ) e a velocidade da onda ( $w_1$ ) são calculadas pelas fórmulas:

$$c_1 = \sqrt{\frac{h_1 \cdot g}{M + 1}} \quad (3.14)$$

$$w_1 = 2 \cdot (M + 1) \cdot c_1 \quad (3.15)$$

Na seção original da barragem ( $x = 0$ ), o escoamento é permanente, e segue as relações:

$$\left\{ \begin{array}{l} h(0, t) = h_1 \cdot \left( \frac{M + 1}{M + \frac{3}{2}} \right)^2 \end{array} \right. \quad (3.16.A)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Q(0, t) = A_1 \cdot c_1 \cdot \left( \frac{M + 1}{M + \frac{3}{2}} \right)^{2M+3} \end{array} \right. \quad (3.16.B)$$

- Método de Whitham

Este método é também derivado do método de Ritter, porém analisa o efeito da rugosidade do fundo no deslocamento e no formato da frente de onda. Witham (ver YEVJEVICH[1975]) conclui que esse efeito está restrito a uma pequena região chamada frontal (ver figura 3.14).

O estudo parte da análise da quantidade de movimento da frente de onda, a qual segue a equação:

$$M \cdot \frac{du}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot H^2 - \rho \cdot R \cdot u^2 \cdot (\xi - \varepsilon) \quad (3.17)$$

onde:

$\xi$ ,  $\varepsilon$  - coordenadas limites (inicial e final) da região frontal da onda (m);

$H$  - profundidade do escoamento no início da região frontal (m);

$R$  - número de Chézy adimensional, calculado por

$$R = \frac{g}{C^2}$$

onde  $C$  é o coeficiente de Chézy convencional ( $m^{1/2} \cdot s^{-1}$ );

$u = \frac{d\xi}{dt}$ , velocidade do escoamento no início da região frontal (m/s);

$M$  - massa contida na região frontal da onda, calculada pela expressão:

$$M = \int_0^t \rho \cdot H \cdot \left( u - \frac{d\varepsilon}{dt} \right) \cdot dt \quad (3.18)$$

Estas equações, somadas às equações de Ritter (equações 3.10.A e 3.10.B), nos fornecem os valores de  $\xi$ ,  $\varepsilon$ ,  $u$  e  $H$ .

YEVJEVICH[1975], citando um trabalho de Kalkanis, restringe o uso deste método à região delimitada por  $R.T \leq 0,3$ , onde:

T - tempo adimensional, adimensionalizado pela equação:

$$T = t \cdot \sqrt{g/h_1}$$

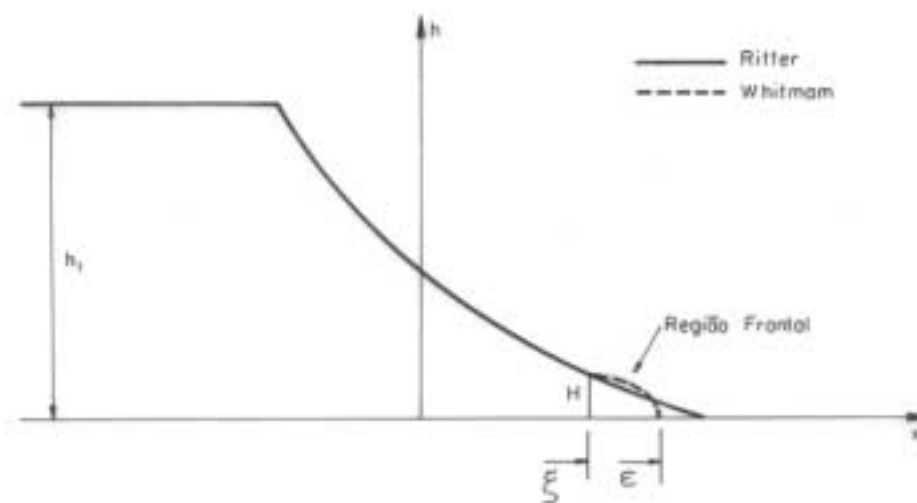


Figura 3.14 - Comparação entre a solução de Ritter e a de Whitman (YEVJEVICH[1975] e MASCARENHAS[1990]).

#### Método de Stoker

É outro método derivado do método de Ritter, porém admite escoamento e, portanto, profundidade a jusante da barragem no instante inicial da ruptura (ver figura 3.15).

Neste método, devido ao nível de água a jusante, forma-se uma onda semelhante a um ressalto hidráulico móvel, e cujas características são calculadas a partir da solução do sistema de equações não-lineares abaixo:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{(w - v_4)^2}{g \cdot h_4} = \frac{1}{2} \cdot \frac{h_3}{h_4} \cdot \left( \frac{h_3}{h_4} + 1 \right) \\ (w - v_4) \cdot h_4 = (w - v_3) \cdot h_3 \\ v_3 = -2 \cdot \sqrt{g \cdot h_3} + v_1 + 2 \cdot \sqrt{g \cdot h_1} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (3.19.A) \\ (3.19.B) \\ (3.19.C) \end{array}$$

onde:

w - celeridade da onda de choque (m/s).

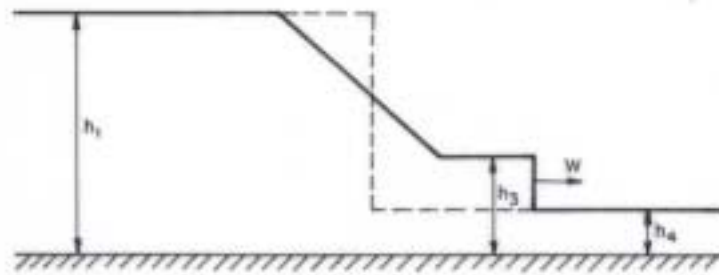


Figura 3.15 - Perfil longitudinal para os tempos  
t=0 (---) e t>0 (—) - Método de Stoker  
(TOWNSON e AL-SAHILI[1989]).

As equações 3.19 representam a conservação da quantidade de movimento (3.19.A) e da massa (3.19.B), juntamente com a equação da característica positiva(3.19.C).

O escoamento na seção primitiva da barragem será permanente se  $0 \leq h_4 / h_1 \leq 0,138$ . Neste caso, a profundidade e a velocidade nessa seção são obtidas através das equações de Ritter aplicadas à seção da barragem (equações 3.11.A e 3.11.B). Caso  $h_4 / h_1 > 0,138$ , a vazão, a velocidade e a profundidade tornam-se função de  $h_4$  (STOKER[1957]). STOKER[1957] apresenta, ainda, uma relação gráfica entre a altura da onda ( $h_3-h_4$ ) e a profundidade a montante da barragem antes da ruptura ( $h_1$ ); esta relação é máxima (e igual a  $0,32.h_1$ ) para  $h_4 / h_1 = 0,176$ .

### 3.5.3 - Onda de choque provocada pela ruptura de barragem- Método numérico (equações de Hugoniot-Rankine)

A onda gerada pela ruptura de uma barragem é uma onda solitária e abrupta, ao contrário de uma onda de enchente natural. No caso da onda abrupta, a hipótese de distribuição hidrostática de pressões adotada nas equações de Saint-Venant não é mais válida, devido ao aparecimento de grandes acelerações verticais.

A abordagem desse problema é complexa, tanto física como matematicamente. Podemos, entretanto, analisar este fenômeno como um ressalto hidráulico móvel em um canal. As equações resultantes desta análise são conhecidas como equações de Hugoniot-Rankine, e são apresentadas por STOKER[1957] e MASCARENHAS[1990] aplicadas a escoamentos não-permanentes de fluidos reais incompressíveis da seguinte forma:

$$\left\{ w - \frac{A_1(h_1) \cdot v_1 - A_2(h_2) \cdot v_2}{A_1(h_1) - A_2(h_2)} = 0 \right. \quad (3.20.A)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (v_1 - v_2) - [A_1(h_1) - A_2(h_2)] \cdot \dots \\ \dots \cdot \left\{ \frac{g}{A_1(h_1) \cdot A_2(h_2)} \cdot \frac{A_1(h_1) \cdot \bar{h}_1 - A_2(h_2) \cdot \bar{h}_2}{A_1(h_1) - A_2(h_2)} \right\}^{\frac{1}{2}} \end{array} \right\} = 0 \quad (3.20.B)$$

onde:

$\bar{h}$  - profundidade do centro de pressão em relação à superfície livre (m);

$\xi$  - coordenada espacial do choque em relação à posição inicial da barragem (m);

$w = \frac{d\xi}{dt}$  , é a variação da posição do choque no tempo (m/s).

Os índices 1 e 2 referem-se às seções transversais a montante e a jusante do choque, respectivamente. O sistema acima (equações 3.20.A e 3.20.B) possui 2 equações e 5 incógnitas

( $v_1$ ,  $v_2$ ,  $h_1$ ,  $h_2$  e  $\theta$ ). TOWNSON e AL-SAHILI[1989] propõem uma abordagem para esse problema, a qual é apresentada a seguir.

Às duas equações acima descritas (3.20.A e 3.20.B) deve-se acrescentar uma equação característica positiva, para transportar as condições de montante do choque e duas características a jusante, uma positiva e outra negativa (ver item 3.4). Essas linhas características são apresentadas na figura 3.16, com as características partindo dos pontos M (a montante) e L e R (a jusante).

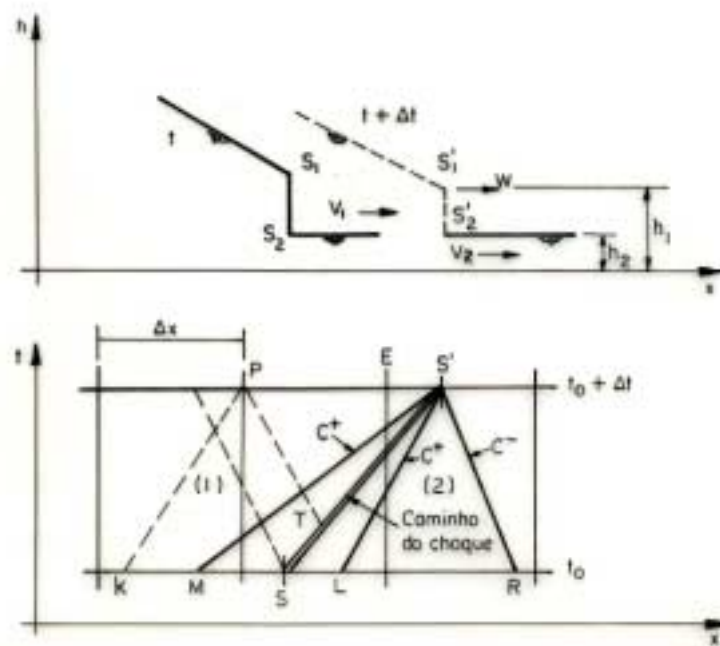


Figura 3.16 - Localização da frente de onda e as linhas características associadas: (a) plano físico; (b) plano  $x-t$  (TOWNSON e AL-SAHILI[1989]).

Devem-se acrescentar, ainda, as equações de interpolação linear dos valores da velocidade e da profundidade ( $v$  e  $h$ ) nos pontos M, L e R, conduzindo a dois sistemas de equações não lineares; um sistema de 8 equações e 8 incógnitas e outro de 6 equações e 6 incógnitas. Essas equações encontram-se apresentadas na seqüência, já inseridas nos dois sistemas de equações 3.21.A a 3.21.H (jusante) e 3.22.A a 3.22.F (montante). A discretização dessas equações para um canal retangular encontra-se no capítulo 3; o método de solução encontra-se no anexo A.2.

Sistema de jusante:

$$\begin{cases} x_L - x_{S'} - \Delta t.(v_L + \alpha_L.\lambda_L^+.D_L) = 0 & (3.21.A) \\ (v_{S_2} + h_{S_2}.\lambda_{S_2}^+) - (v_L + h_L.\lambda_L^+) - F_L^+.\Delta t = 0 & (3.21.B) \\ x_R - x_{S'} - \Delta t.(v_R + \alpha_R.\lambda_R^-.D_R) = 0 & (3.21.C) \\ (v_{S_2} + h_{S_2}.\lambda_{S_2}^-) - (v_R + h_R.\lambda_R^-) - F_R^-. \Delta t = 0 & (3.21.D) \\ (v_L - v_L^a).(x_L^p - x_L^a) - (x_L - x_L^a).(v_L^p - v_L^a) = 0 & (3.21.E) \\ (h_L - h_L^a).(x_L^p - x_L^a) - (x_L - x_L^a).(h_L^p - h_L^a) = 0 & (3.21.F) \\ (v_R - v_R^a).(x_R^p - x_R^a) - (x_R - x_R^a).(v_R^p - v_R^a) = 0 & (3.21.G) \\ (h_R - h_R^a).(x_R^p - x_R^a) - (x_R - x_R^a).(h_R^p - h_R^a) = 0 & (3.21.H) \end{cases}$$

Sistema de montante:

$$\begin{cases} x_M - x_{S'} - \Delta t.(v_M + \alpha_M.\lambda_M^+.D_M) = 0 & (3.22.A) \\ (v_{S_1} + h_{S_1}.\lambda_{S_1}^+) - (v_M + h_M.\lambda_M^+) - F_M^+.\Delta t = 0 & (3.22.B) \\ (v_M - v_M^a).(x_M^p - x_M^a) - (x_M - x_M^a).(v_M^p - v_M^a) = 0 & (3.22.C) \\ (h_M - h_M^a).(x_M^p - x_M^a) - (x_M - x_M^a).(h_M^p - h_M^a) = 0 & (3.22.D) \\ w.(A_{S_1} - A_{S_2}) - (A_{S_1}.v_{S_1} - A_{S_2}.v_{S_2}) = 0 & (3.22.E) \\ w - v_{S_2} - \sqrt{g \cdot \frac{A_{S_1}}{A_{S_2}} \cdot \frac{A_{S_1}.\bar{h}_{S_1} - A_{S_2}.\bar{h}_{S_2}}{A_{S_1} - A_{S_2}}} = 0 & (3.22.F) \end{cases}$$

Os valores das funções  $\lambda_i^\pm$  e  $F_i^\pm$  são calculados através das equações 3.6.A e 3.6.B. Esses dois sistemas são resolvidos iterativamente, até que a celeridade convirja (e que calcule a posição do choque no tempo  $i + 1$  -  $x_{S'}^{(n+1)}$ ). A posição do choque é calculada pela equação:

$$x_{S_{i+1}}^{(n+1)} = x_{S_i}^{(n)} + w^{(n)} \cdot \Delta t \quad (3.23)$$

onde  $n$  representa o número da iteração.

Equações análogas às equações de Hugoniot-Rankine podem ser deduzidas para escoamento de uma onda de choque em fluidos compressíveis.

## CAPÍTULO 4

### MODELO ADOTADO / PROGRAMA COMPUTACIONAL PROPOSTO

Neste capítulo será comentado o método adotado para abordar o problema do acompanhamento da frente de onda gerada pela ruptura instantânea de uma barragem, bem como o programa computacional proposto. A partir desse ponto, a análise se restringirá a escoamentos em canais retangulares longos, com declividade longitudinal, rugosidade e condições de contorno constantes a montante e a jusante.

#### 4.1 - Programa ANALITIC

O programa ANALITIC foi desenvolvido para realizar uma análise analítica do escoamento no instante imediatamente após a ocorrência da ruptura nos casos onde se considera a resistência do escoamento e para todos os instantes nos casos considerados ideais (escoamento sem resistência e canal horizontal). Para calcular a onda no primeiro instante de tempo a rotina foi ajustada e incorporada ao programa ROTRET. Foram utilizados os métodos de Ritter e de Stoker, caso o canal possua, respectivamente, leito seco ou submerso a jusante. A descrição do método encontra-se no capítulo 3 (item 3.5) e a listagem do programa encontra-se no Anexo B. O anexo C.1 contém um manual compacto de consulta para utilização do programa ANALITIC.

#### 4.2. Modelo Computacional Adotado para o programa ROTRET

O enfoque adotado para o desenvolvimento do modelo foi o do ajuste do choque, como citado na item 3.3. Segundo MASCARENHAS[1990] este método possui como vantagens a maior proximidade com a realidade física e a não necessidade de criação e indução de características matemáticas artificiais. Sua desvantagem é a maior complexibilidade inerente ao tratamento de problemas com fronteiras móveis. O método de cálculo encontra-se detalhada em MASCARENHAS[1990], AMEIN[1977] e ON e LICH[1990], porém com equações e soluções diferentes entre si. Neste trabalho foram utilizados partes dos trabalhos acima, em etapas distintas.

O primeiro intervalo de tempo necessita tratamento matemático especial, pois o movimento está se iniciando e possui uma descontinuidade muito grande. Segundo KORDAS e WITKOWSKA[1976], nos segundos iniciais (2,5 segundos) a resistência do contorno não é importante, e a análise pode ser feita como se a ruptura fosse ideal (ver descrição dos métodos analíticos no capítulo 3). Neste trabalho, foi adotado o primeiro intervalo como representado por escoamento ideal (sem respeitar a idéia de tempo inicial igual a 2,5 segundos fixos), fosse ele qual fosse.

O método do ajuste do choque é composto por diversas etapas distintas, que são explicadas na seqüência.

#### 4.2.a. Primeiro intervalo

O primeiro intervalo de tempo será calculado como se ocorresse escoamento de fluido ideal durante a ruptura (sem resistência), utilizando um método analítico. Como normalmente existe escoamento quando da ruptura (pelo vertedouro ou pela(s) turbina(s)), podemos considerar a ruptura como se esta ocorresse em leito molhado a jusante, o que é resolvido pelo método de Stoker, descrito no item 3.5 e que pode ser resolvido isoladamente pelo programa ANALITIC, descrito no item 4.1. O método de Stoker para determinação das características da frente de onda gerada pela ruptura de uma barragem com leito molhado a jusante é mostrado no anexo A.3.

Aplicando-se esse método e introduzindo-se arbitrariamente 19 pontos igualmente espaçados na parábola de Ritter (transição entre o reservatório não perturbado e a frente de onda de choque), tem-se condições de calcular profundidades e velocidades nesses pontos afetados pela ruptura. As velocidades são calculadas pelo método de Sakkas e Strelkoff (também descrito no item 3.5) para cálculo do perfil longitudinal em canais com seções transversais especiais (no caso específico deste trabalho, apenas canal retangular).

A partir deste instante, o canal será considerado com resistência, e com a visão focada no método das características, como descrito por AMEIN[1977].

#### 4.2.b. Onda Negativa

A posição da onda de depleção que caminha para montante a partir da posição original da barragem (chamada também de onda negativa) é fornecida por uma linha característica negativa partindo do primeiro ponto da parábola de Ritter (para o segundo passo de tempo) ou da posição da onda negativa no instante anterior (para as etapas posteriores de cálculo). Esta onda limita a região afetada pelo choque a montante, como pode ser visto na figura 4.1 que contém, também, os pontos utilizados no cálculo. Sua posição é calculada por uma característica negativa, com posição conhecida no instante anterior, associada à condições iniciais (anteriores à ruptura), visto que a montante da onda negativa o escoamento é permanente (hipótese adotada neste trabalho).

A localização ( $x_P$ ) é arbitrada inicialmente em função das condições no instante anterior apenas (posição R):

$$(x_P - x_R) = (v_R - \sqrt{g \cdot h_R}) \cdot \Delta t \quad (4.1)$$

Os valores de  $v_P$  e  $h_P$  são calculados por interpolação linear, utilizando as equações:

$$\frac{(v_P - v_P^a)}{(v_P^b - v_P^a)} = \frac{(x_P - x_P^a)}{(x_P^b - x_P^a)} \quad (4.2)$$

$$\frac{(h_P - h_P^a)}{(h_P^b - h_P^a)} = \frac{(x_P - x_P^a)}{(x_P^b - x_P^a)} \quad (4.3)$$

A nova aproximação para  $x_p$  é então calculada levando em conta os valores nos dois pontos (discretização implícita):

$$(x_P - x_R) = \left\{ (v_R - \sqrt{g \cdot h_R}) + (v_P - \sqrt{g \cdot h_P}) \right\} \cdot \Delta t / 2 \quad (4.4)$$

Com o uso das equações 4.2 e 4.3, os valores de  $v_p$  e  $h_p$  são recalculados, até se obter a precisão desejada.

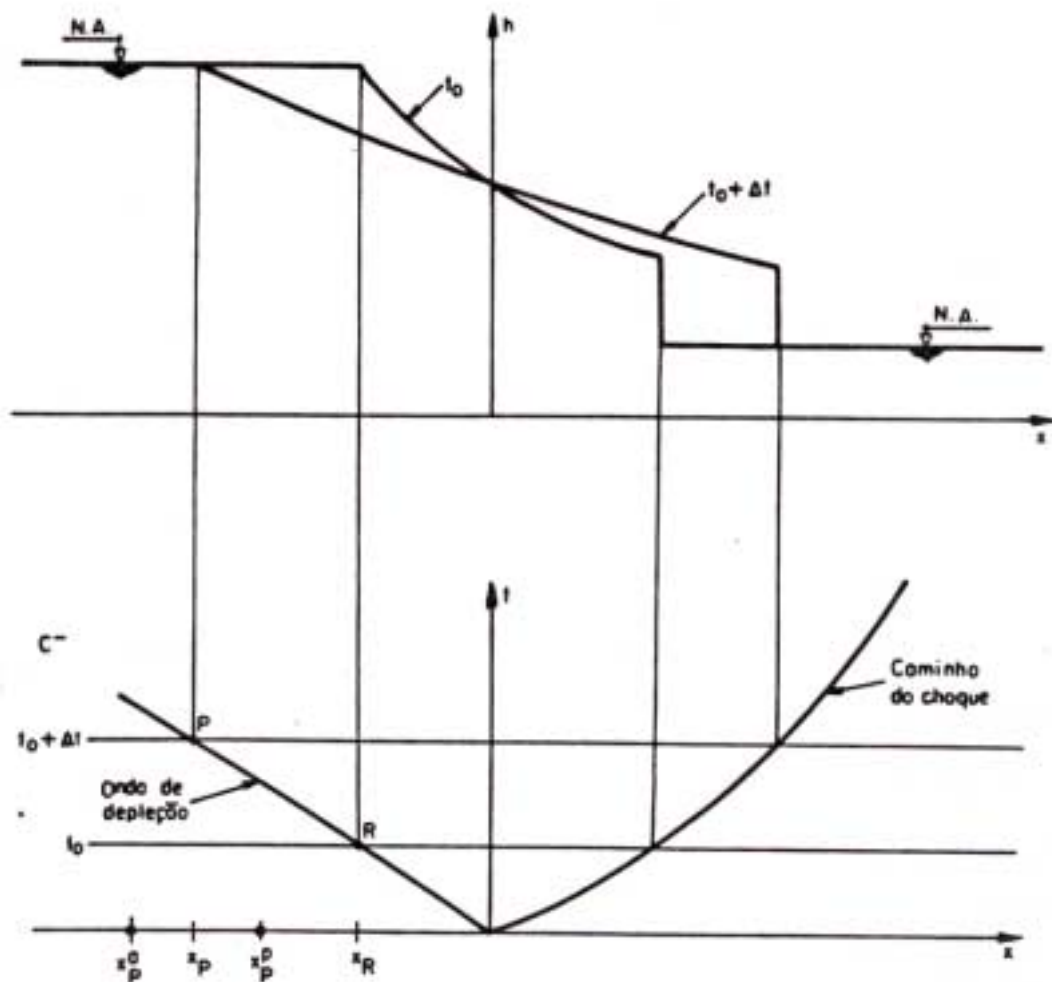


Figura 4.1 - Representação do desenvolvimento do choque nos planos x-t e x-h, mostrando a onda de depleção.

#### 4.2.c. Ajuste do choque

Na seqüência, determina-se a posição da frente de choque, a partir do conhecimento de sua posição no instante de tempo anterior e das características do canal e do escoamento na sua vizinhança no instante de tempo desconhecido. Para isto são adotados 3 pares de equações características (2 a jusante e 1 a montante- são utilizadas as equações das declividades e as equações equivalentes aos Invariantes de Riemann para o caso de escoamento sem perda de energia), 6 equações de interpolação (velocidade e profundidade em cada um dos 3 pontos de onde partem as características- M a montante e L e R a jusante) e as duas equações de Hugoniot-Rankine. A figura 4.2 mostra a localização dos pontos no plano real ou geométrico (plano  $x-h$ ) e no plano espaço-tempo (plano  $x-t$ ). O item 3.5 descreve esse método aplicado a um canal com seção qualquer.

Este processo, proposto por TOWNSON e AL-SAHILI[1989], conduz aos sistemas de equações apresentados na seqüência para o caso de canal retangular (sistemas de montante e de jusante), cujas discretizações para solução encontram-se no Anexo A.2. Os superíndices  $a$  e  $p$  indicam que a variável é calculada no ponto anterior ou posterior do intervalo que contém o ponto indicado no subíndice. Os superíndices  $J$  e  $M$  indicam que a variável é calculada a jusante ou a montante do choque.

Sistema de jusante:

$$x_L - x_{s_{i+1}} = (v_L + \sqrt{g \cdot h_L}) \cdot \Delta t \quad (4.5.A)$$

$$\left( v_{s_{i+1}}^J + 2 \sqrt{g \cdot h_{s_{i+1}}^J} \right) - (v_L + 2 \sqrt{g \cdot h_L}) = g \cdot (t_{s_{i+1}} - t_L) \cdot \left( S_0 - \frac{S_{f_{s_{i+1}}}^J + S_{f_L}}{2} \right) \quad (4.5.B)$$

$$x_r - x_{s_{i+1}} = (v_r - \sqrt{g \cdot h_r}) \cdot \Delta t \quad (4.5.C)$$

$$\left( v_{s_{i+1}}^J - 2 \sqrt{g \cdot h_{s_{i+1}}^J} \right) - (v_r - 2 \sqrt{g \cdot h_r}) = g \cdot (t_{s_{i+1}} - t_r) \cdot \left( S_0 - \frac{S_{f_{s_{i+1}}}^J + S_{f_r}}{2} \right) \quad (4.5.D)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{(v_L - v_L^a)}{(v_L^p - v_L^a)} = \frac{(x_L - x_L^a)}{(x_L^p - x_L^a)} \\ \frac{(h_L - h_L^a)}{(h_L^p - h_L^a)} = \frac{(x_L - x_L^a)}{(x_L^p - x_L^a)} \end{array} \right. \quad (4.5.E)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{(v_L - v_L^a)}{(v_L^p - v_L^a)} = \frac{(x_L - x_L^a)}{(x_L^p - x_L^a)} \\ \frac{(h_L - h_L^a)}{(h_L^p - h_L^a)} = \frac{(x_L - x_L^a)}{(x_L^p - x_L^a)} \end{array} \right. \quad (4.5.F)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{(v_R - v_R^a)}{(v_R^p - v_R^a)} = \frac{(x_R - x_R^a)}{(x_R^p - x_R^a)} \\ \frac{(h_R - h_R^a)}{(h_R^p - h_R^a)} = \frac{(x_R - x_R^a)}{(x_R^p - x_R^a)} \end{array} \right. \quad (4.5.G)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{(v_R - v_R^a)}{(v_R^p - v_R^a)} = \frac{(x_R - x_R^a)}{(x_R^p - x_R^a)} \\ \frac{(h_R - h_R^a)}{(h_R^p - h_R^a)} = \frac{(x_R - x_R^a)}{(x_R^p - x_R^a)} \end{array} \right. \quad (4.5.H)$$

Sistema de montante:

$$x_{s_{i+1}} - x_M = \left[ (v_M + \sqrt{g \cdot h_M}) + (v_{s_{i+1}}^M + \sqrt{g \cdot h_{s_{i+1}}^M}) \right] \cdot \frac{(t_{s_{i+1}} - t_M)}{2} \quad (4.6.A)$$

$$\left( v_{s_{i+1}}^M + 2 \sqrt{g \cdot h_{s_{i+1}}^M} \right) - (v_M + 2 \sqrt{g \cdot h_M}) = g \cdot (t_{s_{i+1}} - t_M) \cdot \left( S_0 - \frac{S_{f_{s_{i+1}}}^M + S_{f_M}}{2} \right) \quad (4.6.B)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{(v_M - v_M^a)}{(v_M^p - v_M^a)} = \frac{(x_M - x_M^a)}{(x_M^p - x_M^a)} \\ \frac{(h_M - h_M^a)}{(h_M^p - h_M^a)} = \frac{(x_M - x_M^a)}{(x_M^p - x_M^a)} \end{array} \right. \quad (4.6.C)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{(v_M - v_M^a)}{(v_M^p - v_M^a)} = \frac{(x_M - x_M^a)}{(x_M^p - x_M^a)} \\ \frac{(h_M - h_M^a)}{(h_M^p - h_M^a)} = \frac{(x_M - x_M^a)}{(x_M^p - x_M^a)} \end{array} \right. \quad (4.6.D)$$

$$\begin{aligned} w \cdot (h_{s_{i+1}}^M - h_{s_{i+1}}^J) &= (h_{s_{i+1}}^M \cdot v_{s_{i+1}}^M - h_{s_{i+1}}^J \cdot v_{s_{i+1}}^J) \\ w - v_{s_{i+1}}^J &= \sqrt{\frac{g \cdot h_{s_{i+1}}^M}{2 \cdot h_{s_{i+1}}^J}} \cdot (h_{s_{i+1}}^M - h_{s_{i+1}}^J) \end{aligned} \quad (4.6.E)$$

(4.6.F)

As incógnitas no sistema de jusante são  $x_L$ ,  $x_R$ ,  $v_L$ ,  $v_R$ ,  $h_L$ ,  $h_R$ ,  $v_{S_{i+1}}^J$  e  $h_{S_{i+1}}^J$ , e no sistema de montante são  $x_M$ ,  $v_M$ ,  $h_M$ ,  $w$ ,  $v_{S_{i+1}}^M$  e  $h_{S_{i+1}}^M$ .

A posição do choque é calculada pela equação 3.23 repetida abaixo, e o cálculo é repetido até que uma tolerância previamente arbitrada seja atingida.

$$x_{S_{i+1}}^{(n+1)} = x_{S_i} + w^{(n)} \cdot \Delta t \quad (3.23)$$

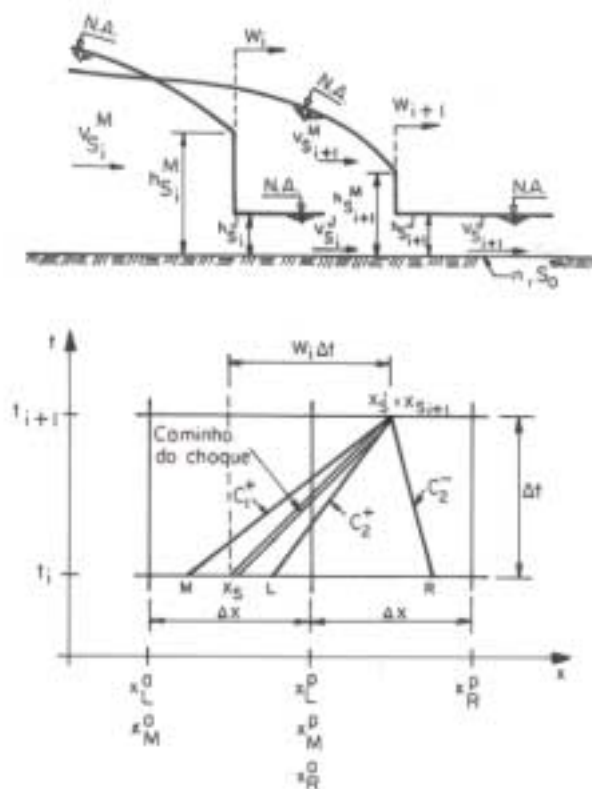


Figura 4.2 - Representação da onda de ruptura no plano real -  $x$ - $h$  e no plano  $x$ - $t$  (CHEN e ARMBRUSTER[1980]).

#### 4.2.d. Escoamento não-permanente

Com o choque já isolado, o processo torna-se um problema normal de escoamento não-permanente a montante do choque. As equações de Saint-Venant, que regem o movimento não-permanente, são escritas como nas equações 3.1.A e 3.1.B, e reproduzidas a seguir:

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + v \cdot \frac{B}{B_s} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{A}{B_s} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{q_L}{B_s} - \frac{v}{B_s} \cdot A_x^h & (3.1.A) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + g \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{q_L \cdot v}{A} = g \cdot (S_0 - S_f) & (3.1.B) \end{cases}$$

A solução destas equações é realizada através do método das características convencional, aplicado aos 19 pontos interpolados com espaçamento constante entre a onda de choque e a onda negativa no reservatório (ver os itens 4.2.b e 4.2.c).

O método das características é aplicado entre três pontos, sendo dois deles localizados em linha de tempo anterior, portanto com variáveis conhecidas (pontos L e R), mas dos quais não se conhece a posição exata, e um (ponto P) na linha de tempo posterior do qual se conhece a posição, mas onde a velocidade e a profundidade são desconhecidos.

Os pontos conhecidos são localizados em uma das três linhas abaixo (figura 4.3):

- Característica negativa que representa a onda de depleção do reservatório;
- O caminho da onda de ruptura da barragem; ou
- A linha de tempo anterior já conhecida.

As equações características para um canal retangular com largura, declividade e rugosidade constantes, possui a sua solução segundo LIGGETT e CUNGE[1975] apresentada no anexo A.4, com os pontos intermediários mostrados na figura 4.3.

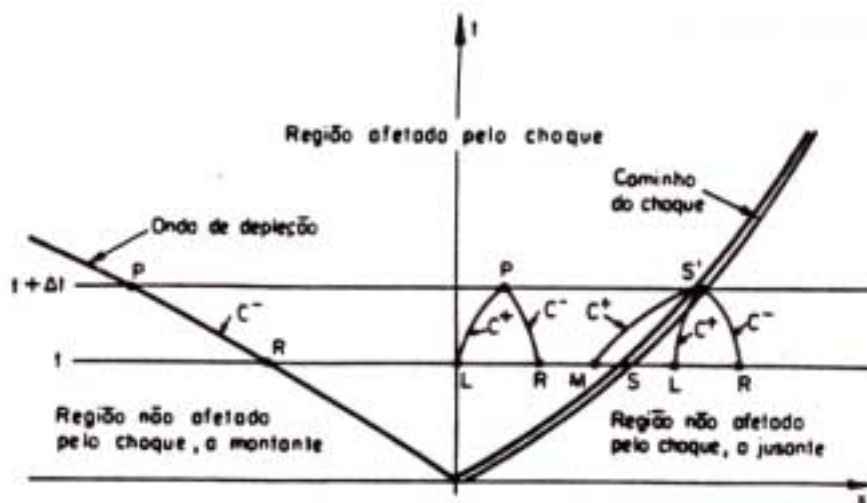


Figura 4.3 - Representação do desenvolvimento das ondas positiva e negativa no plano  $x-t$  e localização dos pontos intermediários.

#### 4.2.e. Escoamento Crítico

Após a ruptura, existe o estabelecimento de escoamento supercrítico a montante da onda de ruptura, como afirmado por TOWNSON e AL-SAHILI[1989], e que pode ser comprovado calculando-se o número de Froude a montante do choque,

utilizando informações do método analítico de Sakkas e Strelkoff (ver item 3.4) aplicado a um canal retangular de largura constante. Assim:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}} = \frac{1 + \frac{x}{t \cdot \sqrt{g \cdot h_1}}}{1 - \frac{x}{2 \cdot t \cdot \sqrt{g \cdot h_1}}} \geq 1, \text{ por definição, pois } x, t, h_1 \geq 0.$$

Portanto, entre a onda de choque (escoamento supercrítico) e o reservatório não perturbado (escoamento subcrítico), ocorrerá o escoamento crítico. ABBOTT[1975] mostra que as características negativas invertem suas declividades nessa transição de escoamento subcrítico para supercrítico (ver figura 4.4). O escoamento crítico localiza-se no ponto onde a característica negativa possui tangente vertical (ver figura 4.5, baseada nos trabalhos de FAURE e NAHAS[1961] e de AMEIN[1977]).

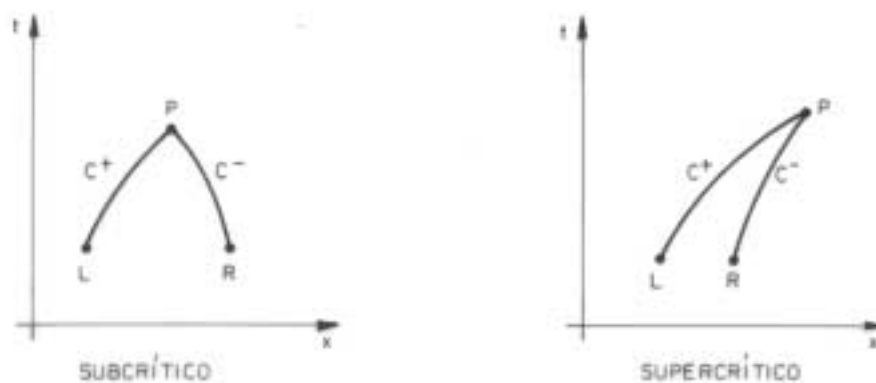


Figura 4.4 - Inclinações das linhas características  
(ABBOTT[1975] e CHEN e ARMBRUSTER[1980]).

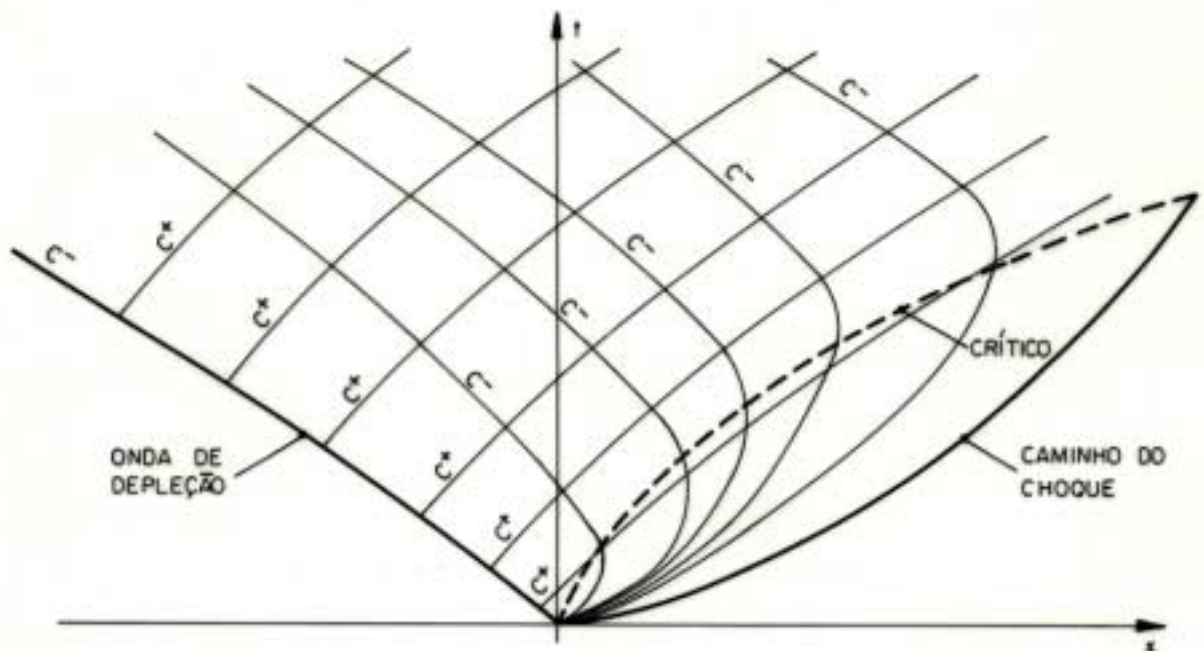


Figura 4.5 - Localização do escoamento crítico  
(baseado em FAURE e NAHAS[1961]).

O escoamento ao longo do canal tende, após o desaparecimento do choque, a se tornar um escoamento de uma onda de enchente convencional (governado exclusivamente pelas equações de Saint-Venant). Como as barragens são normalmente construídas em canais naturais subcríticos, os trechos de escoamento crítico e supercrítico tendem a desaparecer. Para que isto aconteça, o escoamento crítico aproxima-se da frente de onda e, quando o encontro ocorre, todo o canal torna-se subcrítico (durante um certo tempo, o escoamento na frente de onda é crítico). A partir do ponto que o escoamento crítico atinge a frente de choque, o programa considera que o escoamento crítico não mais existe e imprime um valor absurdo como marca desse fato (valor nulo para todas as variáveis). O

escoamento no canal após o encontro do caminho do escoamento crítico com a frente de choque continua até a dissipação do choque, porém sem uma região de escoamento supercrítico. Tal fato não ocorre em canal com escoamento supercrítico.

#### 4.2.f. Armazenamento e preparação para nova iteração

Com os valores de velocidades e profundidades calculados em todos os pontos igualmente espaçados no tempo inicialmente desconhecido, parte-se para um novo instante de tempo, após armazenar os valores calculados em um arquivo para posterior análise.

#### 4.2.g. Cálculo continuado

Após a dissipação do choque, os passos 4.2.a a 4.2.f são desconsiderados, pois as equações de Saint-Venant passam a ser aplicáveis a todo o canal; o método numérico utilizado para solução é o das características (ver anexo A.1).

O choque é considerado dissipado quando a profundidade a montante for superior à de jusante em valor menor que 5 %.

### 4.3- Programa Computacional Proposto

Para aplicar o método proposto para análise da onda gerada pela ruptura instantânea de uma barragem em um canal retangular

com declividade longitudinal, rugosidade e condições de contorno constantes no tempo, foi desenvolvido um programa computacional para micro-computador (padrão IBM PC-AT), em linguagem Turbo-Pascal (escolhida por ser familiar ao autor e permitir rapidez de programação, além da elaboração de uma interface amigável).

A estrutura básica do programa encontra-se identificada nos fluxogramas das figuras 4.6 e 4.7.

O programa divide-se em 46 "procedures" e 1 "function", cujos objetivos são descritos na própria listagem do programa, a qual encontra-se o Anexo B. O programa é composto de uma rotina principal (ROTRET) e cinco unidades, cada uma sendo um arquivo responsável por funções específicas, como pode ser visualizado na tabela 4.1. O anexo C.2 contém um manual compacto de referência para utilização do programa ROTRET.

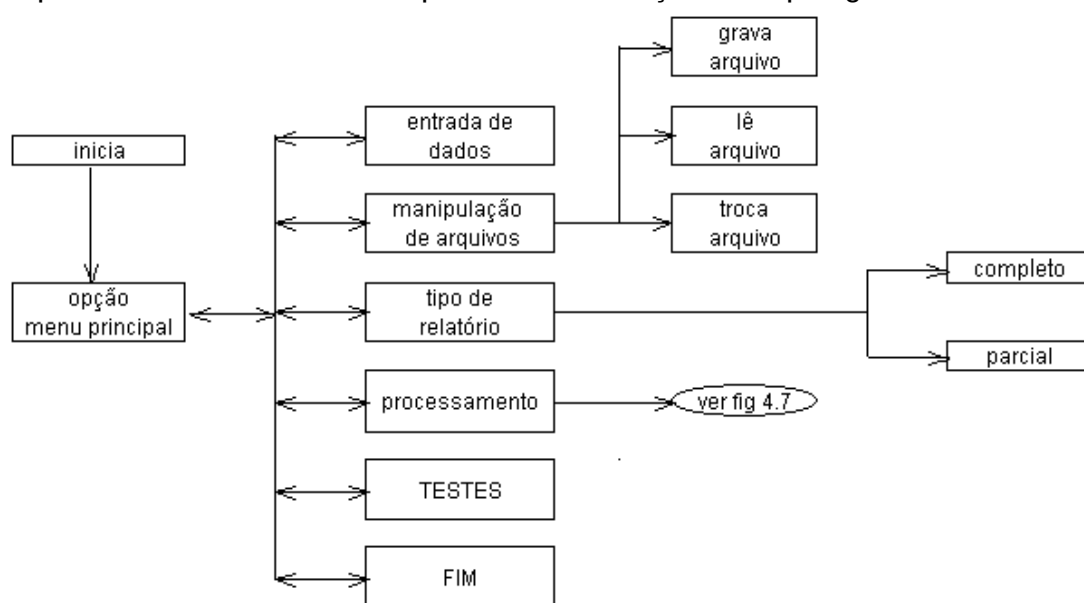


Figura 4.6 - Fluxograma do programa principal.

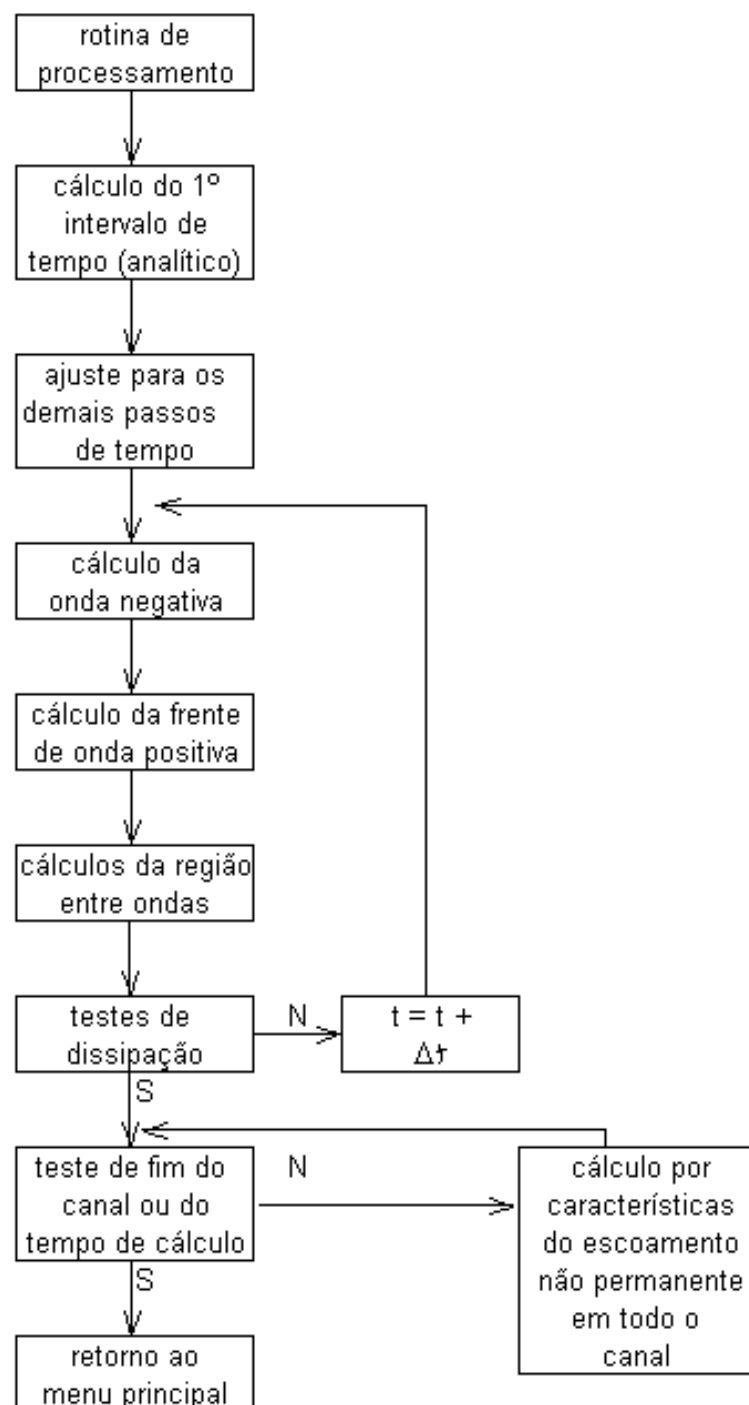


Figura 4.7 - Fluxograma do procedimento de cálculo propriamente dito.

Tabela 4.1 - Descrição das unidades componentes do programa ROTRET

| Unidade | Objetivo                                                                                                                                                                                                      |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| BASICA  | Definições gerais e BÁSICAS; funções matemáticas simples; permite acesso às rotinas de entrada e saída de dados, manipulação de arquivos e ao processamento.                                                  |
| PROC    | PROCessa o cálculo das condições do escoamento pelo método das características aplicado às equações de Saint-Venant na região afetada pelo choque; armazena os resultados e acessa as "Units" Onda e Resolve. |
| ONDA    | Processa os cálculos da primeira onda; calcula a localização e as características da ONDA, pelas equações de Hugoniot-Rankine.                                                                                |
| RESOLVE | RESOLVE o escoamento não-permanente, com o choque já dissipado. O método utilizado é o das características.                                                                                                   |
| TESTES  | É uma unidade para realização de TESTES em partes específicas do programa, encontrando-se atualmente sem função.                                                                                              |

## CAPÍTULO 5

### APLICAÇÕES

#### 5.1 - Generalidades

O programa computacional foi desenvolvido de acordo com o exposto no capítulo 4 e no adendo A e foi aplicado a dois casos constantes da literatura e a um caso de ruptura de uma barragem hipotética; os dados fornecidos e os resultados obtidos são aqui comentados. A listagem do programa está contida no anexo B. O anexo C contém um manual compacto de consulta, que explica a operação do programa.

#### 5.2 - Aplicação 1 - Aplicação a um exemplo clássico (apresentado por ON e LICH[1990] e por PASINATO e TUCCI[1992])

ON e LICH[1990] propõem o estudo da onda de ruptura de uma barragem pelo método das características, e apresentam o seu modelo aplicado a um caso comum na literatura, com uma barragem construída em um canal horizontal, sem vazão pelo canal antes da ruptura e considerando ou não a rugosidade do contorno. PASINATO e TUCCI[1992] apresentam um método de diferenças finitas e o aplicam ao mesmo caso proposto por ON e LICH[1990] (velocidade inicial igual a zero). A barragem estudada possui 10 metros de altura, com uma lâmina de água a jusante de 2 m. Adicionalmente, procurou-se quantificar o efeito que alterações

em algumas condições iniciais do problema possam causar. Assim, foram estudados o efeito da existência da vazão (ou velocidade) inicial, admitindo-se uma velocidade a montante de 1 m/s. O efeito da variação da largura do canal no amortecimento da onda foi analisado com as larguras de 2, 5, 20, 50 e 200 m e com a consideração da mesma velocidade inicial em todos os testes (0,5 m/s) ou mantendo a vazão constante (10 m<sup>3</sup>/s). Os resultados do estudo da variação de largura foram comparados com os teóricos -obtidos a partir do programa ANALITIC, também descrito nos capítulos 3 e 4 e nos anexos A e C.

Os dados de entrada utilizados nesse estudo encontram-se na tabela 5.1 seqüente. Nas aplicações do programa ROTRET não foi possível arbitrar o valor da velocidade inicial a montante exatamente igual a zero, por problemas de convergência já no primeiro intervalo de cálculo. Com a adoção de um valor praticamente nulo ( $1 \times 10^{-11}$  m/s) este problema foi resolvido.

#### CASO 1 - Ruptura Ideal

A desconsideração da rugosidade do contorno conduz ao escoamento chamado ideal. A figura 5.1 apresenta os resultados de ON e LICH[1990] comparados aos resultados dos programas ROTRET e ANALITIC, para 4 instantes de tempo (41, 89, 199 e 289 segundos após a ruptura). A figura 5.2 apresenta os resultados do programa ROTRET comparado aos resultados obtidos por PASINATO e TUCCI[1992], decorridos 240 segundos após a ruptura da barragem. Observa-se que o programa ROTRET apresenta

resultados praticamente idênticos aos analíticos, enquanto os resultados de ON e LICH[1990] mostram uma variação da altura da onda e uma inversão na concavidade do perfil longitudinal. Os resultados de PASINATO e TUCCI[1992] apresentam uma suavização do choque, com pequena oscilação a jusante do choque.

Tabela 5.1  
Dados fornecidos ao programa - Aplicação 1

| <i>Variável</i>                            | <i>Valor</i>                                                                                      |
|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| intervalo de tempo entre iterações         | 1 s                                                                                               |
| intervalo espacial                         | 2000 m                                                                                            |
| largura do canal                           | 20 m- casos 1 a 3; variável- casos 4 e 5 (1)                                                      |
| tempo máximo de cálculo                    | 300 s                                                                                             |
| declividade longitudinal do canal          | 0,00 m/m                                                                                          |
| coeficiente de rugosidade de Manning       | 0,0 ou 0,012 m <sup>-1/3</sup> .s (casos 1 a 5)                                                   |
| abscissa do início do canal                | -14000 m                                                                                          |
| abscissa do final do canal                 | 4000 m                                                                                            |
| profundidade a montante da barragem        | 10 m                                                                                              |
| profundidade a jusante da barragem         | 2 m                                                                                               |
| velocidade a montante da barragem          | 1x10 <sup>-11</sup> m/s - casos 1 e 2; 1 m/s - caso 3;<br>0,5 m/s - caso 4; variável - caso 5 (2) |
| número de Courant limite para estabilidade | 1,00                                                                                              |
| número de pontos com condições iniciais    | 4                                                                                                 |
| condições iniciais (x/h):                  | -14000,00/ 10,00<br>0,00/ 10,00<br>0,01/ 2,00<br>4000,00/2,00                                     |
| número de pontos com condições naturais:   | 2                                                                                                 |
| condições naturais (x/h/v):                | -14000,00/ 2,00/ variável(3)<br>4000,00/ 2,00/ variável (3)                                       |
| condição de contorno de montante constante | sim                                                                                               |

Observações:

- (1) Nos casos 4 e 5 foram analisados larguras variáveis de 2, 5, 20, 50 e 200 m.
- (2) A velocidade é ajustada para que a vazão seja de 10 m<sup>3</sup>/s.
- (3) A velocidade é ajustada para manter o escoamento permanente em seu estado inicial.

## CASO 2 - Influência da rugosidade

Em seguida, compara-se o escoamento ideal com o escoamento com resistência ( $n$  igual a  $0,012 \text{ m}^{-1/3}\cdot\text{s}$ ) proposto por ON e LICH[1990]. A figura 5.3 mostra a comparação para quatro instantes de tempo (41, 92, 194 e 297 segundos após a ruptura). Observa-se que o efeito da rugosidade manifesta-se numa diminuição do nível de água na frente de onda, bem como em um retardo na sua chegada. Observa-se, também, que a menor profundidade causa uma redução na celeridade da onda, com os resultados de ON e LICH[1990] ultrapassando os resultados obtidos com a aplicação do modelo ROTRET para o tempo de 297 segundos. Isto ocorre devido à maior perda de energia que ocorre em um escoamento a menor profundidade e maior velocidade.

## CASO 3 - Influência da velocidade inicial

A influência da velocidade inicial do fluxo no perfil longitudinal do escoamento foi estudada impondo-se velocidade inicial a montante da barragem igual a  $1 \text{ m/s}$ ; os resultados são mostrados na figura 5.4, em comparação com o casos 1 ( $v = 0 \text{ m/s}$  e  $n = 0,00 \text{ m}^{-1/3}\cdot\text{s}$ ) e 2 ( $v = 0 \text{ m/s}$  e  $n = 0,012 \text{ m}^{-1/3}\cdot\text{s}$ ). A velocidade inicial possui também no perfil teórico, pois a profundidade é reduzida em função do aumento da velocidade (e da celeridade). Observa-se, também, uma maior dissipação de energia na região da onda, em função do aumento da velocidade

(e da celeridade) e da redução da profundidade; tal fato se manifesta através de uma altura de onda menor e uma maior diferença na posição do choque entre os casos com e sem rugosidade.

#### CASO 4 - Influência da largura do canal com velocidade a montante constante

Para analisar a influência da largura do canal na dissipação do choque, foram obtidos resultados com valores de largura variando entre 2 m e 2000 m (6 testes com manutenção da velocidade constante de 0,5 m/s a montante da barragem). A figura 5.5 contém a comparação dos perfis longitudinais obtidos com as seis larguras analisadas, e para o instante de tempo igual a 240 segundos. Observa-se uma maior dissipação do choque para canais mais estreitos. Tal efeito é devido à rugosidade das paredes, a qual se manifesta de maneira mais intensa nos canais estreitos (menor raio hidráulico). A onda de depleção no reservatório não é influenciada pela largura do canal, pois a velocidade (e, portanto, a perda de energia) é constante.

#### CASO 5 - Influência da largura do canal com vazão constante

Nesse caso foi estudado o comportamento da onda de choque com a variação da largura do canal, mantendo-se a vazão constante e igual a 10 m<sup>3</sup>/s (a velocidade diminui com o aumento da largura). A figura 5.6 apresenta esses resultados para o mesmo instante de tempo e para as mesmas seis larguras do caso

4. Observa-se que quando a velocidade se torna bastante reduzida (0,1 m/s para largura de 20 m), a posição do choque passou a não se alterar significativamente, manifestando-se a diferença por uma pequena alteração nas profundidades ao longo do canal. Para uma diferença de 0,14 % na distância percorrida pelo choque, a profundidade é acrescida de 0,33 % e a velocidade de 0,52 % (comparando as larguras de 200 e 2000 m).













### 5.3 - Aplicação 2 - Aplicação ao exemplo do WES, proposto por CHEN[1980] e MASCARENHAS[1990]

Em 1961, o Waterways Experiment Station (WES) realizou diversos ensaios de ruptura de barragens em laboratório, com os resultados obtidos servindo para validação de modelos numéricos, além do estudo de vários casos reais, porém em escala reduzida. CHEN[1980] e MASCARENHAS[1990] apresentam esses resultados graficamente, comparando-os com os modelos numéricos por eles propostos.

O canal ensaiado possuía 121,92 m (400 pés) de comprimento, 1,2192 m (4 pés) de largura, declividade de 0,005 m/m e com a barragem de 0,3048 m (1 pé) de altura localizada no meio do canal. Um dos testes realizados (código 1.1 [20]), é aqui analisado; possuía o teste uma vazão de 0,086 m<sup>3</sup>/s, profundidade a jusante de 0,06096 m (0,2 pé) e paredes laterais paralelas, com rugosidade imposta igual em 0,009 m<sup>-1/3</sup>.s em todo o contorno. Os resultados de profundidades e velocidades em algumas seções transversais são apresentados graficamente por CHEN[1980] e por MASCARENHAS[1990]. Os dados de entrada convertidos para o Sistema Internacional de Unidades encontram-se na tabela 5.2 seqüente.

A figura 5.7 (profundidades do escoamento) e a figura 5.8 (velocidades do escoamento) comparam os resultados obtidos

nesta simulação com os de MASCARENHAS[1990], CHEN[1980] e, também, com os valores experimentais do WES.

Tabela 5.2  
Dados fornecidos ao programa - Aplicação 2

| <i>Variável</i>                            | <i>Valor</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| intervalo de tempo entre iterações         | 1 s                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| intervalo espacial                         | 7,62 m                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| largura do canal                           | 1,2592 m                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| tempo máximo de cálculo                    | 500 s                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| declividade longitudinal do canal          | 0,005 m/m                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| coeficiente de rugosidade de Manning       | 0,009 m <sup>-1/3</sup> .s                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| abscissa do início do canal                | -38,10 m                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| abscissa do final do canal                 | 160,96 m                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| profundidade a montante da barragem        | 0,3048 m                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| profundidade a jusante da barragem         | 0,06096 m                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| velocidade a montante da barragem          | 0,22840591 m/s                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| número de Courant limite para estabilidade | 1,00                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| número de pontos com condições iniciais    | 18                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| condições iniciais (x/h):                  | -38.1000 / 0.1149; -31.6158 / 0.1408<br>-25.2019 / 0.1756; -17.0374 / 0.2134<br>-11.5348 / 0.2463; -6.9630 / 0.2695<br>-4.1548 / 0.2838; -2.5845 / 0.2917<br>-1.7521 / 0.2959; -1.3232 / 0.2981<br>-1.1055 / 0.2992; -0.8867 / 0.3003<br>-0.6667 / 0.3014; -0.4456 / 0.3025<br>-0.2234 / 0.3037; 0.0000 / 0.3048<br>0.0010 / 0.06096; 160.9600 / 0.06096 |
| número de pontos com condições naturais:   | 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| condições naturais (x/h/v):                | -38,10/0,06096/1,14202955<br>160,96/0,06096/1,14202955                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| condição de contorno de montante constante | sim                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |

O reservatório a montante é muito curto, pois o canal é supercrítico (grande inclinação para a rugosidade e vazão impostas). Com isto, a hipótese de condição de contorno de montante (profundidade constante) é violada, e o programa é

terminado. Se o canal for alongado a montante, teremos necessariamente que incluir o ressalto hidráulico que se forma a montante de uma barragem em um canal supercrítico, incluindo mais uma fronteira móvel no estudo (ver AMEIN et al.[1983]). Para permitir o cálculo, foi mantida a condição a jusante do ressalto hidráulico constante (mantendo a vazão e a posição do ressalto fixos no tempo). Essa simplificação permitiu a comparação dos níveis e velocidades em todo o canal, como mostrado nas figuras 5.7 e 5.8, para os instantes de tempo menores que 41 segundos (tempo para o qual o início do canal é atingido). A partir desse instante, como a condição de contorno de montante (a jusante do ressalto) é mantida constante, ocorre a formação de uma curva de remanso de escoamento permanente não-uniforme (conhecida por T2), responsável pela diferença nos níveis de água e nas velocidades obtidos com o programa ROTRET em relação aos dados experimentais (que tendem ao escoamento uniforme no canal).

Observa-se um bom ajuste dos níveis de água obtidos- ver figura 5.7, aos valores numéricos (MASCARENHAS[1990] e CHEN[1980]) e aos experimentais (WES), ora melhor com os valores experimentais, ora com os numéricos. Na seção da barragem ( $x = 0,00$  m) acontece um grande abaixamento do nível de água nos instantes iniciais (no primeiro instante de tempo - calculado analiticamente- e no instante seguinte - calculado numericamente). Na seqüência ocorre uma elevação, com decaimento praticamente paralelo aos decaimentos apresentados nos resultados numéricos e experimentais. Tal fato se deve ao

forte gradiente inicial- ainda não atenuado- e, também, à grande declividade do canal. Na seção localizada a 7,62 m da barragem, logo após a chegada da onda de choque, ocorre um abaixamento no nível de água, o que é imediatamente corrigido automaticamente pelo programa. Nas demais seções o ajuste é melhor.

Quanto às velocidades, o programa ROTRET conduz a velocidades sempre superiores às velocidades obtidas com os demais métodos numéricos, porém ainda próximos aos valores experimentais. Tal fato decorre da consideração do coeficiente de rugosidade fixo e igual ao experimental. Diversos autores (ver MASCARENHAS[1990]) aconselham o uso de um coeficiente de rugosidade numérico maior que o experimental.

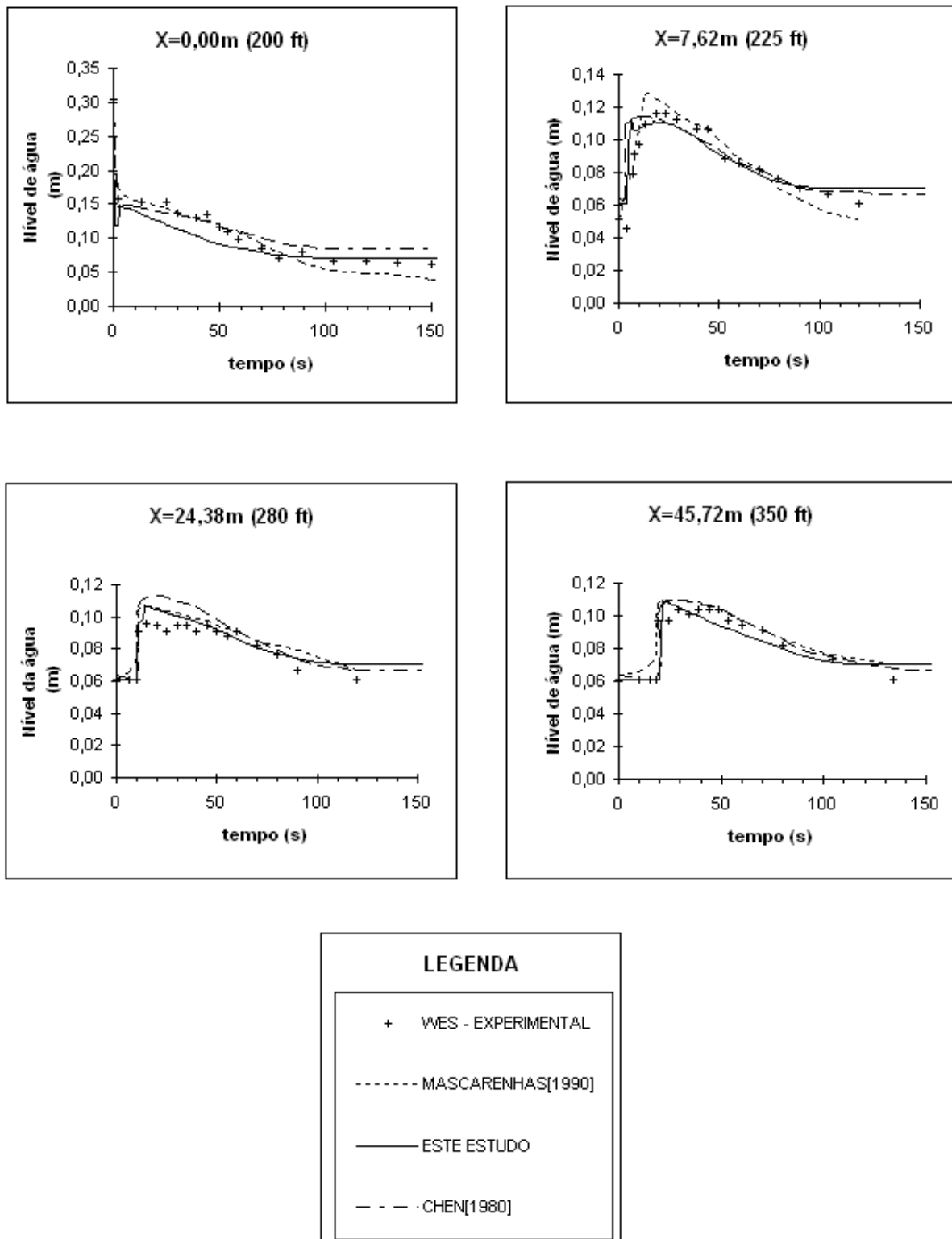


Figura 5.7 - Aplicação 2 - Comparação dos resultados obtidos com a aplicação do programa ROTRET com os resultados experimentais e com os valores numéricos obtidos por CHEN[1980] e por MASCARENHAS[1990] - cotogramas em quatro posições.

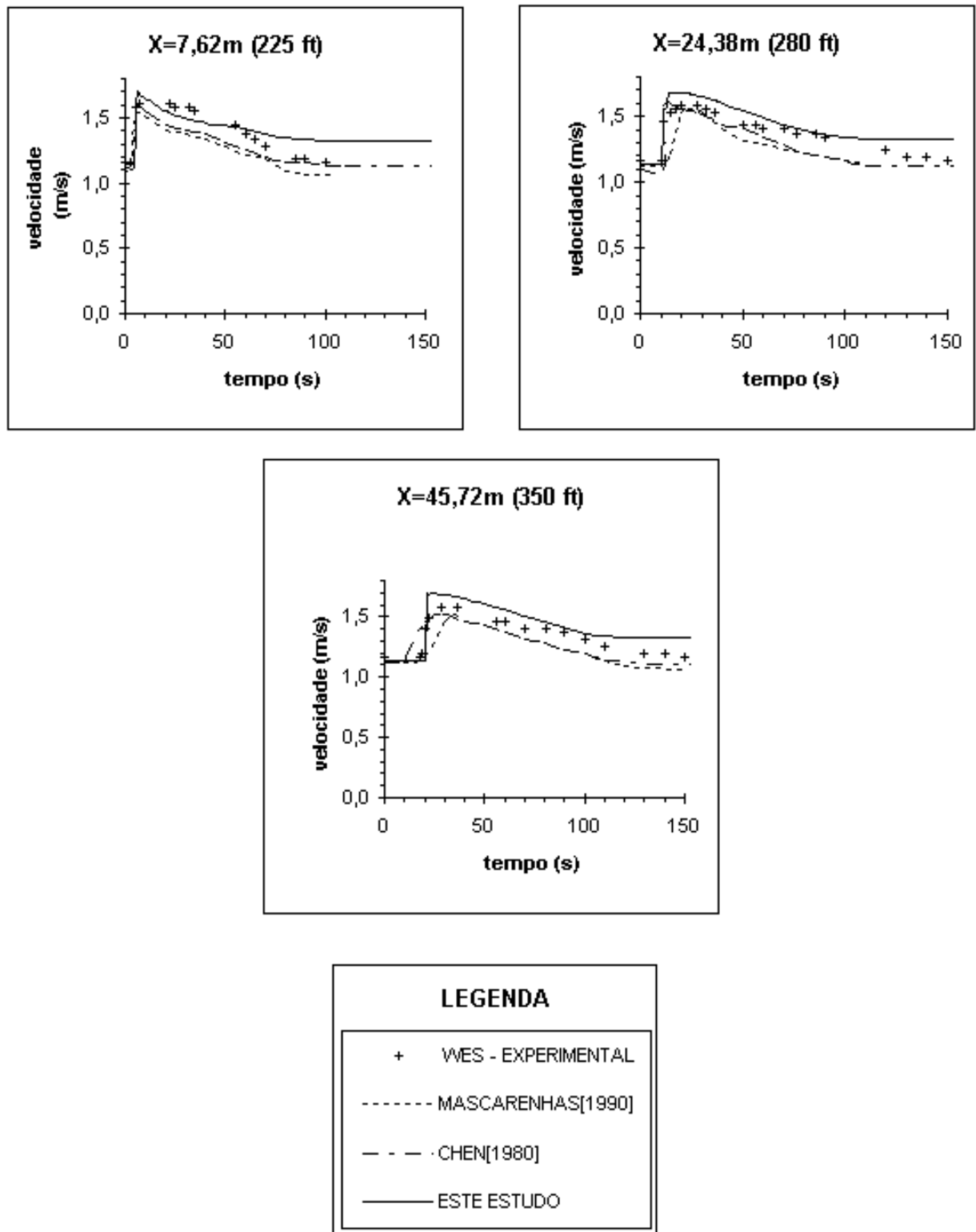


Figura 5.8 - Aplicação 2 - Comparação dos resultados obtidos com a aplicação do programa ROTRET com os resultados experimentais e com os valores numéricos obtidos por CHEN[1980] e por MASCARENHAS[1990] - velogramas em três posições.

#### 5.4 - Aplicação 3 - Aplicação ao exemplo de uma Barragem FICTÍCIA

Foi desenvolvida, na seqüência, uma aplicação a uma barragem fictícia de grande altura (40 m) e com declividade de fundo diferente de zero (funcionando em regime sub-crítico). A finalidade de tal aplicação foi analisar a influência da rugosidade, da declividade do fundo e do intervalo de tempo adotado na dissipação do choque e, também, nos perfis longitudinais. Os dados iniciais fornecidos ao programa encontram-se na tabela 5.3.

##### CASO 1 - Variação da rugosidade do fundo

Nesse caso foi analisado o efeito da variação da rugosidade do fundo na dissipação do choque e nos perfis longitudinais. Para isso, a rugosidade do contorno foi alterada de  $0,035 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$  para  $0,045 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$  (com respectiva alteração dos níveis iniciais, visto que esses níveis correspondem a escoamento permanente). Pode-se observar que a rugosidade é diretamente associada à dissipação do choque, dissipando-o mais rapidamente quanto maior for a rugosidade. A figura 5.9 mostra esta comparação para quatro instantes de tempo. A figura 5.10 mostra os valores máximos de cota de inundação para diferentes seções ao longo do canal (envoltória de níveis de água máximos) e o tempo decorrido até a chegada da frente de onda em cada seção para a rugosidade padrão ( $n = 0,035 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ ). Nota-se uma diferença de comportamento no caminho do choque antes e depois

da dissipação do choque, função da natureza diferente da dissipação da energia nos dois casos: o caminho de uma onda com grande declividade da superfície livre frontal, antes do choque, e escoamento não-permanente após a dissipação, onde a dissipação de energia se dá de acordo com a lei de perda de carga normal em canais (ex. equação de Manning). A tabela 5.4 compara os dados da dissipação da onda de choque provocada pela ruptura para as duas rugosidades analisadas. Observa-se que, apesar das profundidades a montante do choque serem da mesma ordem de grandeza para os dois casos (condição computacional - diferença de 5 % na profundidade a montante), a posição e a velocidade são significativamente diferentes. A rugosidade atua preponderantemente na dissipação da energia cinética do escoamento.

#### CASO 2 - Variação da declividade do fundo

Com a finalidade de analisar a influência da declividade do fundo na dissipação do choque, esta foi reduzida à metade (declividade de 0,00125 m/m). A figura 5.11 mostra a variação dos perfis longitudinais da superfície livre para dois instantes de tempo, mostrando que a declividade influencia em muito a dissipação do choque e o desenvolvimento da onda de enchente, como mostrado numericamente na tabela 5.5; os valores finais da dissipação do choque resultantes são semelhantes ao se aumentar a rugosidade em 28,6 %. Observam-se maiores alturas da lâmina de água, em função do maior volume armazenado e da menor dissipação devido à menor declividade.

Tabela 5.3  
Dados fornecidos ao programa - Aplicação 3

| <i>Variável</i>                            | <i>Valor</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| intervalo de tempo entre iterações         | 15 s                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| intervalo espacial                         | 2.000 m                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| largura do canal                           | 100 m                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| tempo máximo de cálculo                    | 3010 s                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| declividade longitudinal do canal          | 0,0025 m/m                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| coeficiente de rugosidade de Manning       | 0,035 $m^{-1/3} \cdot s$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| abscissa do início do canal                | -30.000 m                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| abscissa do final do canal                 | 30.000 m                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| profundidade a montante da barragem        | 40,00 m                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| profundidade a jusante da barragem         | 0,40 m                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| velocidade a montante da barragem          | 0,007715 m/s                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| número de Courant limite para estabilidade | 1,00                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| número de pontos com condições iniciais    | 20                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| condições iniciais (x/h):                  | -30.000,00 / 0,4000 ; -16.018,9108 / 0,4000<br>-15.794,1282 / 0,6407; -15.315,4200 / 1,7175<br>-14.889,0098 / 2,7794; -14.121,3424 / 4,6971<br>-12.755,2425 / 8,1120; -10.720,3671 /13,1991<br>-9.239,9018 /16,9003; -7.892,4072 /20,2690<br>-6.527,3578 /23,6816; -4.416,8775 /26,0422<br>-4.543,1489 /28,6421; -3.397,7297 /31,5057<br>-2.136,1734 /34,6596; -1.458,2093 /36,3545<br>-746,7047 /38,1332; 0,0000 /40,0000<br>0,0100 / 0,4000 ; 30.000,0000 /0,4000 |
| número de pontos com condições naturais:   | 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| condições naturais (x/h/v):                | -30.000,00 / 0,4000 / 0,7715<br>30.000,00 / 0,4000 / 0,7715                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| condição de contorno de montante constante | sim                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

Tabela 5.4  
Dissipação do choque para diferentes rugosidades

|                  | $n=0,035 \text{ m}^{-1/3} \cdot s$ | $n=0,045 \text{ m}^{-1/3} \cdot s$ |
|------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| distância (m)    | 2678,02                            | 1704,22                            |
| tempo (s)        | 405                                | 280                                |
| altura (m)       | 0,4192                             | 0,4137                             |
| velocidade (m/s) | 0,8655                             | 0,6820                             |

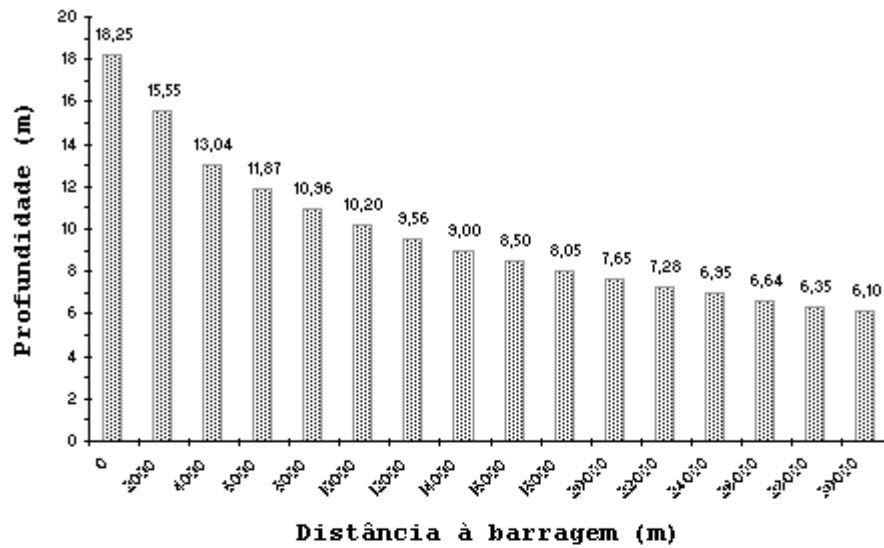
Tabela 5.5  
Dissipação do choque para diferentes declividades

|                  | $S_0 = 0,0025 \text{ m/m}$ | $S_0 = 0,00125 \text{ m/m}$ |
|------------------|----------------------------|-----------------------------|
| distância (m)    | 2678,02                    | 2179,92                     |
| tempo (s)        | 405                        | 280                         |
| altura (m)       | 0,4192                     | 0,4194                      |
| velocidade (m/s) | 0,8655                     | 0,9663                      |

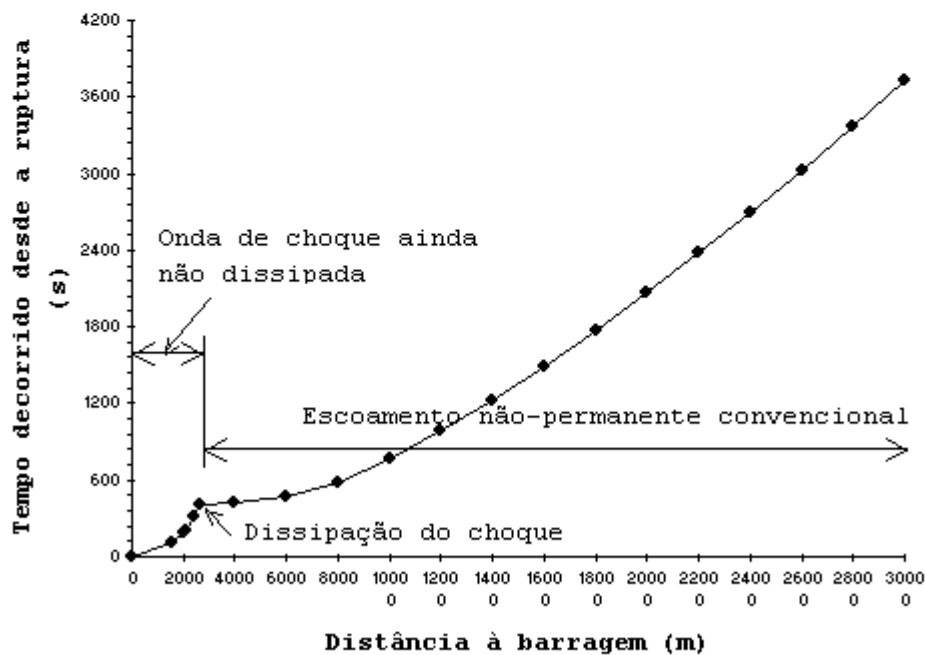
### Caso 3 - Variação do intervalo de tempo adotado

Para analisar a influência do intervalo de tempo a adotar, o valor do intervalo de tempo foi alterado do padrão adotado (15 segundos) para 2, 5, 10 e 20 segundos. A figura 5.12 mostra a variação dos perfis longitudinais para dois instantes de tempo. Observa-se que o perfil longitudinal é influenciado pelo intervalo de tempo adotado, porém os resultados só são praticamente idênticos para pequenos  $\Delta t$ ; os resultados para  $\Delta t$  igual a 20 segundos diferem bastante dos demais três  $\Delta t$  analisados. A maior variação se faz sentir na abscissa do choque, que varia entre 2382,90 m -  $\Delta t = 2 \text{ s}$  - e 2612,60 m -  $\Delta t = 20 \text{ s}$  (ambos para tempo igual a 360 segundos), ou percentualmente, 9,64 %. Tal análise só é interessante de ser feita para tempos inferiores ao tempo de dissipação do choque, visto que após esse instante, o  $\Delta t$  se torna variável, assumindo o valor máximo permitido para o critério de Courant (expresso pelo dado de entrada NCOURANT).



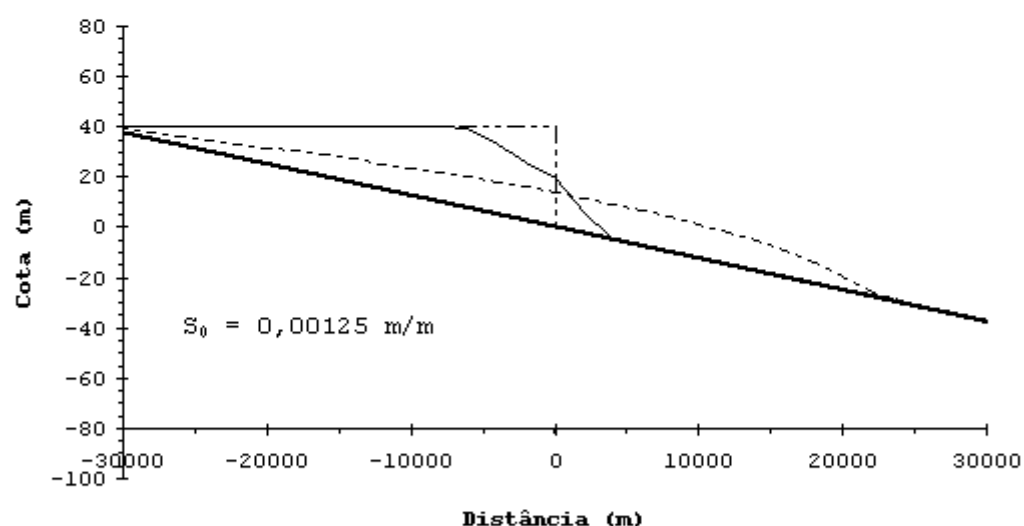
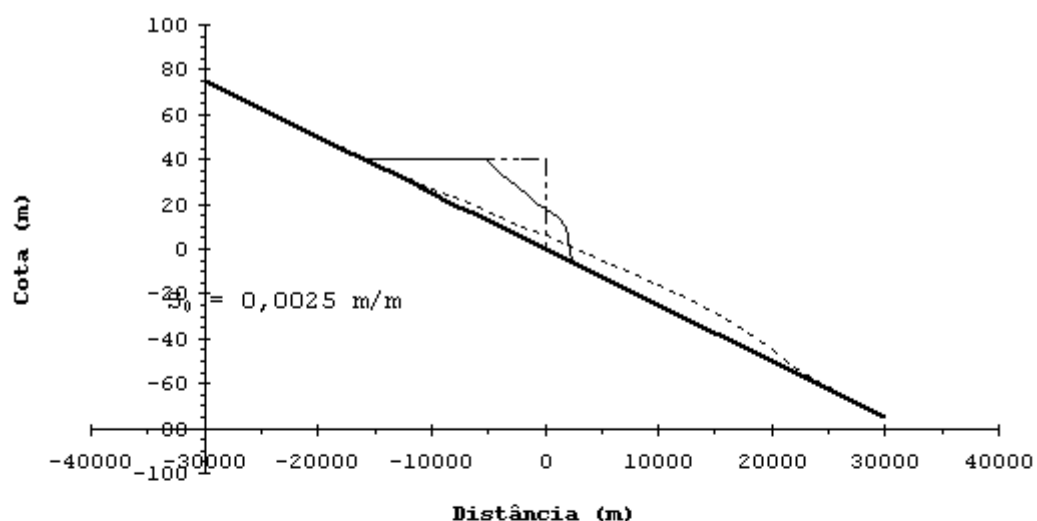


#### A. Níveis de água máximos em cada seção



#### B. Caminho do choque

Figura 5.10 - Aplicação 3 - Caso 1 - Níveis de água máximos e tempo para a chegada da onda de choque (trecho inicial) ou de início de elevação do nível de água (trecho final).



#### LEGENDA

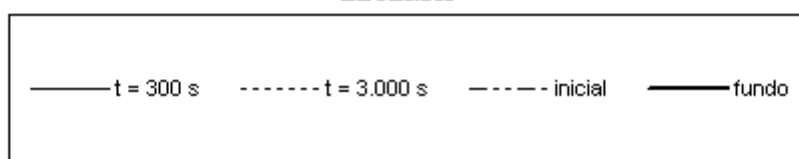


Figura 5.11 - Aplicação 3 - Caso 2 - Comparação dos resultados obtidos com a aplicação do programa ROTRET com a variação da declividade do fundo - perfis longitudinais para dois instantes de tempo para cada declividade.



### 5.5 - Análise da conservação da massa

A partir das aplicações anteriores, fez-se uma análise da conservação de massa no escoamento proveniente da ruptura de uma barragem calculado pelo programa ROTRET. Tal estudo é importante, pois a forma usual da equação de Saint-Venant é dita não conservativa, devido à troca do termo inercial da equação da conservação do momento original por uma forma de mais fácil solução em função da consideração da velocidade como incógnita. Assim:

$$\frac{\partial}{\partial t} (vh) + \frac{\partial}{\partial x} \left( v^2 \cdot h + \frac{g \cdot h^2}{2} \right) = g \cdot (S_0 - S_f) \quad \Leftarrow \text{Original}$$

(conservativa)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \left( v \cdot \frac{\partial v}{\partial x} \right) + g \cdot \frac{\partial h}{\partial x} = g \cdot (S_0 - S_f) \quad \Leftarrow \text{Transformada}$$

(não conservativa)

Esta substituição, apesar de matematicamente correta (utilizando-se da equação da conservação da massa das equações de Saint-Venant também na simplificação), introduz no cálculo do balanço de massa uma variação no volume escoado. Os modelos que utilizam a equação original são chamados de conservativos, enquanto os que utilizam a simplificação são chamados de não-conservativos. Este problema de variação da massa aparece, portanto, nas aplicações apresentadas nesta dissertação que se utiliza da forma não conservativa das equações de Saint-Venant. Para os casos da aplicação 1 (item 5.2) não se observa variação da massa, pois os dados são próximos aos ideais e o número de

intervalos de tempo é reduzido. Introduzindo-se a rugosidade, a variação da massa se manifesta, com perda de até 3,5 %. Na aplicação 2 observa-se uma variação na vazão da ordem de 10 % para mais, nos instantes finais de tempo (após a passagem da onda de enchente). Na aplicação 3 a variação da massa é significativa. Utilizando-se o caso 1 da aplicação 3 (com a rugosidade padrão)- figura 5.9, a variação da massa chega a atingir 20 %, para mais, do volume que saiu do reservatório até aquele momento.

A variação da massa é um problema mesmo em programas que se utilizam da forma conservativa das equações de Saint-Venant. O modelo mais utilizado, o DAMBRK do National Weather Service (FREAD[1988]) e que utiliza as equações na forma conservativa, também apresenta variação da massa, mesmo para casos de escoamento não-permanente convencional. As diferenças nesse caso são pequenas, e o manual recomenda a sua minimização, através dos inúmeros graus de liberdade disponíveis.

## CAPÍTULO 6

**CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**6.1 - Conclusões

Baseado no exposto nos capítulos anteriores, e principalmente nos exemplos descritos no capítulo 5, podemos tecer as seguintes considerações finais:

- O modelo proposto (ruptura de barragem em canal retangular com largura, declividade e rugosidade constantes) adapta-se muito bem ao caso ideal (aplicação 1 - caso 1), apenas alterando-se a velocidade de zero para  $1 \times 10^{-11}$  m/s (o que é igual em termos práticos).
- A rugosidade (aplicação 1- caso 2 e aplicação 3 - caso 1) influi de maneira significativa na dissipação do choque, pois o aumento de 28,6 % reduz o tempo de dissipação em 30,9 % e o percurso em 36,4 % (aplicação 3 - caso 1).
- A existência de velocidade inicial do fluxo (aplicação 1- caso 3) comparada com o caso de velocidade nula no início do escoamento (caso 1) conduz a uma dissipação do choque mais rápida, em função da maior energia cinética do escoamento.

Conduz, também, a uma onda de menor altura do que ocorre com a consideração de velocidade nula.

- A redução da largura do canal mantendo a velocidade inicial a montante constante (aplicação 1 - caso 4) conduz a uma dissipação mais acentuada do choque, função da contribuição da rugosidade das paredes (redução do raio hidráulico da seção).
- A redução da largura do canal mantendo a vazão inicial constante (aplicação 1 - caso 5) mostra que a dissipação não é sensível à largura do canal para velocidades baixas (no caso, menor que 0,10 m/s). Quando a largura é pequena (portanto, quando a velocidade é grande- maior que 0,10 m/s), a dissipação aumenta, pelo aumento da velocidade e pela diminuição do raio hidráulico.
- A comparação dos resultados de níveis de água obtidos com resultados de laboratório- WES- (aplicação 2) mostrou resultados próximos ao experimental e, também, aos valores numéricos apresentados por MASCARENHAS[1990] e CHEN[1980]. Para as velocidades, no entanto, a diferença é maior devido à consideração do coeficiente de rugosidade no modelo numérico igual ao valor utilizado na experiência.
- A análise das cotas de inundação obtidas no exemplo da barragem FICTÍCIA (aplicação 3 - caso 1) - figura 5.10 - mostra um forte amortecimento nas primeiras seções e nos

primeiros instantes de tempo. Na figura 5.10.B observa-se a diferença de dissipação entre o escoamento com e sem a presença do choque (escoamento não-permanente convencional).

- A influência da diminuição da declividade do fundo na dissipação do choque (aplicação 3 - caso 2) se manifesta através da redução do deslocamento do choque e do tempo decorrido entre a ruptura e a dissipação do choque.
- O valor do intervalo de tempo a adotar (aplicação 3 - caso 3) não conduz a variação significativa dos resultados para valores pequenos de  $\Delta t$  (2 e 5 segundos); para  $\Delta t$  de 20 segundos houve um grande deslocamento da posição da onda (9,54 % ou 230 m para o tempo de 360 segundos a partir da ruptura), função do passo de tempo maior, o que conduz a aproximações piores. Os intervalos temporais de 2, 5, 10, 20 e 25 segundos correspondem a intervalos de tempo adimensionais (ver lista de símbolos no início desta publicação) de, respectivamente 0,5, 1,0, 2,5, 7,5, 10,0, e 12,5. Ocorreram problemas de convergência no modelo numérico nos testes com intervalos de tempo adimensionais menores que 1,0 e maiores que 10,0; tal intervalo deverá ser, entretanto, melhor analisado no futuro.

## 6.2 - Recomendações para Pesquisas Futuras

Quanto à continuidade desta pesquisa, recomendamos que o enfoque básico adotado nesta dissertação seja mantido (ponto de vista Lagrangeano até a dissipação do choque, com a modificação para o ponto de vista Euleriano a partir desse ponto). Este enfoque possui a vantagem de possibilitar uma visão mais realista do fenômeno, apesar da maior complexidade matemática e computacional decorrente.

Com isto, recomenda-se que o programa ROTRET seja transformado em um programa para ruptura de uma barragem em um vale com seção transversal qualquer, propondo as seguintes etapas evolutivas (e com troca das variáveis dependentes de  $v$  e  $h$  para  $Q$  e  $z$ ):

1. Canal prismático não retangular, para melhorar a sensibilidade do choque à forma do canal;
2. Condições de contorno a montante e a jusante não permanentes;
3. Declividades e rugosidades variáveis entre as seções e para diferentes cotas;
4. Canal com seção qualquer;
5. Ruptura não instantânea, seguindo os quatro passos anteriores;
6. Inclusão de controles internos (outras barragens, ressaltos hidráulicos móveis, armazenamentos, corredeiras, etc...)

Esta é uma linha de pesquisa longa, mas que pode ser dividida em várias pesquisas isoladas.

A adoção de um método de diferenças finitas implícito (tipo Preissmann generalizado) em lugar do método das características, no trecho entre as ondas positiva e negativa, ou após a dissipação do choque, pode conduzir a uma sensível redução do tempo de processamento.

Procurando melhorar a qualidade dos resultados obtidos, em termos da conservação da massa (ver item 5.5), propõe-se a troca das equações de Saint-Venant escritas na forma não conservativa pelas equações escritas na forma conservativa; isto deve conduzir, também, a sistemas de equações mais complexos.

As análises aqui realizadas com respeito à influência da variação dos parâmetros hidráulicos (rugosidade, declividade, vazão, velocidade inicial e largura do canal) e intervalo de tempo adotado para cálculo deverão ser melhor analisados, de preferência buscando relações adimensionais que expliquem e quantifiquem essas variações.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBOTT, Michael B. Method of characteristics. In : MAHMOOD, K., YEVJEVICH, V. (Ed). Unsteady flow in open channels, Fort Collins : Water Resources Publ., 1975. v. 1, cap. 3.
- ALAM, Mohammed M., BHUIYAN, M. A. Collocation finite element simulation of dam-break flows. J. of Hydraulic Eng., v. 121, n. 2, p. 118-128, Feb. 1995.
- ALMEIDA, A. B. de, RODRIGUES, Daniel A. Modelos matemáticos mistos 1-D/2-D para simulação de cheias provocadas por roturas de barragens. In: SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS (2. : 1986 : Lisboa). anais. Lisboa : APRH, 1986. v. 1, p. 281-289.
- ALMEIDA, A. B. de, ORNELAS, R. Simulação matemática de cheias provocadas pela rotura em cadeia de barragens : um caso estudado em Portugal. In: SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS (4. : 1989 : Lisboa). Anais : SILUSB. Lisboa : APRH, 1989, v. 2, p. 350-358.
- AMEIN, Michael. The dam-break wave and the bore collapse on a beach. In: DAM-BREAK FLOOD ROUTING MODEL WORKSHOP (1977 : Bethesda). Proceedings, Washington, D. C. : Water Resources Council, 1977, p.1-17.
- AMEIN, M. et al. Directed computation of dam-break waves. In : CONFERENCE ON FRONTIERS IN HYDRAULIC ENGINEERING (1983: Cambridge) Frontiers in hydraulic engineering: proceedings, New York : ASCE, 1983. p. 331-336.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. Evaluation procedures for hydrologic safety of dams, New York : ASCE, 1988. 95 p.
- BAECHER, Gregory B., PATÉ, M. Elizabeth e NEUFVILLE, Richard de. Risk of dam failure in benefit-cost analysis. Water Resources Research, v. 16, n. 3, p. 449-456, jun 1980.
- BALLOFET, Armando et al. Dam collapse wave in a river. J. of the Hydraulics Div., v. 100, n. 5, p.645-665, May 1974.
- BASCO, David R. Limitations of de Saint-Venant equation in dam-break analysis. J. of Hydraulic Eng., v. 115, n. 7, p. 950-965, July 1989.
- BELL, Stoner W. et al. Experimental results of two-dimensional dam-break flows. J. of Hydraulic Research, v. 30, n.2, p. 225-252, 1992.

- BELLOS, C. V. et al. Experimental investigation of two-dimensional dam-break induced flows, J. of Hydraulic Research, v. 30, n.1, p. 47-63, 1992.
- BIVINS, William S. Dam safety : an overview of a risky business. In : CONFERENCE ON FRONTIERS IN HYDRAULIC ENGINEERING (1983 : Cambridge) Frontiers in hydraulic engineering : proceeding, New York : ASCE, 1983. p. 445-450.
- BREBBIA, C. A., FERRANTE, A. J. Computational methods for the solution of engineering problems, London : Pentech Press, 1979. 354 p.
- BURDEN, Richard L. et al. Numerical analysis, Boston : Weber and Schimdt, 1980. 579 p.
- CENTRAIS ELÉTRICAS DE SÃO PAULO. Brazilian dam failures : a preliminary report. Int. Water Power & Dam Construction, v. 29, n. 10, p.51-53, Oct. 1977.
- CHEN, Cheng-Iung. Laboratory verification of a dam-break flood model. J. of the Hydraulics Div., v. 106, n. 4, p. 535-556, Apr. 1980.
- CHEN, Cheng-Iung, ARMBRUSTER, Jeffrey T. Dam-break wave model : formulation and verification. J. of the Hydraulics Div., v. 106, n. 5, p. 747-767, May 1980.
- COCHRANE, H. C., Socioeconomic consideration in dam safety risk analysis, Fort Belvoir : U. S. Army Corps of Engineers, 1987. 178 p. (IWR Report, 87-R-7).
- COMBELLES, P. Détériorations ou ruptures de barragens. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON LARGE DAMS (13. : 1979: New Delhi) Proceedings, Paris: ICOLD, 1979, v. 5, p. 371-373.
- COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS. Comissão Técnica de Segurança de Barragens. Segurança de barragens : recomendações para a formulação e verificação de critérios e procedimentos, Rio de Janeiro : CBGB, 1986. 117 p.
- COSTA, J. C. E. Estimativa de onda de cheia proveniente de ruptura hipotética de barragem e sua propagação segundo metodologia do National Weather Service. Apresentado no IX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 1978, Belo Horizonte.
- COXON, R. E. Dam hazards, risks and liabilities. Int. Water Power & Dam Construction, v. 31, n. 11, p. 68-70, Nov.1979.
- CUNGE, J. A. et al. Practical aspects of computational river hydraulics, London : Pitman, 1980. 420 p.

- DAMMULLER, D. C. et al. Modeling of unsteady flow in curved channel. J. of Hydraulic Eng., v. 115, n. 11, 1479-1495, Nov. 1989.
- DOLCIMASCOLO, A. Safety inspection of dams. Int. Water Power & Dam Construction, v. 32, n. 10, p. 32-37, Oct. 1980.
- DZIEDZIC, Maurício. Investigação sobre a aplicabilidade de um esquema de elementos finitos para a solução das equações de Saint-Venant, Curitiba : UFPR, 1988. 166p. Dissertação (Mestrado em Eng. Hidráulica) - Univ. Federal do Paraná.
- ELETROBRÁS, Guia para cálculo de cheia de projeto de vertedores, Rio de Janeiro : ELETROBRÁS, 1987. paginação irregular.
- ELLINGWOOD, Bruce et al. Assessing cost of dam failure. J. of Water Resourcer Planning and Management, v. 119, n. 1, p. 64-82, Jan./Feb. 1993.
- ELLIOT, Robert C., CHAUDHRY, M. H. A wave propagation model for two-dimensional dam-break flows. J. of Hydraulic Research, v. 30, n. 4, p.467-483, 1992.
- ESTADOS UNIDOS. Committee on Large Dams. Lessons from dams incidents USA, New York : ASCE, 1975, 387 p.
- \_\_\_\_\_. Lessons from dams incidents : USA, II, New York : ASCE, 1988. 222 p.
- ESTADOS UNIDOS. National Research Council. Committee on the Safety of Existing Dams. Safety of existing dams: evaluation and improvement, Washington, D. C.: National Academy Press, 1983. 354p.
- ESTADOS UNIDOS. National Research Council. Committee on Safety Criteria for Dams. Safety of dams : flood and earthquake criteria, Washington, D. C. : National Academy Press, 1985. 276p.
- FAURE, J. NAHAS, M. Comparaison entre observations reelles calcul, etudes sur modeles distordu ou non, de la propagation d'une onde de submersion. In: CONGRESS IAHR (11.: 1965: Leningrad) Proceedings, Leningrad : IAHR, 1965. v. 3, p. 3.5.
- FENNEMA, Robert J., CHAUDHRY, M. H. Simulation of one-dimensional dam-break flows. J. of Hydraulic Research, v. 25, n. 1, p. 41-51, 1987.

- FENNEMA, Robert J., CHAUDHRY, M. H. Explicit methods for 2-D transient free-surface flows. J. of Hydraulic Eng., v. 116, n. 8, p. 1013-1034, Aug. 1990.
- FRANCO, Antonio B., ALMEIDA, A. B. de. Modelação matemática de cheias provocadas por roturas de barragens em cascata. In: SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS (4. : 1989 : Lisboa). Anais : SILUSB, Lisboa : APRH, 1989, v. 1, p. 121-131.
- FREAD, D. L. Implicit flood routing in natural channels, by M. Amein and C. S. Fang. J. of Hydraulic Div., v. 97, n. HY7, p. 1156-1159, July 1971. Discussão.
- FREAD, Danny L. Technique for implicit dynamic routing in rivers with tributaries. Water Resources Research, v. 9, n. 4, p. 918-926, Sep. 1973.
- FREAD, Danny L. Theoretical development of implicit dynamic routing model. Silver Spring : hydrological research Laboratory, 1976. paginação irregular.
- FREAD, D. L. The NWS DAMBRK model : theoretical background/ user documentation. Silver Spring : U. S. Department of Commerce, 1988. paginação irregular.
- FREAD, D. L. National Weather Service models to forecast dam-break floods, in: STAROSOLSZKY, O., MELDER, O. M. (Eds.) Hydrology of Disasters. London : WMO, 1989, p. 192-211. Proceedings of the Technical Conference on the Hydrology of Disasters, Geneve, 1988.
- FREAD, D. L., HARBOUGH, T. E. Transient hydraulic simulation breached earth dams. J. of Hydraulics Div., v. 99, n. 1, p. 139-154, Jan. 1973.
- FREAD, D. L., SMITH, G. F. Calibration technique for 1D unsteady flow models. J. of Hydraulics Div., v. 104, n. 7, p. 1027-1044, Jul. 1978.
- FRENCH, Richard H. Open-channel hydraulics. New York : McGraw-Hill, 1985. 705 p.
- GAMA, Carlos D. da et al. Histórico de acidentes de barragens. Construção Pesada, v. 14, n. 157, p. 20-28, ago./set. 1984.
- GOUBET, André. Risques associés aux barrages. La Houille Blanche, n. 8, p. 475-490, 1979.

- HAIMES, Yacov Y. et al. Multiobjective risk-partioning: an application to dam safety risk analysis, Fort Belvoir : U. S. Army Corps of Engineers, 1988. 106 p.(IWR Report,88-R-4).
- HENDERSON, F. M. Open channel flow, New York : MacMillan, 1966. 522 p.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. Lessons from dam incidents, Abridged ed. Boston : USCOLD, 1973.
- KATOPODES, Nikolaos. A dissipative Galerkin scheme for open-channel flow. J. of Hydraulic Eng., v.110, n.4, p. 450-466, apr. 1984.
- KATOPODES, Nikolaos, STRELKOFF, Theodor. Computing two-dimensional dam-break flood waves. J. of Hydraulic Div., v. 104, n.9, p. 1269-1288, Sept. 1978.
- KATOPODES, Nikolaos, SCHAMBER, D. R. Apllicability of dam-break flood wavemodels. J. of Hydraulic Eng., v. 109, n. 5, p. 702-721, May 1983.
- KORDAS, B., WITKOWSKA, H. Mathematical model of a dam-break wave. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON UNSTEADY FLOW IN OPEN CHANNELS (1976 : Newcastle-upon-Tyne) Proceedings, Branfield: BHRA Fluid Engineering, 1976. p. C2-19.
- LEBRETON, Alain. Les ruptures et accidents graves de barrages de 1964 à 1983. La Houille Blanche, n. 6/7, p. 529-544, 1985.
- LIGGETT, James A. Basic equations of unsteady flow. In: MAHMOOD, K., YEVJEVICH, V. (Ed) Unsteady flow in open channels, Fort Collins : Water Resources Publ., 1975. v. 1, cap. 2.
- LIGGETT, James A., CUNGE, Jean A. Numerical methods of solution of the unsteady flow equations. In: MAHMOOD, K., YEVJEVICH, V. (Ed) Unsteady flow in open channels, Fort Collins : Water Resources Publ., 1975, v. 1, cap. 4.
- LIN, Dennis, A., GOODWIN, Peter. Stability of a general Preissmann scheme. J. of Hydraulic Engineering, v. 113,n. 1, p. 16-28, Jan. 1987.
- MASCARENHAS, F. C. B. Modelação matemática de ondas provocadas por ruptura de barragens, Rio de Janeiro : UFRJ: COPPE, 1990. Tese (Doutorado) - UFRJ. 291 p.
- MASCARENHAS, Flávio C. B., SILVA, Rui C. V. da. Alternativas da metodologia para a propagação de ondas de ruptura de barragens. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS

- HÍDRICOS (7. : 1987 : Salvador). Anais. São Paulo : ABRH, 1987, v. 3, p. 34-42.
- MEGLA, T. The effect on Peruca dam of the war in Croatia. Int. Water Power & Dam Construction, v. 45, n. 1, p. 15-16, Jan. 1993.
- MILLER, William A., CUNGE, Jean A. Simplified equations of unsteady flow. In: MAHMOOD, K., YEVJEVICH, V.(Ed) Unsteady flow in open channels, Fort Collins : Water Resources Publ., 1975. v. 1, cap. 5.
- MILLER, Sky, CHAUDHRY, M. H. Dam-break flows in curved channel. J. of Hydraulic Eng., v. 115, n. 11, p. 1465-1478, Nov. 1989.
- MUSKATIROVIC, Dragutin. Some experiences relevant to numerical calculations of the hydraulic consequences of dam failure. In: CONGRESS IAHR (15. : 1973 : Istanbul). Proceedings. Istanbul : IAHR, 1973, v. 5, p. 9-15.
- MUSKATIROVIC, J., KAPOR, R. Analysis of the control of floods caused by the failure of a cascade system of dams. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE HYDRAULIC OF FLOODS AND FLOOD CONTROL (2.: 1985 : Cambridge). Proceedings, Cranfield : BHRA Fluid Engineering, 1985. p. 49-61.
- NAIHUA, Ru. Analysis of an experimental arch dam failure. Int. Water Power & Dam Construction, v. 41, n. 7, p. 30-33, July 1989.
- NOGUEIRA, Vicente de P. Q. A mathematical model of progressive earth dam failure. Fort Collins : Colorado State Univ., 1984. 137 p. Tese (Doutorado) - Colorado State University.
- ON, Hoang Q., LICH, Tran G. Ecoulement en rivière après une rupture de barrage. Calcul par la méthode des différences finies associées avec des caractéristiques. La Houille Blanche, n. 6, p. 433-439, 1990.
- PASINATO, Hugo, TUCCI, Carlos E. M. Modelo matemático para ondas abruptas em rios e canais. RBE. Caderno de Recursos Hídricos, vol. 10, n. 2, p. 131-152, dez. 1992.
- RAJAR, Rudi. Mathematical simulation of dam-break flow. J. of Hydraulics Div., v. 104, n. 7, p. 1011-1026, July 1978.
- RBE. Caderno de Grandes Barragens. Rio de Janeiro : Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, v. 2, n. 1, Jun.1987. 88 p.
- RBE. Caderno de Grandes Barragens. Rio de Janeiro : Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, v. 4, n. 2, Fev.1992.179 p.

- REINA, Peter. Threat appears to ease in Croatia. Engineering News Record, v. 230, n. 6, p. 8, Feb. 8, 1993.
- REITER, P. The importance of dam break hazard analysis. Int. Water Power & Dam Construction, v. 44, n. 6, p. 31-34, June 1992.
- REYNOLDS, Patrick. Race on to save sabotaged Peruca Dam. World Water and Environmental Engineer, p. 4-5, Jan./Feb. 1993.
- ROSE, Don. Risk of catastrophic failure of major dams. J. of the Hydraulics Div., v. 104, n. 9, p. 1349-1351, Sept. 1978.
- SAKKAS, John. G., STRELKOFF, Theodor. Dam-break flood in a prismatic dry channel. J. of the Hydraulics Div., v. 99, n. 12, p. 2195-2216, Dec. 1973.
- SCHNITTER, N. J. Deterioration or failure of dams. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON LARGE DAMS (13.:1979: New Delhi) Proceedings, Paris : ICOLD, 1979. v. 5, p. 488-493.
- SERAFIM, J. L. Safety of dams judged from failures. Int. Water Power & Dam Construction, v. 33, n. 12, p. 32-35, Dec. 1981.
- SILVA, Rui C. de V. da, MASCARENHAS, flávio B. Estudo de onda provocada por ruptura eventual de barragem durante a sua construção. In: SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS (4. : 1989 : Lisboa). Anais : SILUSB. Lisboa : APRH, 1989, v. 2, p.350-358.
- STOKER, J. J. Water waves : the mathematical theory with applications. New York : Interscience, 1957. cap. 2, 10 e 12.
- STRELKOFF, Theodor. Numerical solution of Saint-Venant equations. J. of Hydraulic Div., v.96, n.1, p. 223-252, Jan 1970.
- SMITH. G. D. Numerical solution of partial differential equation: finite difference methods, 3. ed. Oxford : Clarendon Press, 337 p.
- TINGSANCHALI, T., RATTANAPITIKON, W. 2-D mathematical modelling for dam break wave propagation in supercritical and subcritical flows. In: CONGRESS IAHR (25. : 1993 : Tokio) Proceedings. Tokio : IAHR, 1993, v. 1, p. 25-32.
- TOWNSON, J. M., AL-SAHILI, A. H. Models of dam-break flow in R-T space. J. of Hydraulic Eng., v. 115, n. 5, p. 561-575, May 1989.

- TUCCI, CARLOS E. M. Modelos matemáticos em hidrologia e hidrologia, Rio de Janeiro : RBE, 1986. v. 2.
- VELTROP, Jan A. Water, dams and hydropower in the coming decades. Int. Water Power & Dam Construction, v. 43, n. 6, p. 37-44, June 1991.
- XANTOPOULOS, Th., KOUTITAS, Ch. Numerical simulation of two dimensional flood wave propagation due to dam failure. J. of hydraulic Research, v. 14, n. 4, p. 321-331, 1976.
- YEVJEVICH, Vujica. Sudden water release. In: MAHMOOD, K., YEVJEVICH, V. (Ed). Unsteady flow in open channels, Fort Collins : Water Resources Publ., 1975. v. 2, cap. 15.
- ZHAO, D. H. et al. Finite-volume two-dimensional unsteady-flow model for river basins. J. of Hydraulic Eng., v. 120, n. 7, p. 863-883, July 1994.
- ZOLOTOV, L. A., IVASHCHENKO, I. N. Safety of hydraulic structures. Hydrotechnical Construction, v. 25, n. 2, p. 67-73, Feb. 1991.

**ANEXO A**

DISCRETIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE SAINT-VENANT;  
DISCRETIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE HUGONIOT-RANKINE;  
DISCRETIZAÇÃO DO PRIMEIRO INTERVALO DE TEMPO;  
CÁLCULO DOS PONTOS INTERMEDIÁRIOS (CARACTERÍSTICAS) E  
ESQUEMA DE SOLUÇÃO DOS SISTEMAS DE EQUAÇÕES NÃO LINEARES.

## ANEXO A

### A.1 - Discretização das Equações de SAINT-VENANT

As equações de Saint-Venant utilizadas neste trabalho possuem a forma já mostrada pelas equações 3.1.A e 3.1.B, que após a transposição de todos os termos não nulos para o lado esquerdo e aplicada a um canal retangular com declividade longitudinal e largura constantes, resulta:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial h}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \end{array} \right. \quad (A.1.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + g \cdot \frac{\partial h}{\partial x} - g \cdot (S_0 - S_f) = 0 \end{array} \right. \quad (A.1.2)$$

Este par de equações pode ser resolvido com a utilização do método das características ou pelo método das diferenças finitas. A seguir, são apresentados detalhes da aplicação destes dois métodos.

#### - Método das diferenças finitas

As equações A.1.1 e A.1.2 podem ser aproximadas pelo esquema de Preissmann generalizado, apresentado por LIN e GOODWIN[1987], com a utilização das equações 3.8.A a 3.8.C, reproduzidas na seqüência:

$$f = \theta \cdot [\phi \cdot f_{i+1}^{j+1} + (1 - \phi) \cdot f_{i+1}^j] + (1 - \theta) \cdot [\phi \cdot f_i^{j+1} + (1 - \phi) \cdot f_i^j] \quad (\text{A.1.3})$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} [\phi \cdot (f_{i+1}^{j+1} - f_i^{j+1}) + (1 - \phi) \cdot (f_{i+1}^j - f_i^j)] \quad (\text{A.1.4})$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{1}{\Delta x} [\theta \cdot (f_{i+1}^{j+1} - f_{i+1}^j) + (1 - \theta) \cdot (f_i^{j+1} - f_i^j)] \quad (\text{A.1.5})$$

Onde  $f$  pode representar  $v$  ou  $h$  (variáveis dependentes);  $i$  e  $j$  representam os instantes de tempo e posição no espaço em questão ( ' $i$ ' varia entre 1 e o número total de intervalos de tempo do estudo e ' $j$ ' varia de 1 até o último nó do canal- 'nnos' ).

As equações A.1.1 e A.1.2, discretizadas pelas equações A.1.3 a A.1.5, nos fornecem duas funções que são igualadas a zero, para cada intervalo entre as seções  $j$  e  $j+1$ , cuja forma é:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{1}{\Delta t} \cdot [\phi \cdot (h_{i+1}^{j+1} - h_i^{j+1}) + (1 - \phi) \cdot (h_{i+1}^j - h_i^j)] + \dots \\ & \dots + \left\{ \theta \cdot [\phi \cdot v_{i+1}^{j+1} + (1 - \phi) \cdot v_{i+1}^j] + (1 - \theta) \cdot [\phi \cdot v_i^{j+1} + (1 - \phi) \cdot v_i^j] \right\} \times \dots \\ & \dots \times \frac{1}{\Delta x} \cdot [\theta \cdot (h_{i+1}^{j+1} - h_{i+1}^j) + (1 - \theta) \cdot (h_i^{j+1} - h_i^j)] + \dots \\ & \dots + \left\{ \theta \cdot [\phi \cdot h_{i+1}^j + (1 - \phi) \cdot h_{i+1}^j] + (1 - \theta) \cdot [\phi \cdot h_i^{j+1} + (1 - \phi) \cdot h_i^j] \right\} \times \dots \\ & \dots \times \frac{1}{\Delta x} \cdot [\theta \cdot (v_{i+1}^{j+1} - v_{i+1}^j) + (1 - \theta) \cdot (v_i^{j+1} - v_i^j)] = F_1 = 0 \end{aligned} \right. \quad (\text{A.1.6})$$

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{1}{\Delta t} \cdot [\phi \cdot (v_{i+1}^{j+1} - v_i^{j+1}) + (1 - \phi) \cdot (v_{i+1}^j - v_i^j)] + \dots \\ & \dots \times \frac{g}{\Delta x} \cdot [\theta \cdot (h_{i+1}^{j+1} - h_{i+1}^j) + (1 - \theta) \cdot (h_i^{j+1} - h_i^j)] + \dots \\ & \dots + \left\{ \theta \cdot [\phi \cdot v_{i+1}^{j+1} + (1 - \phi) \cdot v_{i+1}^j] + (1 - \theta) \cdot [\phi \cdot v_i^{j+1} + (1 - \phi) \cdot v_i^j] \right\} \times \dots \\ & \dots \times \frac{1}{\Delta x} \cdot [\theta \cdot (v_{i+1}^{j+1} - v_{i+1}^j) + (1 - \theta) \cdot (v_i^{j+1} - v_i^j)] + \dots \\ & -g \cdot \left\{ S_0 - \left\{ \theta \cdot [\phi \cdot S_{f_{i+1}}^{j+1} + (1 - \phi) \cdot S_{f_{i+1}}^j] + \dots \right. \right. \\ & \left. \left. (1 - \theta) \cdot [\phi \cdot S_{f_i}^{j+1} + (1 - \phi) \cdot S_{f_i}^j] \right\} = F_2 = 0 \right. \end{aligned} \right. \quad (\text{A.1.7})$$

Estas equações serão aplicadas a cada par contíguo de seções transversais e irão compor um sistema de equações não-lineares de  $(2N-2)$  equações a  $(2N)$  incógnitas, que será resolvido pelo método de Newton. Este método é apresentado por BURDEN[1981], e encontra-se no anexo A.5. O sistema matricial:

$$\underset{\sim}{M} \cdot \underset{\sim}{x} = \underset{\sim}{b} \quad (\text{A.1.8})$$

é composto por:

$$\underset{\sim}{M}_j = \begin{Bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial h_j} & \frac{\partial F_1}{\partial v_j} & \frac{\partial F_1}{\partial h_{j+1}} & \frac{\partial F_1}{\partial v_{j+1}} \\ \frac{\partial F_2}{\partial h_j} & \frac{\partial F_2}{\partial v_j} & \frac{\partial F_2}{\partial h_{j+1}} & \frac{\partial F_2}{\partial v_{j+1}} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} a_{11}^j & a_{12}^j & a_{13}^j & a_{14}^j \\ a_{21}^j & a_{22}^j & a_{23}^j & a_{24}^j \end{Bmatrix} \quad (\text{A.1.9})$$

$$\underset{\sim}{x}_j^T = \{\Delta h_j \quad \Delta v_j\} = \{x_1^j \quad x_2^j\} \quad (\text{A.1.10})$$

$$\underset{\sim}{b}_j^T = \{-F_1 \quad -F_2\} = \{-F_1^j \quad -F_2^j\} \quad (\text{A.1.11})$$

Onde  $\Delta$  representa o incremento na solução em cada iteração ( $\Delta f = f^i - f^{i-1}$ ) e os coeficientes não nulos são (para rugosidade constante 'n'):

$$a_{11} = \frac{1-\phi}{\Delta t} + (-\theta) \cdot \frac{\theta \cdot [\phi \cdot v_{j+1}^{i+1} + (1-\phi) \cdot v_j^{i+1}] + (1-\theta) \cdot [\phi \cdot v_{j+1}^i + (1-\phi) \cdot v_j^i]}{\Delta x} + \dots \quad (\text{A.1.12})$$

$$\dots + (1-\phi) \cdot \theta \cdot \frac{[\theta \cdot (v_{j+1}^{i+1} - v_j^{i+1})] + [(1-\theta) \cdot (v_{j+1}^i - v_j^i)]}{\Delta x}$$

$$a_{12} = (-\theta) \cdot \frac{\theta \cdot [\phi \cdot h_{j+1}^{i+1} + (1-\phi) \cdot h_j^{i+1}] + (1-\theta) \cdot [\phi \cdot h_{j+1}^i + (1-\phi) \cdot h_j^i]}{\Delta x} + \dots$$

$$\dots + (1-\phi) \cdot \theta \cdot \frac{[\theta \cdot (h_{j+1}^{i+1} - h_j^{i+1})] + [(1-\theta) \cdot (h_{j+1}^i - h_j^i)]}{\Delta x} \quad (A.1.13)$$

$$a_{13} = \frac{\phi}{\Delta t} + \theta \cdot \frac{\theta \cdot [\phi \cdot v_{j+1}^{i+1} + (1-\phi) \cdot v_j^{i+1}] + (1-\theta) \cdot [\phi \cdot v_{j+1}^i + (1-\phi) \cdot v_j^i]}{\Delta x} + \dots$$

$$\dots + \phi \cdot \theta \cdot \frac{[\theta \cdot (v_{j+1}^{i+1} - v_j^{i+1}) + (1-\theta) \cdot (v_{j+1}^i - v_j^i)]}{\Delta x} \quad (A.1.14)$$

$$a_{14} = \theta \cdot \frac{\theta \cdot [\phi \cdot h_{j+1}^{i+1} + (1-\phi) \cdot h_j^{i+1}] + (1-\theta) \cdot [\phi \cdot h_{j+1}^i + (1-\phi) \cdot h_j^i]}{\Delta x} + \dots$$

$$\dots + \phi \cdot \theta \cdot \frac{[\theta \cdot (h_{j+1}^{i+1} - h_j^{i+1}) + (1-\theta) \cdot (h_{j+1}^i - h_j^i)]}{\Delta x} \quad (A.1.15)$$

$$a_{21} = \frac{-g \cdot \theta}{\Delta x} - g \cdot (1-\phi) \cdot \theta \cdot \left( \frac{4 \cdot n^2 \cdot v_j^{i+1^2}}{3 \cdot h_j^{i+1^2} \cdot R_{h_j}^{i+1^2}} \right) \quad (A.1.16)$$

$$a_{22} = \frac{1-\phi}{\Delta t} + g \cdot \theta \cdot (1-\phi) \cdot \frac{2 \cdot v_j^{i+1} \cdot r^2}{R_{h_j}^{i+1^2/3}} + \left\{ (1-\phi) \cdot \theta \cdot \frac{[\theta \cdot (v_{j+1}^{i+1} - v_j^{i+1}) + (1-\theta) \cdot (v_{j+1}^i - v_j^i)]}{\Delta x} \right\} + \dots$$

$$\dots + (-\theta) \cdot \frac{\left\{ \theta \cdot [\phi \cdot v_{j+1}^{i+1} + (1-\phi) \cdot v_j^{i+1}] + (1-\theta) \cdot [\phi \cdot v_{j+1}^i + (1-\phi) \cdot v_j^i] \right\}}{\Delta x} \quad (A.1.17)$$

$$a_{23} = \frac{g \cdot \theta}{\Delta x} - g \cdot \phi \cdot \theta \cdot \left( \frac{4 \cdot n^2 \cdot v_{j+1}^{i+1^2}}{3 \cdot h_{j+1}^{i+1^2} \cdot R_{h_{j+1}}^{i+1^2}} \right) \quad (A.1.18)$$

$$a_{24} = \frac{\phi}{\Delta t} + g \cdot \theta \cdot \phi \cdot \frac{2 \cdot v_{j+1}^{i+1} \cdot r^2}{R_{h_{j+1}}^{i+1^2/3}} + \left\{ \theta \cdot \phi \cdot \frac{[\theta \cdot (v_{j+1}^{i+1} - v_j^{i+1}) + (1-\theta) \cdot (v_{j+1}^i - v_j^i)]}{\Delta x} \right\} + \dots$$

$$\dots + \theta \cdot \frac{\left\{ \theta \cdot [\phi \cdot v_{j+1}^{i+1} + (1-\phi) \cdot v_j^{i+1}] + (1-\theta) \cdot [\phi \cdot v_{j+1}^i + (1-\phi) \cdot v_j^i] \right\}}{\Delta x} \quad (A.1.19)$$

O sistema para todo o desenvolvimento do rio resulta:

$$\underline{M} = \begin{Bmatrix} a_{11}^1 & a_{12}^1 & a_{13}^1 & a_{14}^1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_{21}^1 & a_{22}^1 & a_{23}^1 & a_{24}^1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & a_{11}^2 & a_{12}^2 & a_{13}^2 & a_{14}^2 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & a_{21}^2 & a_{22}^2 & a_{23}^2 & a_{24}^2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & a_{14}^{N-1} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & a_{23}^{N-1} & a_{24}^{N-1} \end{Bmatrix} \quad (\text{A.1.20})$$

$$\underline{b}^T = -\{F_1^1 \quad F_2^1 \quad F_1^2 \quad F_2^2 \quad \dots \quad F_1^{N-1} \quad F_2^{N-1}\} \quad (\text{A.1.21})$$

$$\underline{X}^T = \{\Delta h_1 \quad \Delta v_1 \quad \Delta h_2 \quad \Delta v_2 \quad \dots \quad \Delta h_{N-1} \quad \Delta v_{N-1}\} \quad (\text{A.1.22})$$

Onde os super-índices nos fornecem o intervalo discreto utilizado.

A matriz  $\underline{M}$  é conhecida como matriz banda assimétrica, e podemos economizar tempo de processamento e memória do computador fazendo um armazenamento em banda não simétrica, com a transformação da matriz  $\underline{M}$  para  $\underline{M}_b$ , representada na equação A.1.23 seqüente. O sistema é resolvido por um método de solução apresentado por BREBBIA e FERRANTE[1979].

$$\underline{M}_b = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & a_{11}^1 & a_{12}^1 & a_{13}^1 & a_{14}^1 \\ 0 & 0 & a_{21}^1 & a_{22}^1 & a_{23}^1 & a_{24}^1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{11}^2 & a_{12}^2 & a_{13}^2 & a_{14}^2 \\ 0 & 0 & a_{21}^2 & a_{22}^2 & a_{23}^2 & a_{24}^2 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & a_{11}^{N-1} & a_{12}^{N-1} & a_{13}^{N-1} & a_{14}^{N-1} \\ 0 & 0 & a_{21}^{N-1} & a_{22}^{N-1} & a_{23}^{N-1} & a_{24}^{N-1} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.1.23})$$

Para resolver este sistema necessita-se conhecer os valores de  $h_N$  ou  $v_N$ , o que significa incluir uma das duas equações abaixo:

$$\begin{cases} 1. \Delta h_N = 0 & (A.1.24) \\ 1. \Delta v_N = 0 & (A.1.25) \end{cases}$$

Estas condições de contorno de jusante são conhecidas e constantes neste trabalho.

Nos escoamentos normais em rios e canais, o(s) valor(es) de profundidade ( $h$ ) e/ou velocidade ( $v$ ) é (são) conhecido(s) na seção inicial do canal em estudo. Com isto, as primeiras equações do sistema são transformadas nas equações A.1.26 e A.1.27 apresentadas na seqüência (caso somente um valor de condição de contorno seja conhecido, apenas uma das equações será utilizada):

$$\begin{cases} 1. \Delta h_1 = 0 & (A.1.26) \\ 1. \Delta v_1 = 0 & (A.1.27) \end{cases}$$

A solução da equação matricial A.1.8, com a substituição da matriz  $\underline{M}$  pela matriz  $\underline{M}_b$  (equação A.1.23), juntamente com as condições de contorno (equações A.1.24 a A.1.27), fornece os valores de  $v_j$  e  $h_j$  ( $j = 1$  a  $n$ ) no tempo até então desconhecido ( $i+1$ ).

### - Método das características

As equações de Saint-Venant (equações A.1.1 e A.1.2) podem ser resolvidas pelo método das características (ver item 3.4), através do algoritmo apresentado no anexo A.4 (cálculo dos pontos intermediários) aplicado isoladamente a cada ponto da malha existente em todo o desenvolvimento do rio.

### A.2 - Discretização das Equações de HUGONIOT-RANKINE

As equações de Hugoniot-Rankine são aplicáveis à região próxima ao choque, como mostra a figura 3.16. A solução será novamente iterativa, e em duas etapas: primeiro resolve-se o escoamento de jusante e depois o de montante do choque como mostrado no item 3.5.3. As equações completas de Hugoniot-Rankine são mostradas nas equações 3.20.A e 3.20.B.

#### A.2.1 - A jusante

A jusante são utilizadas as características positiva (que parte do ponto L) e negativa (que parte do ponto R), o que fornece quatro equações (duas equações de inclinação das linhas características e duas equações dos 'invariantes'). A interpolação dos valores de  $v$  e  $h$  nos pontos L e R fornecem mais quatro equações. As incógnitas deste sistema de equações

são  $x_L$  e  $x_R$  (ordenadas dos pontos L e R),  $v_L$  e  $v_R$  (velocidades nos pontos L e R),  $h_L$  e  $h_R$  (profundidades dos pontos L e R),  $v_{S_{i+1}}^J$  e  $h_{S_{i+1}}^J$  (velocidade e profundidade do escoamento a jusante do choque), conduzindo a um sistema não linear de 8 equações a 8 incógnitas, que será resolvido pelo método de Newton. O sistema formado pelas equações 4.2.A a 4.2.H são simplificadas e aplicadas para um canal retangular de largura, rugosidade e declividade longitudinal constantes, conduzindo ao sistema de equações A.2.1 a A.2.8.

$$x_M - x_{S_{i+1}} - (v_M + \sqrt{g h_M}) \cdot \Delta t = F_1 = 0 \quad (\text{A.2.1})$$

$$\left( v_{S_{i+1}}^J + 2\sqrt{g h_{S_{i+1}}^J} \right) - (v_L + 2\sqrt{g h_L}) - g(t_{S_{i+1}} - t_L) \cdot \left( S_0 - \frac{S_{f_{i+1}}^J + S_{f_L}}{2} \right) = F_2 = 0 \quad (\text{A.2.2})$$

$$x_R - x_{S_{i+1}} - (v_R - \sqrt{g h_R}) \cdot \Delta t = F_3 = 0 \quad (\text{A.2.3})$$

$$\left( v_{S_{i+1}}^J - 2\sqrt{g h_{S_{i+1}}^J} \right) - (v_R - 2\sqrt{g h_R}) - g(t_{S_{i+1}} - t_R) \cdot \left( S_0 - \frac{S_{f_{i+1}}^J + S_{f_R}}{2} \right) = F_4 = 0 \quad (\text{A.2.4})$$

$$(v_L - v_L^a) \cdot (x_L^p - x_L^a) - (x_L - x_L^a) \cdot (v_L^p - v_L^a) = F_5 = 0 \quad (\text{A.2.5})$$

$$(h_L - h_L^a) \cdot (x_L^p - x_L^a) - (x_L - x_L^a) \cdot (h_L^p - h_L^a) = F_6 = 0 \quad (\text{A.2.6})$$

$$(v_R - v_R^a) \cdot (x_R^p - x_R^a) - (x_R - x_R^a) \cdot (v_R^p - v_R^a) = F_7 = 0 \quad (\text{A.2.7})$$

$$(h_R - h_R^a) \cdot (x_R^p - x_R^a) - (x_R - x_R^a) \cdot (h_R^p - h_R^a) = F_8 = 0 \quad (\text{A.2.8})$$

Utilizando o método de Newton para solução do sistema de equações não lineares (ver anexo A.5) tem-se, conforme a equação A.1.8:

$$\underset{\sim}{M} \cdot \underset{\sim}{x} = \underset{\sim}{b} \quad (\text{A.2.9})$$

onde:

$$\underline{x}^T = \{\Delta x_L \quad \Delta v_L \quad \Delta h_L \quad \Delta x_R \quad \Delta v_R \quad \Delta h_R \quad \Delta v_{S2} \quad \Delta h_{S2}\} \quad (\text{A.2.10})$$

$$\underline{b}^T = \{-F_1 \quad -F_5 \quad -F_6 \quad -F_3 \quad -F_7 \quad -F_8 \quad -F_4 \quad -F_2\} \quad (\text{A.2.11})$$

$$\underline{M} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_L} & \frac{\partial F_1}{\partial v_L} & \frac{\partial F_1}{\partial h_L} & \frac{\partial F_1}{\partial x_R} & \frac{\partial F_1}{\partial v_R} & \frac{\partial F_1}{\partial h_R} & \frac{\partial F_1}{\partial v_{S_{i+1}}} & \frac{\partial F_1}{\partial h_{S_{i+1}}} \\ \frac{\partial F_5}{\partial x_L} & \frac{\partial F_5}{\partial v_L} & \frac{\partial F_5}{\partial h_L} & \frac{\partial F_5}{\partial x_R} & \frac{\partial F_5}{\partial v_R} & \frac{\partial F_5}{\partial h_R} & \frac{\partial F_5}{\partial v_{S_{i+1}}} & \frac{\partial F_5}{\partial h_{S_{i+1}}} \\ \frac{\partial F_6}{\partial x_L} & \frac{\partial F_6}{\partial v_L} & \frac{\partial F_6}{\partial h_L} & \frac{\partial F_6}{\partial x_R} & \frac{\partial F_6}{\partial v_R} & \frac{\partial F_6}{\partial h_R} & \frac{\partial F_6}{\partial v_{S_{i+1}}} & \frac{\partial F_6}{\partial h_{S_{i+1}}} \\ \frac{\partial F_3}{\partial x_L} & \frac{\partial F_3}{\partial v_L} & \frac{\partial F_3}{\partial h_L} & \frac{\partial F_3}{\partial x_R} & \frac{\partial F_3}{\partial v_R} & \frac{\partial F_3}{\partial h_R} & \frac{\partial F_3}{\partial v_{S_{i+1}}} & \frac{\partial F_3}{\partial h_{S_{i+1}}} \\ \frac{\partial F_7}{\partial x_L} & \frac{\partial F_7}{\partial v_L} & \frac{\partial F_7}{\partial h_L} & \frac{\partial F_7}{\partial x_R} & \frac{\partial F_7}{\partial v_R} & \frac{\partial F_7}{\partial h_R} & \frac{\partial F_7}{\partial v_{S_{i+1}}} & \frac{\partial F_7}{\partial h_{S_{i+1}}} \\ \frac{\partial F_8}{\partial x_L} & \frac{\partial F_8}{\partial v_L} & \frac{\partial F_8}{\partial h_L} & \frac{\partial F_8}{\partial x_R} & \frac{\partial F_8}{\partial v_R} & \frac{\partial F_8}{\partial h_R} & \frac{\partial F_8}{\partial v_{S_{i+1}}} & \frac{\partial F_8}{\partial h_{S_{i+1}}} \\ \frac{\partial F_4}{\partial x_L} & \frac{\partial F_4}{\partial v_L} & \frac{\partial F_4}{\partial h_L} & \frac{\partial F_4}{\partial x_R} & \frac{\partial F_4}{\partial v_R} & \frac{\partial F_4}{\partial h_R} & \frac{\partial F_4}{\partial v_{S_{i+1}}} & \frac{\partial F_4}{\partial h_{S_{i+1}}} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x_L} & \frac{\partial F_2}{\partial v_L} & \frac{\partial F_2}{\partial h_L} & \frac{\partial F_2}{\partial x_R} & \frac{\partial F_2}{\partial v_R} & \frac{\partial F_2}{\partial h_R} & \frac{\partial F_2}{\partial v_{S_{i+1}}} & \frac{\partial F_2}{\partial h_{S_{i+1}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{18} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{81} & \dots & a_{88} \end{bmatrix} \quad (\text{A.2.12})$$

onde  $\Delta$  representa o incremento na solução em cada iteração ( $\Delta f = f^i - f^{i-1}$ ). Os coeficientes não nulos são (supondo rugosidade constante ' $n'$ ):

$$a_{11} = -1 \quad , \quad a_{12} = -\Delta t \quad , \quad a_{13} = \frac{-\Delta t}{2} \cdot \sqrt{g/h_L} \quad (\text{A.1.13})$$

$$a_{21} = -(v_L^p - v_L^a) \quad , \quad a_{22} = \Delta x \quad , \quad a_{31} = -(h_L^p - h_L^a) \quad a$$

$$a_{33} = \Delta x \quad , \quad a_{44} = -1 \quad , \quad a_{45} = -\Delta t \quad (\text{A.1.24})$$

$$a_{46} = \frac{\Delta t}{2} \cdot \sqrt{g/h_R} \quad , \quad a_{54} = -(v_R^p - v_R^a) \quad , \quad a_{55} = \Delta x$$

$$\begin{aligned}
a_{64} &= -(h_R^p - h_R^a) & , a_{66} &= \Delta x & , a_{75} &= \frac{2 n^2 \cdot v_R \cdot g \cdot \Delta t}{R_{h_R}^{4/3}} - 1 \\
a_{78} &= -\sqrt{\frac{g}{h_{S_{i+1}}^J}} & , a_{77} &= 1 & , a_{76} &= \sqrt{\frac{g}{h_R}} - \frac{4 n^2 \cdot v_R^2 \cdot g \cdot \Delta t}{3 \cdot h_R^2 \cdot R_{h_R}^{1/3}} & (A.2.25) \\
a_{88} &= \sqrt{\frac{g}{h_{S_{i+1}}^J}} & , a_{87} &= 1 & , a_{83} &= -\sqrt{\frac{g}{h_L}} - \frac{4 n^2 \cdot v_L^2 \cdot g \cdot \Delta t}{3 \cdot h_L^2 \cdot R_{h_L}^{1/3}} & (A.2.34) \\
a_{82} &= \frac{2 n^2 \cdot v_L \cdot g \cdot \Delta t}{R_{h_L}^{4/3}} - 1
\end{aligned}$$

A inversão das equações se fez necessária para garantir a inexistência de coeficientes nulos na diagonal principal da matriz de solução.

#### A.2.2 - A montante

A montante são utilizadas a característica positiva que parte do ponto M (a equação da inclinação e a do invariante correspondente), as equações de interpolação de  $v_M$  e  $h_M$  (duas equações) e as duas equações de Hugoniot-Rankine, que descrevem o choque. O sistema é escrito na seqüência, depois da simplificação e aplicação das equações 4.2.A a 4.2.F a um canal retangular de largura, declividade longitudinal e rugosidade constantes:

$$\left[ x_{S_{i+1}} - x_M - \left[ (v_M + \sqrt{g h_M}) + (v_{S_{i+1}}^M + \sqrt{g h_{S_{i+1}}^M}) \right] \cdot \frac{\Delta t}{2} \right] = F_1 = 0 \quad (\text{A.2.35})$$

$$\left( v_{S_{i+1}}^M + 2\sqrt{g h_{S_{i+1}}^M} \right) - (v_M + 2\sqrt{g h_M}) - g(t_{S_{i+1}} - t_M) \cdot \left( S_0 - \frac{S_{f_{S_{i+1}}} + S_{f_m}}{2} \right) = F_2 = 0 \quad (\text{A.2.36})$$

$$(v_M - v_M^a) \cdot (x_M^p - x_M^a) - (x_M - x_M^a) \cdot (v_M^p - v_M^a) = F_3 = 0 \quad (\text{A.2.37})$$

$$(h_M - h_M^a) \cdot (x_M^p - x_M^a) - (x_M - x_M^a) \cdot (h_M^p - h_M^a) = F_4 = 0 \quad (\text{A.2.38})$$

$$w \cdot (h_{S_{i+1}}^M - h_{S_{i+1}}^J) - (h_{S_{i+1}}^M \cdot v_{S_{i+1}}^M - h_{S_{i+1}}^J \cdot v_{S_{i+1}}^J) = F_5 = 0 \quad (\text{A.2.39})$$

$$w - v_{S_{i+1}}^J - \sqrt{\frac{g h_{S_{i+1}}^M}{2 h_{S_{i+1}}^J}} \cdot (h_{S_{i+1}}^M - h_{S_{i+1}}^J) = F_6 = 0 \quad (\text{A.2.40})$$

As incógnitas deste sistema de equações são  $x_M$ ,  $v_M$ ,  $h_M$  (características do ponto M),  $h_{S_{i+1}}^M$  e  $v_{S_{i+1}}^M$  (profundidade e velocidade a montante do choque) e  $w$  (celeridade do choque). A solução é dada pelo método de Newton (ver anexo A.5). As matrizes escritas como em A.2.9 encontram-se discretizadas na sequência.

$$M = \begin{Bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_M} & \frac{\partial F_1}{\partial v_M} & \frac{\partial F_1}{\partial h_M} & \frac{\partial F_1}{\partial v_{S_{i+1}}^M} & \frac{\partial F_1}{\partial h_{S_{i+1}}^M} & \frac{\partial F_1}{\partial w} \\ \frac{\partial F_3}{\partial x_M} & \frac{\partial F_3}{\partial v_M} & \frac{\partial F_3}{\partial h_M} & \frac{\partial F_3}{\partial v_{S_{i+1}}^M} & \frac{\partial F_3}{\partial h_{S_{i+1}}^M} & \frac{\partial F_3}{\partial w} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x_M} & \frac{\partial F_2}{\partial v_M} & \frac{\partial F_2}{\partial h_M} & \frac{\partial F_2}{\partial v_{S_{i+1}}^M} & \frac{\partial F_2}{\partial h_{S_{i+1}}^M} & \frac{\partial F_2}{\partial w} \\ \frac{\partial F_4}{\partial x_M} & \frac{\partial F_4}{\partial v_M} & \frac{\partial F_4}{\partial h_M} & \frac{\partial F_4}{\partial v_{S_{i+1}}^M} & \frac{\partial F_4}{\partial h_{S_{i+1}}^M} & \frac{\partial F_4}{\partial w} \\ \frac{\partial F_6}{\partial x_M} & \frac{\partial F_6}{\partial v_M} & \frac{\partial F_6}{\partial h_M} & \frac{\partial F_6}{\partial v_{S_{i+1}}^M} & \frac{\partial F_6}{\partial h_{S_{i+1}}^M} & \frac{\partial F_6}{\partial w} \\ \frac{\partial F_5}{\partial x_M} & \frac{\partial F_5}{\partial v_M} & \frac{\partial F_5}{\partial h_M} & \frac{\partial F_5}{\partial v_{S_{i+1}}^M} & \frac{\partial F_5}{\partial h_{S_{i+1}}^M} & \frac{\partial F_5}{\partial w} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} a_{11} & \dots & a_{16} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{61} & \dots & a_{66} \end{Bmatrix} \quad (\text{A.2.41})$$

$$\tilde{x}^T = \{\Delta x_M \quad \Delta v_M \quad \Delta h_M \quad \Delta v_{S_{i+1}}^M \quad \Delta h_{S_{i+1}}^M \quad \Delta w\} \quad (A.2.42)$$

$$\tilde{b}^T = \{-F_1 \quad -F_3 \quad -F_2 \quad -F_4 \quad -F_6 \quad -F_5\} \quad (A.2.43)$$

Onde  $\Delta$  representa o incremento na solução em cada iteração ( $\Delta f = f^i - f^{i-1}$ ),  $x_{S_i}$  representa a ordenada do choque no instante de tempo conhecido (anterior) e  $x_{S_{i+1}}$  representa a ordenada do choque no instante de tempo desconhecido (assumido como sendo igual para a posição de montante e de jusante do choque). Os coeficientes não nulos são:

$$\begin{aligned} a_{11} &= -1 & , a_{12} &= -\Delta t & , a_{13} &= \frac{-\Delta t}{2} \cdot \sqrt{g/h_{S_{i+1}}^M} \\ a_{21} &= -(v_{P_M} - v_{A_M}) & , a_{22} &= \Delta x & , a_{31} &= -(h_M^p - h_M^a) \\ a_{33} &= \Delta x & , a_{42} &= \frac{g \cdot \Delta t \cdot v_{S_{i+1}}^M \cdot n^2}{R_{h_{S_{i+1}}^M}^{4/3}} - 1 & , a_{44} &= 1 \end{aligned} \quad (A.2.44)$$

a

$$(A.2.59)$$

$$\begin{aligned} a_{43} &= \left\{ \sqrt{g/h_{S_{i+1}}^M} + \frac{4 g \Delta t \cdot (v_{S_{i+1}}^M)^2 \cdot n^2}{3 (h_{S_{i+1}}^M)^2 \cdot R_{h_{S_{i+1}}^M}^{1/3}} \right\} & , a_{45} &= \sqrt{g/h_{S_{i+1}}^M} & , a_{56} &= 1 \\ a_{55} &= \frac{2 h_{S_{i+1}}^M + h_{S_{i+1}}^J}{2} \cdot \sqrt{\frac{g}{2 h_{S_{i+1}}^M \cdot h_{S_{i+1}}^J \cdot (h_{S_{i+1}}^M + h_{S_{i+1}}^J)}} & , a_{65} &= w - v_{S_{i+1}}^M & , a_{64} &= -h_{S_{i+1}}^M \\ a_{66} &= (h_{S_{i+1}}^M - h_{S_{i+1}}^J) \end{aligned}$$

O sistema é resolvido pelo método de Newton (ver anexo A.5). O valor obtido para  $w$  na última iteração da etapa de montante é comparado com o valor inicialmente adotado para a

etapa de jusante (e que determina a posição do choque, através da equação 3.23), repetindo-se os cálculos, se necessário, com os novos valores.

### A.3 - DISCRETIZAÇÃO DO PRIMEIRO INTERVALO DE TEMPO

No primeiro intervalo de tempo, a ruptura é assumida como ideal (sem rugosidade) e é utilizado o método de Stoker. Assim, o cálculo é realizado como descrito no item 3.5.2 do capítulo 3. As equações utilizadas são as equações 3.10.A e 3.10.B, reproduzidas abaixo (válidas para o trecho em parábola, onde são introduzidos os pontos intermediários):

$$\left\{ \begin{array}{l} v(x, t) = \frac{2}{3} \cdot \left( \frac{x}{t} + \sqrt{g \cdot h_1} \right) \end{array} \right. \quad (A.3.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} h(x, t) = \frac{1}{9 \cdot g} \cdot \left( 2 \cdot \sqrt{g \cdot h_1} - \frac{x}{t} \right)^2 \end{array} \right. \quad (A.3.2)$$

O ressalto hidráulico móvel que se forma após a ruptura é calculado pelo sistema de equações não-lineares 3.19.A a 3.19.C, reproduzidos na sequência:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{(w - v_4)^2}{g \cdot h_4} - \frac{1}{2} \cdot \frac{h_3}{h_4} \cdot \left( \frac{h_3}{h_4} + 1 \right) = F_1 = 0 \end{array} \right. \quad (A.3.3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (w - v_4) \cdot h_4 - (w - v_3) \cdot h_3 = F_2 = 0 \end{array} \right. \quad (A.3.4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (v_3 + 2 \cdot \sqrt{g \cdot h_3}) - (v_1 + 2 \cdot \sqrt{g \cdot h_1}) = F_3 = 0 \end{array} \right. \quad (A.3.5)$$

Utilizando a equação matricial A.1.8:

$$\tilde{M} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial w} & \frac{\partial F_1}{\partial h_3} & \frac{\partial F_1}{\partial v_3} \\ \frac{\partial F_2}{\partial w} & \frac{\partial F_2}{\partial h_3} & \frac{\partial F_2}{\partial v_3} \\ \frac{\partial F_3}{\partial w} & \frac{\partial F_3}{\partial h_3} & \frac{\partial F_3}{\partial v_3} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{Bmatrix} \quad (A.3.6)$$

$$x^T = \{\Delta w \quad \Delta h_3 \quad \Delta v_3\} \quad (A.3.7)$$

$$b^T = \{-F_1 \quad -F_2 \quad -F_3\} \quad (A.3.8)$$

Onde  $\Delta$  representa o incremento na solução em cada iteração ( $\Delta f = f^i - f^{i-1}$ ) e os coeficientes não nulos são:

$$a_{11} = \frac{2 \cdot (w - v_4)}{g \cdot h_4} \quad , \quad a_{12} = -\frac{1}{2} \cdot \left( \frac{h_3}{h_4^2} + \frac{h_3}{h_4 \cdot \left( \frac{h_3}{h_4} + 1 \right)} \right) \quad (A.3.9)$$

$$a_{21} = h_4 - h_3 \quad , \quad a_{22} = -(w - v_3) \quad (A.3.15)$$

$$a_{23} = h_3 \quad , \quad a_{32} = \sqrt{g/h_3} \quad , \quad a_{33} = 1$$

A solução é obtida empregando-se o método de Newton (ver anexo A.5).

#### A.4- CÁLCULO DOS PONTOS INTERMEDIÁRIOS

São chamados de pontos intermediários os 19 pontos localizados entre a frente de onda e a onda de depleção do reservatório. Esses pontos são calculados utilizando-se as equações seguintes:

$$\left\{ \begin{aligned} (v_P + 2\sqrt{g \cdot h_P}) - (v_L + 2\sqrt{g \cdot h_L}) &= g \cdot (t_P - t_L) \cdot \left( S_0 - \frac{S_{f_P} + S_{f_L}}{2} \right) \end{aligned} \right. \quad (A.4.1)$$

$$\left\{ \begin{aligned} (v_P - 2\sqrt{g \cdot h_P}) - (v_R - 2\sqrt{g \cdot h_R}) &= g \cdot (t_P - t_R) \cdot \left( S_0 - \frac{S_{f_P} + S_{f_R}}{2} \right) \end{aligned} \right. \quad (A.4.2)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{1}{2} \cdot [(v_P + \sqrt{g \cdot h_P}) + (v_L + \sqrt{g \cdot h_L})] &= \frac{(x_P - x_L)}{(t_P - t_L)} \end{aligned} \right. \quad (A.4.3)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{1}{2} \cdot [(v_P - \sqrt{g \cdot h_P}) + (v_R - \sqrt{g \cdot h_R})] &= \frac{(x_P - x_R)}{(t_P - t_R)} \end{aligned} \right. \quad (A.4.4)$$

Os valores de tempo, distância, velocidade e profundidade ( $t$ ,  $x$ ,  $v$  e  $h$ ) nos pontos L e R são interpolados linearmente nas linhas conhecidas, em função da velocidade e da profundidade arbitrados ou calculados no ponto P na iteração anterior. Os valores iniciais da velocidade e da profundidade no ponto P são adotados como sendo iguais aos valores que existem na mesma abcissa, porém no tempo anterior. Os valores de  $x_L$  e  $x_R$  são calculados pelas equações características, com discretização explícita (ao contrário das equações A.4.1 a A.4.4, que utilizam discretização implícita), mostradas abaixo:

$$\left\{ \begin{aligned} (x_P - x_L) &= (v_P - \sqrt{g \cdot h_P}) \cdot (t_P - t_L) \end{aligned} \right. \quad (A.4.5)$$

$$\left\{ \begin{aligned} (x_P - x_R) &= (v_P - \sqrt{g \cdot h_P}) \cdot (t_P - t_R) \end{aligned} \right. \quad (A.4.6)$$

Conhecendo-se os valores iniciais de  $x_L$  e  $x_R$ , interpola-se os valores de  $v_L$ ,  $h_L$ ,  $v_R$  e  $h_R$  utilizando os pontos já calculados no passo de tempo anterior. Com as características dos pontos L e R conhecidas, e com as equações A.4.1 e A.4.2, impõe-se os

valores de  $t_P$  e  $x_P$  (ponto fixo no espaço e no tempo), e calculam-se os valores de  $v_P$  e  $h_P$ , sem a necessidade das equações A.4.3 e A.4.4, como mostrado a seguir. Os valores obtidos nesse cálculo são utilizados como aproximação para a próxima iteração. O cálculo é continuado até se atingir a precisão desejada.

O sistema de equações A.4.1 e A.4.2 é resolvido utilizando-se a equação matricial A.1.8, com as matrizes resultando:

$$\underline{M} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial v_P} & \frac{\partial F_1}{\partial h_P} \\ \frac{\partial F_2}{\partial v_P} & \frac{\partial F_2}{\partial h_P} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{Bmatrix} \quad (A.4.7)$$

$$\underline{x}^T = \{\Delta v_P \quad \Delta h_P\} \quad (A.4.8)$$

$$\underline{b}^T = \{-F_1 \quad -F_2\} \quad (A.4.9)$$

Os coeficientes da matriz  $\underline{M}$  são:

$$a_{11} = 1 + \frac{g \cdot v_P \cdot n^2 \cdot (t_P - t_L)}{R_{h_P}^{4/3}} \quad (A.4.10)$$

$$a_{12} = \sqrt{g/h_P} - \frac{2 \cdot g \cdot n^2 \cdot v_P^2 \cdot (t_P - t_L)}{3 \cdot h_P^2 \cdot R_{h_P}^{1/3}} \quad (A.4.11)$$

$$a_{21} = 1 + \frac{g \cdot v_P \cdot n^2 \cdot (t_P - t_R)}{R_{h_P}^{4/3}} \quad (A.4.12)$$

$$a_{22} = -\sqrt{g/h_P} - \frac{2 \cdot g \cdot n^2 \cdot v_P^2 \cdot (t_P - t_R)}{3 \cdot h_P^2 \cdot R_{h_P}^{1/3}} \quad (A.4.13)$$

O sistema é resolvido pelo método de Newton (ver anexo A.5).

#### A.5 - MÉTODO DE NEWTON PARA SOLUÇÃO DE SISTEMA DE EQUAÇÕES NÃO- LINEARES

O método, exposto em detalhes em BURDEN[1981], é resumido a seguir.

Dado um sistema de equações não-lineares  $F_i(\underline{X}) = 0$ , com  $i$  variando de 1 a  $N$  (número total de equações), o método consiste em procurar uma função  $J(\underline{X})$  tal que:

$$G(\underline{X}) = \underline{X} - J(\underline{X})^{-1} \cdot F(\underline{X}), \quad (A.5.1)$$

o que conduz a uma aproximação quadrática nos pontos  $\underline{x}_i$ .

A matriz  $J(\underline{X})$  é chamada de Jacobiano, e é composta como

se segue:

$$J(\underline{X}) = \begin{Bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \frac{\partial F_1}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial F_1}{\partial x_N} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x_1} & \frac{\partial F_2}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial F_2}{\partial x_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_N}{\partial x_1} & \frac{\partial F_N}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial F_N}{\partial x_N} \end{Bmatrix} \quad (A.5.2)$$

A solução para a iteração  $k$  é:

$$\underline{x}^k = G(\underline{x}^{k-1}) = \underline{x}^{k-1} - \left[ J(\underline{x}^{k-1}) \right]^{-1} \cdot F(\underline{x}^{k-1}) \quad (A.5.3)$$

O esquema computacional sofre uma pequena alteração na equação acima, do seguinte modo:

$$\Delta \tilde{X}^k = \tilde{X}^k - \tilde{X}^{k-1} = \left[ J(\tilde{X}^{k-1}) \right]^{-1} \cdot \left[ -F(\tilde{X}^{k-1}) \right] \quad (\text{A.5.4})$$

A equação acima é resolvida até que o máximo do vetor  $\Delta \tilde{X}^k$  seja menor que uma tolerância pré-estabelecida. Este algoritmo de resolução encontra-se programado nesta dissertação apenas para matriz quadrada qualquer.

**ANEXO B**

LISTAGEM DO PROGRAMA ANALITIC

LISTAGENS DO PROGRAMA ROTRET E DE SUAS UNITS

LISTAGENS DOS DADOS DOS EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

LISTAGENS SIMPLIFICADAS DE SAÍDA DOS EXEMPLOS

## **ANEXO B**

Este anexo contém as listagens do programa ANALITIC e do programa principal ROTRET, das suas Units (PROC, BASICA, RESOLVE, ONDA e TESTES). Contém, também, as listagens dos dados de entrada dos exemplos de aplicação do capítulo 5- nomeados conforme o ítem e o caso e trechos da saída dos resultados (simplificada devido ao grande volume de resultados impressos normalmente). Os arquivos, em disquetes para utilização em computadores compatíveis com o padrão IBM-PC, podem ser conseguidos com o autor.

```

{
  Utilizacao dos metodos analiticos para estudo de
  RUPTURA DE BARRAGENS

  Metodo de RUTIER : leito seco a jusante
  Metodo de STOKER : leito submerso a jusante
}
PROGRAM ANALITIC;
USES CRT;
VAR
  saida : string; {nome do arquivo de saida}
  arq : text; {arquivo de saida}
  op,opp, {opcoes do programa}
  nt,ti, {n. total e atual do passo de tempo}
  i,p,m,j,k,aaa, {contadores}
  kappa,omega,alfa : integer; {controles internos}

  h0,v0,c0,doisc0,h4,v4, {dados a montante e a jusante da barragem
  antes da ruptura}
  v3,h3,c3,v, {dados da onda}
  dy,dt, {intervalos de profundidade e de tempo}
  aux,tol,lambdas, {variaveis auxiliares}
  xfo,xb,xc, {ordenadas da frente de onda,
  da barragem e do fim do canal}
  w, {velocidade de retirada do obstaculo}
  t, {tempo}
  hfim,hy,xx,xf,xi : real; {dados da parabola}

  x,h,vv : array [1..11] of real; {incognitas}
  xxx,ddy : array [1..3] of real; {vetores da solucao}
  aja,nmm : array [1..3,1..4] of real; {matrizes de coeficientes}

CONST
  g=9.81; {aceleracao da gravidade}
  n=3; {n. de equacoes do sistema nao linear}

PROCEDURE PARABOLA;
{ Calculo da parabola formada na ruptura }
BEGIN
  dy:=(h0-hfim)/9;
  for i:=1 to 10 do
    begin
      h[i] := h0-(i-1)*dy;
    end;
  end;

  h[10] := hfim;
  x[i] := -t*(3*SQRT(g*h[i]))+v0-2*c0;
  vv[i] := (2*c0/3)*(1+(x[i]/(c0*t)));
  x[i] := xb+x[i];
end;

vv[1] := v0;
x[11] := 0;
vv[11] := 2*c0/3;
h[11] := ((x[11]/t)+2*c0-v0)/3;
h[11] := h[11]*h[11]/g;

if x[10]<xb then h[11] := h[10];
x[11] := xb;
for i:=1 to 10 do
  if x[i]>xc then
    begin
      x[i] := xc;
      h[i] := ((xc/t)+2*c0-v0)/3;
    end;
end;
END;

PROCEDURE COEFICIENTES;
{ Coeficientes da matriz Jacobiana }
BEGIN
  v4 := h0*v0/h4;
  c3 := SQRT(abs(g*h3));
  A[1,1] := 2*(v-v4)/(g*h4);
  A[2,1] := h4-h3;
  A[3,1] := 0;
  A[1,2] := -(1/2)*((h3/(h4*h4))+((h3/h4+1)/h4));
  A[2,2] := -(v-v3);
  A[3,2] := SQRT(abs(g/h3));
  A[1,3] := 0;
  A[2,3] := h3;
  A[3,3] := 1;
  A[1,4] := -(((v-v4)*(v-v4))/(g*h4))-((h3/(2*h4))*(h3/h4+1));
  A[2,4] := -(((v-v4)*h4)-((v-v3)*h3));
  A[3,4] := -((v3+2*c3)*(v0+2*c0));

  for i:=1 to n do
    begin
      for j:=1 to n+1 do
        begin
          ja[i,j] := a[i,j];
        end;
      end;
    end;
  end;

```

```

END;

PROCEDURE GAUSS;
{ Resolucao do sistema nao linear }
BEGIN
  for i := 1 to n-1 do
    begin
      repeat
        begin
          p := i-1;
          kappa := 0;
          repeat p := p+1
            until (ja[i,p]<>0) or (p>n);
          if p>n then begin
            writeln (arq,'erro');
            end;
          if p>i then
            for m:=1 to n+1 do
              begin
                aux := ja[p,m];
                ja[p,m] := ja[i,m];
                ja[i,m] := aux;
                kappa := 1;
              end;
          alfa := alfa + 1;
          end;
          until (kappa = 0) or ( alfa>15 );
          for j:=i+1 to n do
            begin
              mm[j,i] := ja[j,i]/ja[i,i];
              for m:= i to n+1 do
                ja[j,m] := ja[j,m]-mm[j,i]*ja[i,m];
              end;
            end;
          ddy[n] := ja[n,n+1]/ja[n,n];
          for i:= n-1 downto 1 do
            begin
              s := 0;
              for j := i+1 to n do
                s := s+ja[i,j]*ddy[j];
              ddy[i] := (ja[i,n+1]-s)/ja[i,i];
            end;
          for i:= 1 to n do xxx[i] := xxx[i]+ ddy[i];
        end;
      end;
    end;
  end;

  lambda := abs(ddy[1]);
  for i :=2 to n do if abs(ddy[i]) > lambda then lambda := abs(ddy[i]);
END;

PROCEDURE INICIO;
{ Inicializacao do sistema nao linear }
BEGIN
  if omega = 0 then
    begin
      v := SQR(g*h4);
      h3 := (h0+h4)/2;
      v3 := (v0/2)*(1+h0/h4);
      xxx[1] := v;
      xxx[2] := h3;
      xxx[3] := v3;
    end
  else
    begin
      v := xxx[1];
      h3 := xxx[2];
      v3 := xxx[3];
    end;
  end;

END;

PROCEDURE NEWTON_RAPHSON;
{ Calcula o sistema nao linear para STOKES }
BEGIN
  tol := 0.00001;
  omega := 0;
  repeat
    begin
      INICIO;
      COEFICIENTES;
      GAUSS;
      omega := omega+1;
    end;
    until (lambda<tol) or (omega>15);
  if omega >15 then
    begin
      writeln (arq,'erro3');
    end;
  end;

END;

PROCEDURE RITTER;
{ 1: Leito seco a jusante }
BEGIN

```



```

write(arq, 'Para as posicoes entre x =', x[10]:9:3, ' m e ');
if xfo > xc then begin
  writeln(arq, 'x =', xc:9:3, ' m');
  writeln(arq, 'temos: profundidade = ', h3:9:3, ' m e velocidade = ', v3:9:3, ' m/s');
end;
if xfo < xc then begin
  writeln(arq, 'x =', xfo:9:3);
  writeln(arq, 'temos: profundidade = ', h3:9:3, ' m e velocidade = ', v3:9:3, ' m/s');
  writeln(arq, ' ', (tt+2):2, ' 4 Trecho Final do Canal');
  writeln(arq);
  writeln(arq, 'Para as posicoes compreendidas entre x =', xfo:9:3, ' m e x =', xc:9:3, ' m');
  writeln(arq, 'temos: profundidade = ', h4:9:3, ' m e velocidade = ', v4:9:3, ' m/s');
end;
writeln(arq);
writeln(arq);
end;
writeln(arq, '===== Fim da analise =====');
END;

BEGIN
  { PROGRAMA PRINCIPAL }

  repeat
    begin
      ClrScr;
      writeln;
      writeln;
      writeln;
      writeln;
      writeln;
      writeln('RUPTURA DE BARRAGENS');
      writeln('metodos analiticos');
      writeln('1- leito seco a jusante,');
      writeln('2- leito submerso a jusante,');
      writeln('3- fim do programa. ');
      writeln;
      writeln('OPCAO [ ] ');
      gotoxy(20, 12);
      readln(op);
      saida := 'standard';
      if op < 3 then
        begin
          write('entre o nome do arquivo de saida : ');
          readln(saida);
          end;
          saida := saida + '.rel';
          assign (ARQ, saida);
          rewrite (ARQ);
          case op of
            1: RUTTER;
            2: STOKER;
          {3: comando de fim de programa}
          end;
        end;
      writeln(arq);
    end;
  until (arq = 'Fim da analise');
END;

```

```
end;  
  close(arg);  
end;  
until op = 3 ;  
END.
```

```
{ Ruptura de barragens canal retangular declividade constante  
  {revisao - 20/08/95}
```

```
  PROGRAM ROTRET;
```

```
{  
  {SF+,O+} {SS}
```

```
  USES CRT,DOS,OVERLAY,BASICA,PROC,RESOLVE,ONDA,TESTES;  
  {SO BASICA} {SO PROC} {SO RESOLVE} {SO ONDA} {SO TESTES}  
  BEGIN
```

```
    NEW(xininat), NEW(hininat); NEW(vininat); NEW(vnat);
```

```
    NEW(hnat); NEW(xx); NEW(hh); NEW(xim); NEW(him);
```

```
    NEW(tf); NEW(choque); NEW(xaa);
```

```
    OVRINIT('ROTRET.OVR');
```

```
    INICIA;
```

```
    REPEAT preproc(op);
```

```
    UNTIL (op=9);
```

```
    END.
```

```
{UNIT BASICA - PROCESSA TODAS AS DEFINICOES DE VARIAVEIS
E PROCEDURES DE USO GERAL }
```

```
{SO+ F+}
```

```
UNIT BASICA;
```

```
INTERFACE
```

```
TYPE
```

```
matdim1 = array[1..100] of real;
matdim2 = array[1..10,1..10] of real;
matdim3 = array[1..300,1..7] of real;
matdim4 = array[1..92,1..2] of real;
```

```
VAR
```

```
opn,oop,tiposec : string[1];
relat : string[8];
relent,relatpro,relatdad : string[12];
com1,com2,com3,com4 : string[40];
arq,arq1,arq2 : text;
```

```
df,opc,op,opca,codi : byte;
```

```
ERRO,dados,dados1,dados2 : boolean;
```

```
nr,m1,mn,mj,omega1,opp,ti,tm,j,kappa,omega,k,aaa,
nnos,n1,j,ti,kj,n1,ms,jj,jsl,tiporel,itermax,
jk,nk,nbar,ret,nchoque,nnosini,nnosnat,nsec,
npassosmax,mj,ik,kk,itermax,permm : integer;
```

```
vs1,v1,vp,vs1,vs2,hs1,vs1,
hl,hp,hm,vm,vpl,va1,hpl,hpl,hpr,vpr,har,
vear,harm,vam,hpm,vpm,xpl,xpm,xpr,xar,xal,
xam,nm,nr,nl,rhl,rhr,rhm,xl,xsl,xm,xss,cel,
xn,x0,h0,w,x0,x0,c0,hfim,xfo,y4,
slambda,dt,dy,c3,v3,hj,v1,coef,aux2,aux3,
deltax,c,dx,temp,yx,xy,a,p,dd,aa,
bb,b,bs,d,vr,q1,s0,h1,h2,h3,h4,v1,v2,csi,aux1,
hr,alfa,mnmn,
tempomax,Rh1,Rh2,Rh3,n1,n2,n3,
sf1,sf2,sf3,x1,x2,x3,h0,hs,va,vs,xa,xr,xd,
ta,tb,ts,tr,ca,cs,xrl,tl,tm,xres,q0,q3,courant,
vref,href,cref,nb,vd,hd,vb,hb,hom,hcj,vcm,vcj,
ea,zfzs,xtc,nm,dif,td,vc,hc,tc,be1,hc2,Fr1,Fr2 : real;
```

```
Xchoque,Vchoque,Hchoque,Hchoque,
CSchoque,FRchoque,Vchoque : array [1..2] of real;
hbb,x,vx : array [1..22] of real;
hv : array [1..100,1..2] of real;
choquant : array [1..3] of real;
xct,tct,vct,hct : array [1..100] of real;
```

```
xxx,ddy,xx,hh,vnat,hmat,
xini,hini,tf,
xininat,hininat,vininat : ^matdim1;
ja : ^matdim2;
choque : ^matdim3;
xaa : ^matdim4;
```

```
CONST
```

```
g=9.81;
tol = 0.0005; { tolerancia de 0,05 % entre iteracoes consecutivas }
Pr = 3.1415927;
tol2 = 150; { numero maximo de iteracoes - elevado por causa de uma
passagem por um ponto de calculo }
tol3 = 0.05; { tolerancia entre as alturas da onda no choque }
```

```
PROCEDURE GAUSS(n: integer);
FUNCTION ELEVA(aa,bb:real):real;
PROCEDURE PREPROC (var op:byte);
PROCEDURE INICIA;
PROCEDURE SEL_ARQ;
```

```
IMPLEMENTATION
```

```
USES CRT,DOS,PROC,TESTES;
```

```
FUNCTION ELEVA(aa,bb:real):real;
```

```
begin
if aa < 0.0001 then eleva := 0
else eleva := EXP(bb*LN(aa));
end;
```

```
PROCEDURE GAUSS(n: integer);
```

```
BEGIN
for i := 1 to n-1 do
begin
repeat
begin
k := i-1;
kappa := 0;
repeat k := k + 1
until (ja^i[k] < 0) or (k > n);
```

```
if k > n then
writeln (arq,'erro');
if k > i then
for mi:=1 to n+1 do
begin
aux1 := ja^i[k,mi];
ja^i[k,mi] := ja^i[i,mi];
```

```

ja^[i,mi] := aux1;
kappa := 1;
end;
alfa := alfa + 1;
end;
until (kappa = 0) or (alfa > 15);
for ji:=i+1 to n do
begin
mm := ja^[ji,i]/ja^[i,i];
for mi:=1 to n+1 do
ja^[ji,mi] := ja^[ji,mi]-mm*ja^[i,mi];
end;
end;
ddy^[n] := ja^[n,n+1]/ja^[n,n];
for i:=n-1 downto 1 do
begin
s := 0;
for ji := i+1 to n do
s := s+ja^[ji,i]*ddy^[ji];
ddy^[i] := (ja^[i,n+1]-s)/ja^[i,i];
end;
end;
for i:=1 to n do xxx^[i] := xxx^[i]+ddy^[i];
lambda := abs(ddy^[1]/xxx^[1]);
for i:=2 to n do if abs(ddy^[i]/xxx^[i]) > lambda then
lambda := abs(ddy^[i]/xxx^[i]);
end;
END;

Procedure INICIA;
erro := false;
df := 0;
op := 0;
mmos := 0;
npassosmax := 0;
dt := 0;
tempomax := 5*60*60;
tiporel := 2;
for k:=1 to 58 do
begin
xini^[k] := 999999.0;
hini^[k] := 0.0;
ximinat^[k] := 0.0;
hininat^[k] := 0.0;
viminat^[k] := 0.0;
xaa^[k,1] := 0;
xaa^[k,2] := 0;
v[k,1] := 0;

```

```

h[k,1] := 0;
end;
relat := ' ';
relatad := 'standard.rel';
com1 := ' ';
for k:=1 to 19 do com1 := com1 + ' ';
com2 := com1; com3 := com1; com4 := com1;
tiposec := ' ';
itempo := 1;
END;

```

```

PROCEDURE SEL_ARQ;
BEGIN
aux1 := (itempo+1)/(itermax div 9);
aux2 := (itempo+1) div (itermax div 9);
if ((abs(aux1-aux2)) < (tol/3)) then
begin
str(round((itempo/(itermax/9)),relapro);
relapro := relat+relapro+'rel';
assign(arq2,relapro);
rewrite(arq2);
i := (itempo+1)/(itermax div 9);
writeln(arq2,com1,com2);
writeln(arq2,com3,com4);
writeln(arq2);
writeln(arq2);
writeln(arq2);
writeln(arq2);
end;
iteracoes := (itempo-1)/4; a := i/4;
END;

```

#### ARQUIVO DE RESULTADOS PARCIAIS...;

```

Procedure DADOS_RETANG;
BEGIN
(dados globais)
dados1 := false;
while not(dados1) do
begin
Window(2,1,60,25);
gotoxy(1,1);
write('A Entrada de dados - canal retangular constante ÁÁÁÁÁÁÁ');
window(2,4,60,23);
ClrScr;
ret := 1;
writeln;
write('> Nome do arquivo de gravacao > ');
readln(relat);
if relat = ' ' then relat := 'saida';
relent := relat+'dad';
writeln('> Comentarios Principais (max. 2x40 carac.) > ');

```

```

readln(com1,com2);
writeln ('> Comentarios Secundarios (max. 2x40 carac.) >');
readln(com3,com4);
write ('> Intervalo de tempo - dt >');
readln(dt);
write ('> Intervalo de espaco - dx >');
readln(dx);
write ('> Largura do canal >');
readln(b);
write ('> Tempo maximo de calculo >');
readln(tempmax);
write ('> Decidividade do canal - constante >');
readln(S0);
write ('> Coeficiente de rugosidade de Manning >');
readln(nn);
write ('> Abcissa do inicio do reservatorio >');
readln(xres);
write ('> Abcissa do final do canal >');
readln(xc);
xfc:= xc;
write ('> Profundidade a montante da barragem >');
readln(h0);
write ('> Profundidade a jusante da barragem >');
readln(h4);
write ('> Velocidade a montante da barragem >');
readln(v0);
write ('> Numero de COURANT, para estab. (<1) >');
readln(courant);
writeln;
writeln;
writeln (' CONFIRMA OS DADOS [S/N] ? >');
readln (oop);
if ((oop = 's') or (oop = 'S')) then
begin
dados1:= true;
df := 1;
end;
end;
{condicoes iniciais}
dados1 := false;
while not(dados1) do
begin
Window(2,1,60,25);
gotoxy (1,1);
write ('Á Entrada de dados - canal retangular constante ÁÁÁÁÁÁ');
window(2,4,60,23);
ClrScr;
writeln;
write ('> Numero de pontos com condicoes iniciais >');
readln (nnosini);
writeln;
writeln(' pares (xini,hini) ');

```

```

writeln;
for i := 1 to nnosini do begin
write(i:9, ' ');
readln(xini[i],hini[i]);
end;
ClrScr;
writeln;
write ('> Numero de pontos com condicoes "naturais" >');
readln (nnosnat);
writeln;
writeln(' termos (ximinat,himinat,viminat) ');
writeln;
for i := 1 to nnosnat do begin
write(i:9, ' ');
readln(ximinat[i],himinat[i],viminat[i]);
end;
writeln;
write ('> Condicao de contorno de montante constante? (S/N) >');
readln(oop);
if ((oop = 's') or (oop = 'S')) then
begin
perm := 1;
end else
begin
perm := 0;
writeln(' OFCAO NAO DISPONIVEL NO MOMENTO');
end;
writeln;
writeln;
writeln (' CONFIRMA OS DADOS [S/N] ? >');
readln (oop);
if ((oop = 's') or (oop = 'S')) then
begin
dados1:= true;
df := 1;
end;
end;
END;
Procedure GRAVA_ARQ;
BEGIN
assign(arq,relent);
rewrite(arq);
window(2,4,60,23);
ClrScr;
gotoxy(15,12);
writeln('GRAVANDO O ARQUIVO > ,relent);
writeln(arq,1,com1,com2);
writeln(arq,2,com3,com4);
writeln(arq,3,ret:3,dx:12.5,dt:9.5,b:9.5,s0:12.10,tempomax:10.5,tiporel:2);

```

```

writeln(arq,4,'m:9:5','xres:15:10','xc:15:10','h0:15:10','y0:20:16','h4:15:10,courant:10:5);
writeln(arq,5,'mosnat:5');
for i:=1 to mosnat do writeln(arq,'xini'^[i]:15:10,'hini'^[i]:15:10);
writeln(arq,6,'mosnat:5');
for i:=1 to mosnat do writeln(arq,'ximinat'^[i]:15:10,'himinat'^[i]:15:10,'vininat'^[i]:20:16);
writeln(arq,9');
close(arq);
writeln('pressionne qualquer tecla para continuar...'); readkey;

END;

Procedure LE_ARQ;
BEGIN
  INICIA;
  window(2,4,60,23);
  ClrScr;
  gotoxy(7,12);
  write(> Entre com o nome do arquivo >');
  readln(relat);
  relat := relat+'dad';
  assign(arq1,relat);
  reset(arq1);
  writeln;
  writeln(' LENDO O ARQUIVO >',relat);
  gotoxy(5,20);
  write('pressionne qualquer tecla para continuar...');readkey;
repeat
begin
  read(arq1,codi);
  case codi of
    1 : readln (arq1,com1,com2);
    2 : readln (arq1,com3,com4);
    3 : readln (arq1,ret,dx,dy,b,s0,tempomax,tiporel);
    4 : readln (arq1,m,xres,xc,h0,y0,h4,courant);
    5 : begin readln (arq1,mosnat);
        for i:=1 to mosnat do readln (arq1,xini'^[i],hini'^[i]);
        end;
    6 : begin readln(arq1,mosnat);
        for i:=1 to mosnat do readln (arq1,ximinat'^[i],himinat'^[i],vininat'^[i]);
        end;
    end;
  end;
until codi = 9;
close(arq1);
window(1,1,80,25);
gotoxy(65,2);
writeln(relat);
window(2,4,60,23);
ClrScr;
END;

Procedure TROCANOME_ARQ;
BEGIN
  window(2,4,60,23);
  ClrScr;
  gotoxy(15,12);
  write('ALTERANDO O NOME DO ARQUIVO >',relat);
  gotoxy(15,14);
  write('ENTRE NOVO NOME >');
  readln(relat);
  relat := relat+'DAD';
  gotoxy(15,16);
  write('NOVO NOME DO ARQUIVO DE SAIDA >',relat);
  gotoxy(5,20);
  write('pressionne qualquer tecla para continuar...');readkey;
  window(1,1,80,25);
  gotoxy(65,2);
  writeln(' ');
  gotoxy(65,2);
  writeln(relat);
  window(2,4,60,23);
  ClrScr;
  END;

Procedure MANIPULA;
BEGIN
  dados1 := false;
  opc := 0;
  while not(dados1) do
  begin
    Window (2,4,60,23);
    ClrScr;
    Window(2,1,60,25);
    gotoxy (1,1);
    write ('A Manipulacao de arquivos  ÁÁÁÁÁÁÁÁÁÁÁÁÁÁÁÁÁÁÁÁÁÁÁÁÁÁÁÁÁÁ');
    Window (62,4,78,23);
    ClrScr;
    writeln ('MANIPULACAO');
    writeln;
    writeln ('1 gravar arq. ');
    writeln ('2 ler arq. ');
    writeln ('3 troca nome ');
    writeln ('4 ');
    writeln ('5 ');
    writeln ('6 ');
    writeln ('7 ');
    writeln ('8 ');
    writeln ('9 ret. princ. ');
    gotoxy (1,13);
    write ('Opcao: [ ]');
  end;
end;

```

```

gotoxy(9,13);
readln(opc);
Case opc of
  1 : GRAVA_ARQ;
  2 : LE_ARQ;
  3 : TROCANOME_ARQ;
  9 : dados1 :=true;
end;
end;

```

END;

### Procedure RELATORIO;

**BEGIN**

```

dados1 := false;
opc := 0;
while not(dados1) do
begin
    Window(2,4,60,23);
    ClrScr;
    Window(2,1,60,25);
    gotoxy(1,1);
    write('A Tipo de relatório de saída dos resultados  ÁÁÁÁÁÁÁÁÁ');
    Window(62,4,78,23);

```

```

CURSOR,
writen ('RELATORIOS');
writen,
writen ('1 Relat. Compl. ');
writen ('2 Relat. Sucin. ');
writen ('3 ');
writen ('4 ');
writen ('5 ');
writen ('6 ');
writen ('7 ');
writen ('8 ');
writen ('9 Ret. Princip. ');
gotoxy ('1,13');
write ('Opcao: [ ]');
gotoxy ('9,13');
readln (opc);
Case opc of
1 : tiporel := 1;
2 : tiporel := 2;
9 : dados1 := true;
end;
end;
```

END:

### Procedure SAI<sub>2</sub>

```
BEGIN
    Window(2,4,60,23);
    ClrScr;
    Window(2,1,60,25);
    gotoxy(1,1);
    write('AAAAAA Saída da rotina de Entrada de dados AAAAAAAAXX');
    Window(62,4,78,23);
    ClrScr;
    writeln('SAIDA');
    writeln;
    writeln('1 Ret. ant. ');
    writeln('2 ');
    writeln('3 ');
    writeln('4 ');
    writeln('5 ');
    writeln('6 ');
    writeln('7 ');
    writeln('8 ');
    writeln('9 Sai entr. ');
    gotoxy(1,13);
    write('Opcao: [ ]');
    gotoxy(9,13);
    readln(opcao);
    Case opcao of
        1 : opcao := 1 ;
           9 : opcao := 2 ;
    end;
END;
```

### Procedure ENTRADADOS;

**BEGIN**

```

dados := false;
while not(dados) do
begin
  Window (2,4,60,23);
  ClrScr;
  Window(2,1,60,25);
  gotoxy (1,1);
  write ('A. Entrada de dados AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA');
  Window (62,4,78,23);
  ClrScr;
  writeln ('ENTRADA DE DADOS');
  writeln;
  writeln ('1 ');
  writeln ('2 Dados Retang. ');
  writeln ('3 ');
  writeln ('4 ');
end;

```

```

write ('U');
window(1,1,80,25);
gotoxy(65,2);
writeln(
);
gotoxy(65,2);
writeln(relat);
window(2,4,60,23);
if op = 0 then begin
    window(2,4,60,23);
    gotoxy(9,12);
    writeln('BEM VINDO AO PROGRAMA DE RUPTURA DE BARRAGENS');
    writeln;
    writeln('CANAL RETANGULAR COM DECLIVIDADE CONSTANTE...');
end;

Window(62,4,78,23);
writeln('Menu:');
writeln;
writeln('1 Entr. dados ');
writeln('2 Manipula arq. ');
writeln('3 Relatorio ');
writeln('4 Processamento');
writeln('5 Testes ');
writeln('6 ');
writeln('7 ');
writeln('8 ');
writeln('9 Fim ');
Window(62,4,78,23);
gotoxy(1,13);
write ('Opcao: [ ]');
gotoxy(9,13);
readln(op);
Case op of
    1 : ENTRADADADOS;
    2 : MANIPULA;
    3 : RELATORIO;
    4 : PROCESSA;
    5 : TESTE;
end;
END;
END.

writeln(5);
writeln(6);
writeln(7);
writeln(8);
writeln('9 Saída ');
gotoxy(1,13);
write ('Opcao: [ ]');
gotoxy(9,13);
readln(op);
Case op of
    2 : DADOS_RETANG;
    9 : SAI;
end;
if (opc=9) and (opca=2) then dados := true
else dados := false;
end;
window(2,63,2,78);
ClrScr;
write(relent:13);
END;

PROCEDURE Preproc (var op:byte);
var i : byte;
BEGIN
    Window(1,1,80,25);
    ClrScr;
    write ('U');
    for i:=2 to 60 do write('A');
    write ('A');
    for i:=62 to 78 do write('A');
    write ('Z ');
    write ('v');
    gotoxy(61,wherey);write ('v ');
    gotoxy(79,wherey);write ('v ');
    write ('A');
    for i:=2 to 60 do write ('A');
    write ('A');
    for i:=62 to 78 do write('A');
    write (' ');
    for i:=4 to 23 do
        begin
            write ('v');
            gotoxy(61,wherey);write ('v ');
            gotoxy(79,wherey);write ('v ');
            end;
    write ('A');
    for i:=2 to 60 do write ('A');
    write ('A');
    for i:=62 to 78 do write ('A');

```

```

(UNIT PROC - PROCESSA A ANALISE DA ONDA )
{SO+,F+}
UNIT PROC;

INTERFACE
PROCEDURE PROCESSA;
IMPLEMENTATION
USES CRT,DOS,BASICA,RESOLVE,ONDA;

Procedure WRITE_FIM;
BEGIN
if tiporel = 1 then begin
append(arq); writeln(arq); writeln(arq);
writeln(arq,'dados da frente de onda nesse instante de tempo ',(tempo-1):4);
writeln(arq);
writeln(arq,'Tempo =',(t-dt):15:5);
writeln(arq,'posicao do choque =','xc:15:12);
writeln(arq,'celeridade =','cs:choque[1]:15:12);
writeln(arq,'velocidade a montante =','v:choque[1]:15:12);
writeln(arq,'profundidade a montante =','h:choque[1]:15:12);
writeln(arq,'velocidade a jusante =','vj:choque[1]:15:12);
writeln(arq,'profundidade a jusante =','hj:choque[1]:15:12);
writeln(arq,'posicao do ponto critico =','xc:15:12);
writeln(arq,'velocidade na onda negativa =','vc:15:12);
writeln(arq,'profundidade no pt critico =','hc:15:12);
writeln(arq);
writeln(arq,'posicao da onda negativa =','xc[22]:15:12);
writeln(arq,'velocidade na onda negativa =','vc[22]:15:12);
writeln(arq,'profundidade na onda negativa =','hc[22]:15:12);
writeln(arq);
writeln(arq,'');
close(arq);append(arq); end;
END;

Procedure ARMAZENAR1;
BEGIN
if tiporel = 1 then begin
writeln(arq,'j xaa[j,2] h[j,1] v[j,1] ');
for j := 1 to nnos do writeln(arq,j:3,'xaa[j,2]:15:12,,h[j,1]:15:12,,v[j,1]:15:12);
writeln(arq);
end;
WRITE_FIM;
append(arq);

```

```

writeln(arq2,'
writeln(arq2);
writeln(arq2,0,'Dados de entrada: ');
writeln(arq2);
writeln(arq2,1,'com1,com2);
writeln(arq2,2,'com3,com4);
writeln(arq2,3,'ret3','dx:12:5','dt:9:5','b:9:5','s0:12:10','tempomax:10:5','tiporel:2);
writeln(arq2,4,'mu:9:5','xtres:15:10','xci:15:10','h0:15:10','v0:20:16','h4:15:10,courant:10:5);
writeln(arq2,5,'mnosini:5);
for i := 1 to nnosini do writeln(arq2,'xini'[i]:15:10,'himi'[i]:15:10);
writeln(arq2,6,'mnosnat:5);
for i := 1 to nnosnat do writeln(arq2,'xininat'[i]:15:10,'hininat'[i]:15:10,'vininat'[i]:20:16);
writeln(arq2,9');
writeln(arq2);
writeln(arq2,'Perfil inicial (x,h,v,Zf,Zs) : ');
writeln(arq2);
for j := 1 to nnos do begin
if abs(xaa[j,2]) < tol then begin
aux1 := h[j,1];
aux2 := v[j,1];
h[j,1] := h0;
v[j,1] := v0;
end;
Zf := (xfo-xaa[j,2])*s0;
Zs := Zf-h[j,1];
writeln(arq2,j:3,'xaa[j,2]:15:12,,h[j,1]:15:12,,v[j,1]:15:12,
',Zf:15:10,,Zs:15:10);end;
for j := 1 to nnos do if (abs(xaa[j,2]) < tol) then begin
h[j,1] := aux1;
v[j,1] := aux1;
end;
writeln(arq2);
writeln(arq2,'*****');
WRITELN(ARQ2);
writeln(arq2,'*** RESULTADOS PARA O TEMPO = ',t:10:5,'segundos');
writeln(arq2);
writeln(arq2,1,'Resultados no trecho afetado pelo choque (x,h,v,Zf,Zs) : ');
for i := 1 to 20 do begin
Zf := (xfo-xci[i])*s0;
Zs := Zf-hci[i];
writeln(arq2,xc[i]:15:10,,hci[i]:15:10,,
vci[i]:15:10,,zf:15:10,,zs:15:10);end;
writeln(arq2);
writeln(arq2,2,'Resultados do choque e do ponto critico (x,h,v,Zf,Zs) : ');
writeln(arq2);
Zf := (xfo-xci[42])*s0;
Zs := Zf-hci[42];
writeln(arq2,choque montante : ',xc[42]:15:10,,hci[42]:15:10,,vci[42]:15:10
',zf:15:10,,zs:15:10);
Zf := (xfo-xchoque[2])*s0;

```

```

Zs := Zf+hchoque[2];
writeln(arq2,choque,jusante,'xchoque[2]:15:10,,hchoque[2]:15:10,,vchoque[2]:15:10);
,,zf:15:10,,zs:15:10);
Zf := (xfo-xc)*s0;
Zs := Zf+hc;
writeln(arq2,critico,'xc:15:10,,hc:15:12,,vc:15:10,,zf:15:10,,zs:15:10);
writeln(arq2);
writeln(arq2,3, Resultados ao longo do canal (x,h,v,ZfZs) ');
aaa := 1;
while xaa[aaa,1] <= xct[1] do aaa := aaa+1;
repeat
  j := 1;
  while xct[j] < xaa[aaa,1] do j := j+1;
  j := j-1;
  aux1 := (xaa[aaa,1]-xct[j])/(xct[j+1]-xct[j]);
  v[aaa,1] := aux1*vct[j+1]+(1-aux1)*vct[j];
  h[aaa,1] := aux1*hct[j+1]+(1-aux1)*hct[j];
  v[aaa,2] := v[aaa,1];
  h[aaa,2] := h[aaa,1];
  aaa := aaa+1;
until (xaa[aaa,1] > xct[21]);
for j := 1 to mnos do begin
  v[aaa,1] := v[aaa,2];
  h[aaa,1] := h[aaa,2];
  Zf := (xfo-xaa[j,2])*s0;
  Zs := Zf+h[j,1];
  writeln(arq2,j,3,'xaa[j,2]:15:12,,h[j,1]:15:12,,v[j,1]:15:12,,Zf:15:10,,Zs:15:10);end;

writeln(arq2);
choque^[tempo-1,1] := Xchoque[1];
choque^[tempo-1,2] := Vchoque[1];
choque^[tempo-1,3] := Hchoque[1];
choque^[tempo-1,4] := Vchoque[1];
choque^[tempo-1,5] := Hchoque[1];
choque^[tempo-1,7] := FRchoque[1];
choque^[tempo-1,6] := CSchoque[1];
choquant[1] := Xchoque[1];
choquant[2] := Hchoque[1];
choquant[3] := Vchoque[1];
choque^[tempo,1] := Xchoque[2];
choque^[tempo,2] := Vchoque[2];
choque^[tempo,3] := Hchoque[2];
choque^[tempo,4] := Vchoque[2];
choque^[tempo,5] := Hchoque[2];
choque^[tempo,7] := FRchoque[2];
choque^[tempo,6] := CSchoque[2];
Xchoque[1] := Xchoque[2];
Vchoque[1] := Vchoque[2];
Hchoque[1] := Hchoque[2];
Vchoque[1] := Vchoque[2];

Hchoque[1] := Hchoque[2];
FRchoque[1] := FRchoque[2];
CSchoque[1] := CSchoque[2];
t := t-dt;
itempo := itempo+1;
j := 1; repeat { := j+1 until h[j,1] <= 0.0001;
for i := j to mnos do begin
  v[i,1] := vnat[i];
  h[i,1] := hnat[i];end;
for i:= 1 to mnos do begin
  v[i,2] := v[i,1];
  h[i,2] := h[i,1];
  xaa[i,1] := xaa[i,2];
end;
for i := 1 to 21 do begin
  xct[i] := xct[i+21];
  tct[i] := tct[i+21];
  vet[i] := vet[i+21];
  hct[i] := hct[i+21]; end;
END;

PROCEDURE LOCAL_X_M(A:real;VAR B,C,D,E,F,G,L:real;VAR AAA:INTEGER);
BEGIN
  aaa := 1;
  while xaa[aaa,2] <= a do aaa := aaa+1;
  aaa := aaa-1;
  if aaa = 0 then begin
    writeln(arq,A,onda negativa atinguiu o fltimo intervalo de espao');
    erro := TRUE;
  end else begin
    b := q0/hr^[aaa];
    c := q0/hr^[aaa+1];
    d := hr^[aaa];
    e := hr^[aaa+1];
    f := xaa^[aaa,2];
    g := xaa^[aaa+1,2];
    l := t - dt;
    if tiporel = 1 then begin
      writeln(arq,a:15:12,b:15:12,c:15:12,d:15:12,e:15:12);
      writeln(arq,f:15:12,g:15:12,l:15:12,aaa:5);
      writeln(arq); end;
    end;
  END;

PROCEDURE AJUSTA;
BEGIN
  xx^[1] := xini^[1];
  hr^[1] := hini^[1];
  nseo := trunc ((xc-xres)/dx+0.5)+1;

```

```

nmos := nsec;
nbar := trunc(-xres/dx+0.5)+1;
nchoque := trunc(xfo/dx+0.5)+1;
i := 1;
repeat begin
  i := i+1;
  xx[i] := xx[1]+(i-1)*dx;
  j := 1;
  while xini[i] <= xx[j]
    do j := j+1;
  coef := (xx[j]-xini[j-1])/(xini[j]-xini[j-1]);
  hni[i] := coef*hini[j]+(1-coef)*hini[j-1];
end;
until xx[i-1] > xc;
if xx[nmos] > xc then begin
  j := 2;
  while xini[j] <= xx[nsec] do begin
    j := j+1;
  end;
  hni[nsec] := hini[j-1];
end;

m := nsec;
while xx[m] >= xfo
do m := m-1;
j := m+1;
for k := 1 to nmos do if hni[k] > 0.0 then
begin
  xaa[k,1] := xx[k];
  h[k,1] := hni[k];
  v[k,1] := q0/h[k,1];
end;
if j > (m+1) then {existem secos no trecho parabólico}
repeat begin
  kj := 1;
  while xx[m+1] > x[kj] do kj := kj+1;
  coef := (xx[m+1]-x[kj-1])/(x[kj]-x[kj-1]);
  hni[m+1] := coef*hni[kj]+(1-coef)*hni[kj-1];
  h[m+1,1] := hni[m+1];
  v[m+1,1] := (2*c0/3)*(1+(x[m]/(c0*b)));
  m := m+1;
end;
until m = j;
for k := 1 to nmos do begin v[k,2] := v[k,1];
  h[k,2] := h[k,1]; end;
}

FRchoque[1] := v0/SQRT(g*h0);
FRchoque[2] := v3/SQRT(g*h3);
Xchoque[1] := 0;
Vchoque[1] := v0;
Hchoque[1] := h0;
Vchoque[2] := v4;
Hchoque[2] := h4;

CSchoque[1] := 0;
Xchoque[2] := xfo;
Vchoque[2] := v3;
Hchoque[2] := h3;
Vchoque[2] := v4;
Hchoque[2] := h4;
CSchoque[2] := c;
if tiporel = 1 then begin
  writeh(arq,fr1,fr2,x1,x2,h1,h2,v1,v2,w1,w2,vj1,vj2-choque e nmos);
  writeh(arq,FRchoque[1]:9.5,'',FRchoque[2]:9.5,'',Xchoque[1]:9.5,'',
    Xchoque[2]:9.5,'',Hchoque[1]:9.5,'',Hchoque[2]:9.5,'',
    Vchoque[1]:9.5,'',Vchoque[2]:9.5,'',CSchoque[1]:9.5,'',
    CSchoque[2]:9.5,'',Vchoque[1]:9.5,'',Vchoque[2]:9.5,'',nmos:5);
  writeh(arq); end;
}

k := 1;
i := nsec;
while xx[k] < x[1] do k := k+1;
k := k-1;
while xx[i] > x[20] do i := i-1;
i := i+1;
h[i+3,1] := h4;
v[i+3,1] := v4;
h[i+3,2] := h4;
v[i+3,2] := v4;

for j := 1 to nsec do begin v[j,1] := v[j,2];
  h[j,1] := h[j,2];
  xaa[j,2] := xx[j]; end;
for i := 1 to 20 do begin
  xct[i] := x[i];
  hct[i] := h[i];
  tet[i] := t;
  vct[i] := (2*c0/3)*(1+(xct[i]/(c0*tet[i])));
end;

LOCAL X_M(xct[i],vam,vpm,ham,hpm,xam,xpm,tm,mm);
vct[1] := vam+(xct[1]-xam)/(xpm-xam)*(vpm-vam);
if itempo=1 then for j := 1 to nmos do if (xaa[j,2]>x[20])
and (xaa[j,2]<xchoque[2])
then begin v[j,1] := vchoque[2];
  v[j,2] := v[j,1];
  h[j,1] := hchoque[2];
  h[j,2] := h[j,1]; end;
}

for i := 1 to nmos do begin
  j := 2;
  while xiniat[j] <= xaa[j,2] do j := j+1;
  coef := (xaa[j,2]-xiniat[j-1])/(xiniat[j]-xiniat[j-1]);
  vnat[i] := coef*viniat[j]+(1-coef)*viniat[j-1];
  hnat[i] := coef*hiniat[j]+(1-coef)*hiniat[j-1];
end;

```

```

hcm := h[1,1];
vcm := v[1,1];
hcj := h[nnos,1];
vcj := v[nnos,1];
xct[21] := xchoque[2];
tct[21] := t;
vct[21] := vchoque[2];
hcct[21] := hchoque[2];
for i := 1 to 21 do begin
  xct[i+21] := xct[i];
  tct[i+21] := tct[i];
  vct[i+21] := vct[i];
  hcct[i+21] := hcct[i]; end;
END;

Procedure ARMAZENAR2;
BEGIN
  WRITE_FIM;
  append(arq2);
  WRITELN(ARQ2);
  writeln(arq2, '*** RESULTADOS PARA O TEMPO = 't:10:5,' segundos');
  writeln(arq2, '1. Resultados no trecho afetado pelo choque (x,h,v,Zf,Zs) :');
  writeln(arq2);
  for i := 1 to 20 do begin
    Zf := (xaa'[nnos,2]-xct[i])*s0;
    Zs := Zf+hcct[i];
    writeln(arq2,xct[i]:15:10,'',zf:15:10,'',zs:15:10)end;
    vct[i]:15:10,'',zf:15:10,'',zs:15:10)end;

    writeln(arq2);
    writeln(arq2, '2. Resultados do choque e do ponto critico (x,h,v,Zf,Zs) :');
    writeln(arq2);
    Zf := (xaa'[nnos,2]-xct[42])*s0;
    Zs := Zf+hcct[42];
    writeln(arq2,choque montante : 'xct[42]:15:10,'',hcct[42]:15:10,'',vct[42]:15:10
    '','',zf:15:10,'',zs:15:10);
    Zf := (xaa'[nnos,2]-xchoque[2])*s0;
    Zs := Zf+hchoque[2];
    writeln(arq2,choque jussante : 'xchoque[2]:15:10,'',hjchoque[2]:15:10,'',vjchoque[2]:15:10
    '','',zf:15:10,'',zs:15:10);
    Zf := (xaa'[nnos,2]-xc)*s0;
    Zs := Zf+hcc;
    writeln(arq2,critico : 'xc:15:10,'',hc:15:12,'',vc:15:10,'',zf:15:10,'',zs:15:10);
    writeln(arq2);
    writeln(arq2, '3. Resultados ao longo do canal (x,h,v,Zf,Zs) :');
    aaa := 1;
    while xaa'[aaa,1] <= xct[1] do aaa := aaa+1;
    repeat
      j := 1;
      while xct[j] < xaa'[aaa,1] do j := j+1;
      aux1 := ((xaa'[aaa,1]-xct[j])/(xct[j+1]-xct[j]));
      v[aaa,1] := aux1*vct[j+1]+(1-aux1)*vct[j];
      h[aaa,1] := aux1*hcct[j+1]+(1-aux1)*hcct[j];
      v[aaa,2] := v[aaa,1];
      h[aaa,2] := h[aaa,1];
      aaa := aaa+1;
      until (xaa'[aaa,1] > xct[21]);
      for j := 1 to nnos do begin
        hj[j,1] := hj[j,2];
        v[j,1] := v[j,2];
        Zf := (xfo-xaa'[j,2])*s0;
        Zs := Zf+hj[j,1];
        writeln(arq2,j:3,'',xaa'[j,2]:15:12,'',hj[j,1]:15:12,'',v[j,1]:15:12,
        '','',Zf:15:10,'',Zs:15:10)end;
        writeln(arq2);close(arq2);
        if itempo = 2 then begin
          choque'[itempo-1,1] := Xchoque[1];
          choque'[itempo-1,2] := Vchoque[1];
          choque'[itempo-1,3] := Hchoque[1];
          choque'[itempo-1,4] := Vjchoque[1];
          choque'[itempo-1,5] := Hhchoque[1];
          choque'[itempo-1,6] := FRchoque[1];
          choque'[itempo-1,7] := CSchoque[1];
          choque'[itempo-1,8] := CSchoque[2];
          end;
          choquant[1] := Xchoque[1];
          choquant[2] := Hchoque[1];
          choquant[3] := Vchoque[1];
          choque'[itempo,1] := Xchoque[2];
          choque'[itempo,2] := Vchoque[2];
          choque'[itempo,3] := Hchoque[2];
          choque'[itempo,4] := Vjchoque[2];
          choque'[itempo,5] := Hhchoque[2];
          choque'[itempo,6] := FRchoque[2];
          choque'[itempo,7] := CSchoque[2];
          Xchoque[1] := Xchoque[2];
          Vchoque[1] := Vchoque[2];
          Hchoque[1] := Hchoque[2];
          Vjchoque[1] := Vjchoque[2];
          Hhchoque[1] := Hhchoque[2];
          FRchoque[1] := FRchoque[2];
          CSchoque[1] := CSchoque[2];
          t := t+dt;
          itempo := itempo+1;
          for i := 1 to 21 do begin
            xct[i] := xct[i+21];
            tct[i] := tct[i+21];
            vct[i] := vct[i+21];
            hcct[i] := hcct[i+21];
            end;
          rewrite(arq);

```

```

END;

PROCEDURE CRITICO;
BEGIN
  {para a frente de onda}
  Fr1 := vcf[42]/SQRT(g*hc[42]);
  if Fr1 > 1 then begin
    x1 := xcf[42];
    x2 := xcf[41];
    v2 := vcf[41];
    Fr2 := v2/SQRT(g*hc[41]);
    j := 41;
    h2 := hc[41];
    v2 := vcf[41];
    h1 := hc[42];
    v1 := vcf[42];
    if Fr2 >= 1 then repeat
      if tiporel = 1 then begin
        writeln(arq,v1:15:12,'h1:15:12','h2:15:12','hc1:15:12','Fr1:15:12','x1:15:12';
        writeln(arq,v2:15:12,'h2:15:12','hc2:15:12','Fr2:15:12','x2:15:12';
        end;
      j := j-1;
      Fr1 := Fr2;
      Fr2 := vcf[j]/SQRT(g*hc[j]);
      x1 := x2;
      x2 := xcf[j];
      until Fr2 < 1;
      if tiporel = 1 then begin
        writeln(arq,'Critico-v,h,Fr,x');
        writeln(arq,v1:15:12,'h1:15:12','h2:15:12','hc1:15:12','Fr1:15:12','x1:15:12';
        writeln(arq,v2:15:12,'h2:15:12','hc2:15:12','Fr2:15:12','x2:15:12';
        writeln(arq,j:1,1,21,'j:4);
        writeln(arq,XXX,'xcf[j]:15:10','xcf[j+1]:15:10','xcf[j-1]:15:10','xcf[21]:15:10';
        writeln(arq,TT,'hc[j]:15:10','hc[j+1]:15:10','hc[j-1]:15:10','hc[21]:15:10';
        writeln(arq,VV,'vcf[j]:15:10','vcf[j+1]:15:10','vcf[j-1]:15:10','vcf[21]:15:10';
        writeln(arq,HH,'hc[j]:15:10','hc[j+1]:15:10','hc[j-1]:15:10','hc[21]:15:10';
      end;
    {Utilizando como critério de interpolação}
    interp. linear da prof. critica
    if j >= 1 then begin
      v1 := vcf[j+1];
      v2 := vcf[j];
      h1 := hc[j+1];
      h2 := hc[j];
      hc1 := ELEVA((h1*h1*v1*v1/g),(1/3));
      hc2 := ELEVA((h2*h2*v2*v2/g),(1/3));
      hc := ((h2*(hc1-hc2)-hc2*(h1-h2))/((hc1-hc2)-(h1-h2)));
      vc := SQRT(g*hc);
      xc := xcf[j]+((hc-hc2)/(hc1-hc2))*(xcf[j+1]-xcf[j]);
    end
  else begin
    hc := 0;
  end;
END;

vc := 0;
xc := 0;
end;
else begin
  hc := 0;
  vc := 0;
  xc := 0;
end;
end;

if tiporel = 1 then begin
  writeln(arq,'CRITICO...');
  writeln(arq,j:5);
  writeln(arq,v,h,Fr,x - secões 1, 2 e do critico x,h,v');
  writeln(arq,v1:15:12,'h1:15:12','h2:15:12','hc1:15:12','Fr1:15:12','x1:15:12';
  writeln(arq,v2:15:12,'h2:15:12','hc2:15:12','Fr2:15:12','x2:15:12';
  writeln(arq,xc:15:12,'hc:15:12','vc:15:12';
  writeln(arq);
end;
END;

PROCEDURE LOCAL_CAR(E:integer;VAR A,B,C,D:REAL);
BEGIN
  if A < xcf[1] then begin
    xa := xcf[22];
    xb := xcf[1];
    xc := A;
    xd := xcf[E];
    ta := tcf[22];
    tb := tcf[1];
    tc := t-dt;
    td := t;
    va := vcf[22];
    ha := hc[22];
    vb := vcf[1];
    hb := hc[1];
    B := (xc-xa)*(xd-xc)/(td-tc)+ta*(xb-xa)/(tb-ta)/
      ((xb-xa)/(tb-ta)-(xd-xc)/(td-tc));
    A := ((B-ta)/(tb-ta))*(xd-xc)+xa;
    C := ((B-ta)/(tb-ta))*(vb-xa)+va;
    D := ((B-ta)/(tb-ta))*(hb-ha)+ha;
  end
  else if a > xcf[21] then begin
    xa := xcf[E];
    xb := A;
    xc := xcf[21];
    xd := xcf[42];
    ta := t;
    tb := t-dt;
    tc := tcf[21];
    td := tcf[42];
    vc := vcf[21];
  end;

```

```

Rh1 := b*hc[ik]/(b+2*hc[ik]);
Rh2 := b*hl/(b+2*hl);
Rh3 := b*hr/(b+2*hr);
Sf1 := (nm*nm*vc[ik]*vc[ik]*ELEVA(Rh1,(4/3)));
sf2 := (nm*nm*vj*ELEVA(Rh2,(4/3)));
sf3 := (nm*nm*vr*ELEVA(Rh3,(4/3)));
if tiporel = 1 then begin
  writeln(arq,Rh1,Rh2:15:10,Rh3:15:10,h3:15:10);
  writeln(arq,Sf1,sf2:15:10,sf3:15:10);
end;
aux1 := (sf1+sf2)/2;
aux2 := (sf1+sf3)/2;
ja^1,1 := 1+g*vc[ik]*nm*nm*(tc[ik]-t)/ELEVA(ch1,(4/3));
ja^1,2 := SQR(T(g*hc[ik])-(2*g*nm*nm*vc[ik]*vc[ik]*(tc[ik]-t)/
  (3*hc[ik]*hc[ik]*ELEVA(Rh1,(1/3))));
ja^2,1 := 1+g*vc[ik]*nm*nm*(tc[ik]-t)/ELEVA(ch1,(4/3));
ja^2,2 := -SQR(T(g*hc[ik])-(2*g*nm*nm*vc[ik]*vc[ik]*(tc[ik]-t)/
  (3*hc[ik]*hc[ik]*ELEVA(Rh1,(1/3))));
ja^1,3 := -(vc[ik]-2*SQR(T(g*hc[ik]))-(v+2*SQR(T(g*hl))
  -g*(tc[ik]-t)*(s0-aux1)));
ja^2,3 := -(vc[ik]-2*SQR(T(g*hc[ik]))-(vr-2*SQR(T(g*hr))
  -g*(tc[ik]-t)*(s0-aux2)));
if tiporel = 1 then begin
  writeln(arq,pontos intermediarios);
  writeln(arq);
  writeln(arq,ja^1,1:20:12,ja^1,2:20:12,ja^1,3:20:12);
  writeln(arq,ja^2,1:20:12,ja^2,2:20:12,ja^2,3:20:12);
end;
ea := lambda;
GAUSS(2);
if lambda<ea then begin
  vc[ik] := (vc[ik]+xxx^1)/2;
  hc[ik] := (hc[ik]+xxx^2)/2;
end else begin
  vc[ik] := xxx^1;
  hc[ik] := xxx^2;end;
omega := omega+1;
if tiporel = 1 then begin
  writeln(arq);
  writeln(arq,ja^1,1:20:12,ja^1,2:20:12,ja^1,3:20:12);
  writeln(arq,ja^2,1:20:12,ja^2,2:20:12,ja^2,3:20:12);
  writeln(arq,tempo:vc[ik]:15:12,ik:3);
  writeln(arq,posicao:vc[ik]:15:12);
  writeln(arq,velocidade:vc[ik]:15:12);
  writeln(arq,profundidade:hc[ik]:15:12);
  writeln(arq,lambda,lambda:20:15);
  writeln(arq);
end;
until ((lambda<tol) or (omega>tol2));
end;
END;

```

```

hc := hc[21];
vd := vc[42];
hd := hc[42];
aux1 := (xc-xa-tc*(xd-xc)/(td-tc)+ta*(xb-xa)/(tb-ta))/
  ((xb-xa)/(tb-ta)-(xd-xc)/(td-tc));
A := ((aux1-tc)/(td-tc))*(xd-xc)+xc;
C := ((aux1-tc)/(td-tc))*(vd-vc)+vc;
D := ((aux1-tc)/(td-tc))*(hd-hc)+hc;
B := aux1;
end
else begin
  aaa := 1;
  while (xc[aaa]<A) do aaa := aaa+1; aaa:= aaa-1;
  aux1 := (A-xc[aaa])/(xc[aaa+1]-xc[aaa]);
  B := tc[aaa+1]*aux1+tc[aaa]*(1-aux1);
  C := vc[aaa+1]*aux1+vc[aaa]*(1-aux1);
  D := hc[aaa+1]*aux1+hc[aaa]*(1-aux1);
end;
END;

```

```

PROCEDURE CARACTERISTICAS;
BEGIN
  dif := (xc[42]-xc[22])/20;
  for i := 1 to 19 do begin
    xc[22+i] := xc[22]+dif;
    vc[22+i] := vc[21]*i/20+vc[1]*(20-i)/20;
    hc[22+i] := hc[21]*i/20+hc[1]*(20-i)/20;
    tc[22+i] := tend;
  end;
  if tiporel = 1 then for i := 1 to 42 do begin
    writeln(arq,*****t,xc[i]:20:12,tc[i]:20:12);
    writeln(arq,*****v,h,vc[i]:20:12,tc[i]:20:12);
    writeln(arq);end;
  for ik := 23 to 41 do begin
    omega := 1;
    xl := xc[ik]-(vc[ik]+SQR(T(g*hc[ik])))*dt;
    xr := xc[ik]-(vc[ik]-SQR(T(g*hc[ik])))*dt;
    if tiporel = 1 then writeln(arq,ik:6,xc[ik]:20:12,xl:20:12,xr:20:12);
    LOCAL_CAR(ik,xl,tl,vl,hl);
    LOCAL_CAR(ik,xr,tr,vr,hr);
    repeat
      xl := xc[ik]-(vc[ik]+SQR(T(g*hc[ik]))-vl+SQR(T(g*hr)))*dt/2;
      xr := xc[ik]-(vc[ik]-SQR(T(g*hc[ik]))-vr+SQR(T(g*hr)))*dt/2;
      LOCAL_CAR(ik,xl,tl,vl,hl);
      LOCAL_CAR(ik,xr,tr,vr,hr);
    until tiporel = 1 then begin
      writeln(arq,ik:6,XX,xc[ik]:20:12,xl:20:12,xr:20:12);
      writeln(arq,hl,hc[ik]:20:12,hl:20:12,hr:20:12);
      writeln(arq,vv,vc[ik]:20:12,vl:20:12,vr:20:12);
      writeln(arq,tt,tc[ik]:20:12,tl:20:12,tr:20:12);
    end;
    xxx^1 := vc[ik];
    xxx^2 := hc[ik];
  end;

```

```

PROCEDURE FIM_PRIM_ONDA;
BEGIN
  DISPOSE(VNAT); DISPOSE(HNAT); DISPOSE(HININAT); DISPOSE(VININAT);
  DISPOSE(XININAT); DISPOSE(XX); DISPOSE(XINI); DISPOSE(HINI);
  NEW(ja); NEW(XXX); NEW(ddy);
  writeln('Primeiro intervalo de tempo armazenado...');
  writeln;
  writeln;
  END;

PROCEDURE CALC_SEC;
begin
  writeln(arq);
  writeln(arq, Tempo : 'ctf[42]:15:10);
  writeln(arq);
  aaa := 1;
  while xaa^[aaa,1] <= xct[1] do aaa := aaa+1;
  repeat
    j := 1;
    while xct[j] < xaa^[aaa,1] do j := j+1;
    j := j-1;
    aux1 := ((xaa^[aaa,1]-xct[j])/(xct[j+1]-xct[j]));
    v[aaa,1] := aux1*vct[j+1]+(1-aux1)*vct[j];
    h[aaa,1] := aux1*hc[1]+(1-aux1)*hc[j];
    v[aaa,2] := v[aaa,1];
    h[aaa,2] := h[aaa,1];
    aaa := aaa+1;
  until (xaa^[aaa,1] > xct[21]);
  writeln(arq, 'dados de nas secos pre-definidas');
  writeln(arq);
  writeln(arq, 'valores de x,h e v');
  writeln(arq);
  for i := 1 to nnos do
    writeln(arq,i,3,'xaa^[i,2]:15:10','h[i,1]:15:10','v[i,1]:15:10);
  writeln(arq, ' ');
end;
PROCEDURE TEST;
BEGIN
  APPEND(ARQ2);
  FOR I := 1 TO 5 DO WRITELN(ARQ2);
  FOR I := 1 TO NNOS DO WRITELN(ARQ2, I,5,'XAA^[I,2]:20:13);
  CLOSE(ARQ2);APPEND(ARQ2);
  END;

PROCEDURE PROCESSA;
begin
  INICIALIZA_PROCESSA;
  PRIM_ONDA;
  AJUSTA;
  CRITICO;
  { Calcula a primeira onda de choque, analiticamente }
  { Ajusta os dados para as proximas iteracoes }
  { Calcula a localizacao do primeiro ponto critico }

```

```

PROCEDURE CARACT_NEG;
BEGIN
  xct[22] := xct[1]+(vct[1]-SQRT(g*hc[1]))*dt;
  tct[22] := t;
  LOCAL X_M(xct[22],vam,vpm,hm,hpm,xam,xpm,tm,mm);
  aux1 := (xct[22]-xam)/(xpm-xam);
  vct[22] := aux1*vpm+(1-aux1)*vam;
  hc[22] := aux1*hpm+(1-aux1)*ham;
  if tiporel = 1 then begin
    writeln(arq);
    writeln(arq, '*****', tct[22]:15:12);
    writeln(arq, 'xct[22]:15:12);
    writeln(arq, 'vct[22]:15:12);
    writeln(arq, 'hc[22]:15:12);
  end;
  repeat
    x1 := xct[22];
    xct[22] := xct[1]+(1/2)*(vct[1]-SQRT(g*hc[1]))+
      vct[22]-SQRT(g*hc[22]))*dt;
    tct[22] := t;
    LOCAL X_M(xct[22],vam,vpm,hm,hpm,xam,xpm,tm,mm);
    aux1 := (xct[22]-xam)/(xpm-xam);
    vct[22] := aux1*vpm+(1-aux1)*vam;
    hc[22] := aux1*hpm+(1-aux1)*ham;
    until (ABS(x1-xct[22])<10);
    if tiporel = 1 then begin
      writeln(arq);
      writeln(arq, tct[22]:15:12);
      writeln(arq, xct[22]:15:12);
      writeln(arq, vct[22]:15:12);
      writeln(arq, hc[22]:15:12);
      writeln(arq, 'fim da CARAC_NEG');
    end;
  END;
PROCEDURE INICIALIZA_PROCESSA;
BEGIN
  window(2,2,60,25);
  writeln(' RUPTURA DE BARRAGEM / CANAL RETANGULAR');
  window(1,1,80,25);
  gotoxy(65,2);
  writeln(relat);
  window(2,4,60,23);
  ClrScr;
  relatad := relat + 'sad';
  relatpro := relat + '0,rel';
  assign(arq2, relatpro);
  assign(arq, relatad);
  rewrite(arq);
  rewrite(arq2);
  close(arq2);
  itemax := round(tempomax/dt);
  END;

```

```

ARMAZENAI;      { Guarda o primeiro intervalo de tempo }
FIM PRIM ONDA;
while (({choque[1]}<var'[nnos,2])and(t<tempomax)
and(erro=false) and ((Hchoque[1]/Hchoque[1])>(1+tol3))) or
((ABS(h[2,2]-h[2,1])/h[2,2])>tol)) do begin
  SEL_ARQ;
  if itempo > 301 then TEST;
  CARACT_NEG;
  if itempo > 301 then TEST;
  writeln('Onda negativa calculada - ',itempo:4);
  ONDA_CHOQUE;
  if itempo > 301 then TEST;
  writeln('Onda calculada - ONDA_CHOQUE ');
  CARACTERISTICAS;
  if itempo > 301 then TEST;
  writeln('Pontos internos calculados');
  CRITICO;
  writeln('Ponto critico calculado');
  ARMAZENAI2;
  if itempo > 301 then TEST;
  writeln('Dados armazenados... NOVA ITERACAO');
  writeln;
  CALC_SEC;
  if itempo > 301 then TEST;
  end;

rewrite(arq);
AJUSTA2;
while((t<tempomax) and ((h[2,2]-h[2,1])/h[2,2])<tol) and (nnos<100)) do begin
  SEL_ARQ;
  SOLUCAO;
  writeln('Escoamento nao permanente calculado ');
  AUMENTA;
  ARMAZENAI3;
  writeln('Dados armazenados... NOVA ITERACAO - ',itempo:5);
  writeln; end;

END;
END.

```

```

{UNIT ONDA - PROCESSA A ANALISE DA ONDA }
{$O+;F+}
UNIT ONDA;

INTERFACE
  PROCEDURE ONDA_CHOQUE;
  PROCEDURE PRIM_ONDA;
IMPLEMENTATION
  USES CRT,DOS,BASICA;

  PROCEDURE PARABOLA;
  BEGIN
    dy:=(href-hfm)/19;
    for i:=1 to 20 do
      begin
        hhh[i] := href-(i-1)*dy;
        x[i] := -t*(3*SQR(g*hhh[i])+vref-2*cref);
      end;
      if itempo > 1 then begin
        i := 1;
        writeln('itempo>1');
        repeat
          j := 1;
          while xaa[j],1<x[i] do j := j+1;
          writeln(j:=j:0);
          coef := (x[i]-xaa[j-1,1])/
            (xaa[j,1]-xaa[j-1,1]);
          hhh[i] := coef*hfj-1,1)+(1-coef)*hfj,1;
        until i>20;
        x[21] := xchoque[1];
        vx[21] := vchoque[1];
        x[22] := xres;
      end;
      if itempo = 1 then begin
        x[21] := xfo;
        hhh[21] := h3;
        vx[21] := v3;
        x[22] := 0;
        hhh[22] := 4*href/9;
        vx[22] := 2*cref/3;
        if x[20]<xres then hhh[22] := hhh[20];
      end;
    end;
  END;

  PROCEDURE COEFFICIENT;
  BEGIN
    INICIAL;
    COEFFICIENT;
    GAUSS(3);
    omega := omega+1;
  END;

```

```

  BEGIN
    v4 := h0*v0/h4;
    c3:= SQR(abs(g*h3));
    for i:= 1 to 4 do for j:=1 to 4 do ja'[i,j] := 0.0;
    ja'[1,1] := 2*(c-v4)/(g*h4);
    ja'[2,1] := h4-h3;
    ja'[3,1] := 0;
    ja'[1,2] := -(1/2)*((h3/(h4*h4))+((h3/h4+1)/h4));
    ja'[2,2] := -(c-v3);
    ja'[3,2] := SQR(abs(g/h3));
    ja'[1,3] := 0;
    ja'[2,3] := h3;
    ja'[3,3] := 1;
    ja'[1,4] := -(((c-v4)*(c-v4)/(g*h4))-((h3/(2*h4))*(h3/h4+1)));
    ja'[2,4] := -(((c-v4)*h4)-(c-v3)*h3);
    ja'[3,4] := -((v3+2*c3)-(v0+2*c0));
  END;

  PROCEDURE INICIAL;
  BEGIN
    if omega = 0 then
      begin
        c := SQR(g*h4);
        h3 := (h0+h4)/2;
        v3 := (v0/2)*(1+h0/h4);
        xxx'[1] := c;
        xxx'[2] := h3;
        xxx'[3] := v3;
      end
    else
      begin
        c := xxx'[1];
        h3 := xxx'[2];
        v3 := xxx'[3];
      end;
    end;
  END;

  PROCEDURE PRIM_ONDA;
  BEGIN
    NEW(ja, NEW(xxx), NEW(ddy);
    if itempo =1 then begin
      c0 := SQR(g*h0);
      omega := 0;
      repeat
        begin
          INICIAL;
          COEFFICIENT;
          GAUSS(3);
          omega := omega+1;
        end;
      until omega = 1;
    end;
  END;

```

```

    end;
    until (lambda<tol)or(omega>15);
    if omega > 15 then writeln (arq,'erro3');
    t := dt;
    xl := -t*(c0+v0);
    hfim := h3;
    xfo := c*t;
    cref := SQR(g*h0);
    vref := v0;
    href := h0;
    q0 := v0*h0;
    q3 := v3*h3;
    end;
PARABOLA;
if tiporel = 1 then begin writeln(arq,'pontos notaveis: x,h,v,yc,Fr');
    writeln(arq); end;
for j:=1 to 20 do hhh[j] := hhh[j]-x[j]*s0;
for j:=1 to 20 do if hhh[j]<h3 then hhh[j] := h3;
for j := 1 to 20 do begin
    if j = 1 then vx[j] := v0 else
        vx[j] := (2*c0/3)*(1-(x[j]/(c0*t)));
    aux1 := eleva((vx[j]*vx[j]*hhh[j]*hhh[j]*hhh[j]/g),(1/3));
    aux3 := vx[j]/SQR(g*hhh[j]);
    if tiporel = 1 then writeln(arq,x[j]:15:12,'',vx[j]:15:12,'',hhh[j]:15:12,'',aux1:15:12,'',aux3:15:12);
    end;
    if itempo > 1 then begin
        cref := SQR(g*hhh[j]);
        vref := h0*v0/hhh[j];
        href := hhh[j];
        hfim := hhh[20];
    end;
END;

PROCEDURE COEF_OND_IUS;
BEGIN
    for j := 1 to 8 do for i := 1 to 9 do ja[i,j] := 0.0;
    ja[1,1] := -1;
    ja[1,2] := -dt;
    ja[1,3] := -(dt/2)*SQR(g/hl);
    ja[2,1] := -(vpl-val);
    ja[2,2] := (xpl-xal);
    ja[3,1] := -(hpl-hal);
    ja[3,3] := (xpl-xal);
    ja[4,4] := -1;
    ja[4,5] := -dt;
    ja[4,6] := (dt/2)*SQR(g/hr);
    ja[5,4] := (vear-vpr);
    ja[5,5] := (xpr-xar);
    ja[6,4] := (har-hpr);
END;

PROCEDURE COEF_OND_MONT;
BEGIN
    for j := 1 to 6 do for i := 1 to 7 do ja[i,j] := 0.0;
    ja[1,1] := -1;
    ja[1,2] := -dt/2;
    ja[1,3] := -(dt/4)*SQR(g/hm);
    ja[1,4] := -dt/2;
    ja[1,5] := -(dt/4)*SQR(g/hsl1);
    ja[2,1] := -(vpm-vam);
    ja[2,2] := (xpm-xam);
    ja[3,1] := -(hpm-ham);
    ja[3,3] := (xpm-xam);
    ja[5,5] := (-SQR(g/(2*hs12)/2))*(2*hs1+hs12)/(SQR(g*hs1)*(hs1+hs12));
    ja[5,6] := 1;
    nm := nm;
    rhm := (b*hm)/(b+2*hm);
    nl := nm;
    rh1 := (b*hs1)/(b+2*hs1);
    ja[4,2] := (g*dt*nm*nm*nm*vm)/ELEVA(rhm,(4/3))-1;
    ja[4,3] := (-SQR(g/hm))*(-(2*dt*g*nm*nm*vm*vm)/(3*hm*hm*eleva(rhm,1/3)));
    ja[4,4] := 1+(g*dt*nl*nl*vs1)/ELEVA(rh1,(4/3));
    ja[4,5] := SQR(g/hsl1)*(-(2*dt*g*nl*nl*vs1)/(3*hs1*hs1*eleva(rh1,1/3)));
    ja[6,4] := -hs1;
END;

```

```

f := xct[aaa];
g := xct[aaa+1]; end;

l := t - dt;
END;

PROCEDURE INICIA_OND_JUS;
BEGIN
  if omega1 = 0 then
    begin
      xsl := xss+wsl*dt;
      xl := (xss+xsl)/2;
      xt := (3*xsl-xss)/2;
      LOCALIZA_X_J(xl, val, vpl, hal, hpl, xal, xpl, tl, ml);
      LOCALIZA_X_J(xt, veat, vpr, har, hpr, xar, xpr, tr, mr);
      vl := val + ((xl-xal)*(vpl-val)/(xpl-xal));
      hl := hal + ((xl-xal)*(hpl-hal)/(xpl-xal));
      vr := veat + ((xt-xar)*(vpr-veat)/(xpr-xar));
      hr := har + ((xt-xar)*(hpr-har)/(xpr-xar));
      hsl2 := (hl+hr)/2;
      vsl2 := (vl+vr)/2;
      xxx[1] := (xl);
      xxx[2] := (vl);
      xxx[3] := (hl);
      xxx[4] := (xt);
      xxx[5] := (vr);
      xxx[6] := (hr);
      xxx[7] := (vs12);
      xxx[8] := (hsl2);
    end
  else
    begin
      xl := (xxx[1]);
      xt := (xxx[4]);
      if vl < vr then begin vs12 := (xxx[7]);
        hsl2 := (xxx[8]); end else
        begin vs12 := vl;
          hsl2 := hl; end;
      LOCALIZA_X_J(xl, val, vpl, hal, hpl, xal, xpl, tl, ml);
      LOCALIZA_X_J(xt, veat, vpr, har, hpr, xar, xpr, tr, mr);
      vl := val + ((xl-xal)*(vpl-val)/(xpl-xal));
      hl := hal + ((xl-xal)*(hpl-hal)/(xpl-xal));
      vr := veat + ((xt-xar)*(vpr-veat)/(xpr-xar));
      hr := har + ((xt-xar)*(hpr-har)/(xpr-xar));
      xxx[2] := vl;
      xxx[3] := hl;
      xxx[5] := vr;
      xxx[6] := hr;
    end;
  end;
END;

```

PROCEDURE INICIA\_OND\_MONT;

```

ja[6,5] := wsl-vsl1;
ja[6,6] := hsl1-hsl2;
ja[1,7] := -(xsl-xm-dt*(vm+SQRT(g*hm))));
aux1 := s0-(1/2)*(vm*vm*nm*nm/ELEVA(rhm,(4/3)))+(vsl1*vm1*nm1/ELEVA(rh1,(4/3))));
ja[4,7] := -(vsl1-2*SQRT(g*hm1))-(vm+2*SQRT(g*hm))-g*dt*aux1;
ja[2,7] := -(vm-vam)*(xpm-xam)-(xm-xam)*(vpm-vam));
ja[3,7] := -(hm-ham)*(xpm-xam)-(xm-xam)*(hpm-ham));
ja[6,7] := -(wsl*(hsl1-hsl2)-(fsl1*vm1-hsl2*vs12));
ja[5,7] := -(wsl-vsl2-SQRT(g*hm1)*(hsl1+hsl2)/2hsl2);
END;

PROCEDURE LOCALIZA_X_J(A:real; VAR B,C,D,E,F,G,L:real; VAR AAA:INTEGER);
BEGIN
  aaa := 1;
  while xaa[aaa,2] <= a do aaa := aaa+1;
  aaa := aaa-1;
  if a > xss then begin
    b := v[aaa,1];
    c := v[aaa+1,1];
    d := h[aaa,1];
    e := h[aaa+1,1];
    f := xaa[aaa,2];
    g := xaa[aaa+1,2];
    l := t-dt;
    if xaa[aaa,2] < xss then begin
      f := xss;
      b := v[choque[1];
      d := h[choque[1];
    end;
  end;
END;

PROCEDURE LOCALIZA_X_M(A:real; VAR B,C,D,E,F,G,L:real; VAR AAA:INTEGER);
BEGIN
  if a >= x[20] then begin
    b := v3;
    c := Vchoque[1];
    d := h3;
    e := Hchoque[1];
    f := x[10];
    g := Xchoque[1];
  end else begin
    aaa := 20;
    while x[aaa] >= a do aaa := aaa-1;
    b := vct[aaa];
    c := vct[aaa+1];
    d := hct[aaa];
    e := hct[aaa+1];
  end;
END;

```

```

BEGIN
  if omega1 = 0 then
    begin
      xm := (3*xss-xsl)/2;
      hs := Hchoque[1];
      vs := Vchoque[1];
      LOCALIZA_X_M(xm,vam,vpm,hpm,xam,xpm,tm,mm); (dados de P nao utilizaveis)
      vm:= vam + ((xm-xam)*(vpm-vam)/(xpm-xam));
      hm:= ham + ((xm-xam)*(hpm-ham)/(xpm-xam));
      hsl := hchoque[1];
      vsl := vchoque[1];
      xxx^[1] := (xm);
      xxx^[2] := (vm);
      xxx^[3] := (hm);
      xxx^[4] := (vsl);
      xxx^[5] := (hsl);
      xxx^[6] := (vsl);
    end
  else
    begin
      xm := (xxx^[1]);
      vsl := (xxx^[4]);
      hsl := (xxx^[5]);
      wsl := (xxx^[6]);
      LOCALIZA_X_M(xm,vam,vpm,hpm,xam,xpm,tm,mm);
      vm:= vam + ((xm-xam)*(vpm-vam)/(xpm-xam));
      hm:= ham + ((xm-xam)*(hpm-ham)/(xpm-xam));
      xxx^[2] := vm;
      xxx^[3] := hm;
    end;
  end;
END;

PROCEDURE ARMARZ_CHOQUE;
BEGIN
  { para este instante de tempo }
  Vchoque[2] := vsl;
  Xchoque[2] := xsl;
  Hchoque[2] := hsl;
  CSIchoque[2] := wsl;
  FRchoque[2] := vsl/SQRT(g*hsl);
  Hchoque[2] := hsl;
  Vchoque[2] := vsl;
  xct[42] := xchoque[2];
  vct[42] := vchoque[2];
  hct[42] := hchoque[2];
  tct[42] := t;
  if tiporel = 1 then begin
    writeln(arc,'negativa');
    writeln(arc,'tempo:',tct[22]:15:12);
    writeln(arc,'posicao:',xct[22]:15:12);
  end;

  writeln(arc,'velocidade:',vct[22]:15:12);
  writeln(arc,'profundidade:',hct[22]:15:12);
  writeln(arc,'choque');
  writeln(arc,'tempo:',tct[42]:15:12);
  writeln(arc,'posicao:',xct[42]:15:12);
  writeln(arc,'velocidade:',vct[42]:15:12);
  writeln(arc,'profundidade:',hct[42]:15:12);
end;
END;

PROCEDURE ONDA_CHOQUE;
BEGIN
  omega := 0;
  xss := xchoque[1];
  wsl := CSIchoque[1];
  cel := wsl;
  repeat
    omega := omega + 1;
  {JUSANTE}
  omega1 := 0;
  repeat
    INICIA_OND_JUS;
    COEF_OND_JUS;
    GAUSS(8);
    omega1 := omega + 1;
  until (omega1 > tol/2) or (lambda < tol);
  if tiporel = 1 then writeln(arc,'tempo:5,omega:6,omega1:6,' onda-jusante');
  {MONTANTE}
  omega1 := 0;
  repeat
    INICIA_OND_MONT;
    COEF_OND_MONT;
    GAUSS(6);
    omega1 := omega1 + 1;
  until (omega1 > tol/2) or (lambda < tol);
  if tiporel = 1 then writeln(arc,'tempo:5,omega:6,omega1:6,' onda-montante');
  {VERIFICA}
  if tiporel = 1 then begin
    WRITELN(ARQ,'ONDA DE CHOQUE');
    WRITELN(ARQ,'TEMPO = ',T:5:2,' ITERACAO = ',OMEGA1:4);
    WRITELN(ARQ);
    WRITELN(ARQ,'WSL,XL,S,HSL1,HSL2,VSL1,VSL2,XL,VL,HL,XR,VR,HR,XM,VM,HM');
    WRITELN(ARQ,'WSL:15:10','XSL:15:10','XSL:15:10','HSL1:15:10','HSL2:15:10','VSL1:15:10','VSL2:15:10');
    WRITELN(ARQ,'XL:15:10','VL:15:10','HL:15:10','XR:15:10','VR:15:10','HR:15:10');
    WRITELN(ARQ,XM:15:10,'VM:15:10','IIM:15:10');
  end;
  lambda := ABS((wsl-cel)/cel);
  cel := wsl;
  until (omega > tol/2) or (lambda < (tol));

```

```
ARMAZ_CHOQUE;  
if tiporel = 1 then writeIn(arq,itempo.5; onda-armazena);  
END;  
END.
```

```

{ Unit RESOLVE : Calcula a solucao do sistema de equacoes }
{ nao lineares - 29/06/94 }
{ CANAL RETANGULAR DE DECLIVIDADE CONSTANTE }
{SO+ F+}
UNIT RESOLVE;
{08/07/94}

INTERFACE
PROCEDURE SOLUCAO;
PROCEDURE AJUSTA2;
PROCEDURE ARMAZENAS3;
PROCEDURE AUMENTA;

IMPLEMENTATION
USES CRT,DOS,BASICA;

PROCEDURE AJUSTA2;
BEGIN
  append(arq2);
  writeln(arq2,'Onda Dissipada...');
  writeln(arq2,'Posicao : ',xct[42]:15:10);
  writeln(arq2,'Tempo : ',tct[42]:15:10);
  writeln(arq2);
  aaa := 1;
  while xaa'[aaa,1] <= xct[1] do aaa := aaa+1;
  repeat
    j := 1;
    while xct[j] < xaa'[aaa,1] do j := j+1;
    j := j-1;
    aux1 := ((xaa'[aaa,1]-xct[j])/(xct[j+1]-xct[j]));
    v[aaa,1] := aux1*vct[j+1]+(1-aux1)*vct[j];
    h[aaa,1] := aux1*hct[j+1]+(1-aux1)*hct[j];
    aaa := aaa+1;
  until (xaa'[aaa,1] > xct[21]);
  writeln(arq2,'dados de transicao do choque, apos dissipacao');
  writeln(arq2);
  writeln(arq2,'valores de x,h e v');
  for i := 1 to nmos do
    writeln(arq2,i:3,'xaa'[i,2]:15:10,'h[i,1]:15:10,'v[i,1]:15:10);
  writeln(arq2,'');
  close(arq2);
  {calculo do novo delta t, observando a condicao de COURANT}
  aux1 := v[1,1]+SQRT(g*h[1,1]);
  for i := 2 to nmos do
    begin
      aux2 := v[i,1]+SQRT(g*h[i,1]);
      if aux2 > aux1 then aux1 := aux2;
    end;
  ja'[1,1] := -1;

```

```

aux1 := dv/(COURANT*aux1);
aux2 := int(aux1/dt);
dt := aux2;
END;

PROCEDURE ARMAZENAS3;
BEGIN
  append(arq2);
  WRITELN(ARQ2);
  writeln(arq2, '*** RESULTADOS PARA O TEMPO = ',t:10:5,' segundos');
  writeln(arq2);
  writeln(arq2,'1. Resultados ao longo do canal (x,h,v,Zf,Zs) :');
  writeln(arq2);
  for j := 1 to nmos do begin
    h[j,1] := h[j,2];
    v[j,1] := v[j,2];
    Zf := (xct-xaa'[j,2])*s0;
    Zs := Zf+h[j,1];
    writeln(arq2,j:3,'xaa'[j,2]:15:12,'h[j,1]:15:12,'v[j,1]:15:12,
    ',Zf:15:10,'Zs:15:10);end;

  writeln(arq2);
  itempo := itempo+1;
  t := t+dt;
  close(arq2);
  rewrite(arq);
END;

PROCEDURE AUMENTA;
BEGIN
  if tiporel = 2 then
    if v[nmos-1,2] < v[nmos-1,1] then begin
      for i := 1 to 5 do begin
        h[nmos+1,1] := h[nmos,1];
        v[nmos+1,1] := v[nmos,1];
        h[nmos+1,2] := h[nmos,1];
        v[nmos+1,2] := v[nmos,1];
        xaa'[nmos+1,2] := xaa'[nmos,2]+t*dx;
        xaa'[nmos+1,1] := xaa'[nmos+1,2];
      end;
      nmos := nmos+5;
      writeln('canal ampliado...nmos := ',nmos:3);
      append(arq2);
      writeln(arq2,'canal ampliado...nmos := ',nmos:3);
    end;
  END;

PROCEDURE COEF_CAR;
BEGIN
  for j := 1 to 8 do for i := 1 to 9 do ja'[i,j] := 0.0;
  ja'[1,1] := -1;

```

```

ja^1[1,2] := -dt;
ja^1[1,3] := -(dt/2)*SQRT(g/hl);
ja^1[2,1] := -(vpl-val);
ja^1[2,2] := (xpl-xal);
ja^1[3,1] := -(hpl-hal);
ja^1[3,3] := (xpl-xal);
ja^1[4,4] := -1;
ja^1[4,5] := -dt;
ja^1[4,6] := (dt/2)*SQRT(g/hr);
ja^1[5,4] := (vcar-vpr);
ja^1[5,5] := (xpr-xar);
ja^1[6,4] := (hpr-hpr);
ja^1[6,6] := (xpr-xar);
nr := nn;
rhr := (b*hr)/(b+2*hr);
ja^1[7,5] := 2*g*dt*vr*nr*ELEVA(rhr,(4/3))-1;
ja^1[7,6] := 2*SQRT(g/hr)/2-(4*g*dt*vr*nr*nr/
  (3*hr*ELEVA(rhr,(1/3))));
ja^1[7,7] := 1;
ja^1[7,8] := -2*SQRT(g/hsl2)/2;
nl := nn;
rhl := (b*hl)/(b+2*hl);
ja^1[8,2] := (2*g*nl*nl*dt*vr*nr*ELEVA(rhl,(4/3))-1;
ja^1[8,3] := -2*SQRT(g/hl)/2-(4*g*dt*vr*nl*nl/
  (3*hl*ELEVA(rhl,(1/3))));
ja^1[8,7] := 1;
ja^1[8,8] := 2*SQRT(g/hsl2)/2;
ja^1[1,9] := -(xsl-xl-dt*(vl+SQRT(g*hl)));
aux1 := s0-(vl*vl*nl*nl*ELEVA(rhl,(4/3)));
ja^1[8,9] := -(vsl2+2*SQRT(g*hl2)-(vl+2*SQRT(g*hl))-g*dt*aux1);
ja^1[4,9] := -(xsl-xr-dt*(vr-SQRT(g*hr)));
aux2 := s0-(vr*vr*nr*nr*ELEVA(rhr,(4/3)));
ja^1[7,9] := -(vsl2+2*SQRT(g*hl2)-(vr+2*SQRT(g*hr))-g*dt*aux2);
ja^1[2,9] := -(vl-val)*(xpl-xal)-(xl-xal)*(vpl-val);
ja^1[3,9] := -(hl-hal)*(xpl-xal)-(hl-hal)*(hpl-hal);
ja^1[5,9] := -(vr-vcar)*(xpr-xar)-(xr-xar)*(vpr-vear);
ja^1[6,9] := -(hr-har)*(xpr-xar)-(xr-xar)*(hpr-har);
END;

PROCEDURE LOCAL_X(A:real;VAR B,C,D,E,F,G,L:real;VAR AAA:INTEGER);
BEGIN
  aaa := 1;
  while xaa^1[aaa,2] <= a do aaa := aaa+1; aaa := aaa-1;
  b := v[aaa,1];
  c := v[aaa+1,1];
  d := h[aaa,1];
  e := h[aaa+1,1];
  f := xaa^1[aaa,2];
  g := xaa^1[aaa+1,2];
  l := t-dt;
  {if xaa^1[aaa,2]<xaa^1[1,2] then begin

```

```

end;
if xaa^1[aaa,2]>xaa^1[nnos,2] then begin
end;
end;
END;

PROCEDURE INICIA_CAR;
BEGIN
  if omegal = 0 then
  begin
    xsl := xaa^1[jk,2];
    xl := xaa^1[jk,1]-(v[jk,1]-SQRT(g*hl[jk,1]))*dt;
    xr := xaa^1[jk,1]-(v[jk,1]-SQRT(g*hl[jk,1]))*dt;
    LOCAL_X(xl, val, vpl, hal, hpl, xal, xpl, tl, ml);
    LOCAL_X(xr, vcar, vpr, har, hpr, xar, xpr, tr, mr);
    vl := val + (xl-xal)*(vpl-val)/(xpl-xal);
    hl := hal + (xl-xal)*(hpl-hal)/(xpl-xal);
    vr := vcar + ((xr-xar)*(vpr-vear)/(xpr-xar));
    hr := har + ((xr-xar)*(hpr-har)/(xpr-xar));
    hsl2 := h[jk,1];
    vsl2 := v[jk,1];
    xxx^1[1] := (xl);
    xxx^1[2] := (vl);
    xxx^1[3] := (hl);
    xxx^1[4] := (xr);
    xxx^1[5] := (vr);
    xxx^1[6] := (hr);
    xxx^1[7] := (vsl2);
    xxx^1[8] := (hsl2);
  end
  else
  begin
    xl := (xxx^1[1]);
    xr := (xxx^1[4]);
    if vl < vr then begin vsl2 := (xxx^1[7]);
    hsl2 := (xxx^1[8]);end else
    begin vsl2 := vl;
    hsl2 := hl; end;
    LOCAL_X(xl, val, vpl, hal, hpl, xal, xpl, tl, ml);
    LOCAL_X(xr, vcar, vpr, har, hpr, xar, xpr, tr, mr);
    vl := val + (xl-xal)*(vpl-val)/(xpl-xal);
    hl := hal + (xl-xal)*(hpl-hal)/(xpl-xal);
    vr := vcar + ((xr-xar)*(vpr-vear)/(xpr-xar));
    hr := har + ((xr-xar)*(hpr-har)/(xpr-xar));
    xxx^1[2] := vl;
    xxx^1[3] := hl;
    xxx^1[5] := vr;
    xxx^1[6] := hr;
  end;
end;

```

```
END;

PROCEDURE AJUSTA4;
BEGIN
  v[ik2] := vs12;
  h[ik2] := hs12;
END;

PROCEDURE SOLUCAO; {solucao via caracteristicas}
BEGIN
  append(arq);
  for ik := 2 to nmos-1 do
    begin
      omegal := 0;
      repeat
        INICIA_CAR;
        COEF_CAR;
        GAUSS(8);
        AJUSTA4;
        omegal := omegal+1;
      until (omegal>toi2) or(lambda<tot);
    end;
    close(arq);
  end;
end;
```

```
{UNIT TESTES - PROCESSA TESTES GERAIS COM O PROGRAMA }
{$O+.F+}
UNIT TESTES;

INTERFACE
PROCEDURE TESTE;
IMPLEMENTATION

USES CRT,DOS,BASICA,RESOLVE,ONDA,PROC;

PROCEDURE TESTE;
BEGIN
  window(2,4,60,23);
  clrscr;
  gotoxy(5,9);
  writeln('Nao esta sendo realizado nenhum teste neste momento. ');
  for i := 1 to 3 do writeln;
  writeln(' Pressione qualquer tecla para continuar... ');readkey;
END;
END.
```

\*\*\*\*\* apli\_aa.dad \*\*\*\*\*

1 Aplicacao 1 - Caso teorico - citado por ON...[1990] e por PASINATO...[1992]

2  $Q=0$  e  $n=0$

3 1 2000.00000 1.00000 20.00000 0.0000000000 300.00000 1

4 0.00000 -14000.0000000000 4000.0000000000 10.0000000000 0.0000000000 100000 2.0000000000 1.00000

5 4

-14000.0000000000 10.0000000000

0.0000000000 10.0000000000

0.0100000000 2.0000000000

4000.0000000000 2.0000000000

6 2

-14000.0000000000 2.0000000000 0.0000000000 100000

4000.0000000000 2.0000000000 0.0000000000 100000

9

\*\*\*\*\* apli\_ba.dad \*\*\*\*\*

1 Aplicacao 1 - exemplo do ON e LICH[1990]

2  $Q=0$ ,  $n=0,012$

3 1 2000.00000 1.00000 5.00000 0.0000000000 300.00000 2

4 0.01200 -14000.0000000000 4000.0000000000 10.0000000000 0.0000000000 100000 2.0000000000 1.00000

5 4

-14000.0000000000 10.0000000000

0.0000000000 10.0000000000

0.0100000000 2.0000000000

4000.0000000000 2.0000000000

6 2

-14000.0000000000 2.0000000000 0.0000000000 100000

4000.0000000000 2.0000000000 0.0000000000 100000

9

\*\*\*\*\* apli\_ca.dad \*\*\*\*\*

1 Aplicacao 1 - caso 3 - exemplo do ON e LICH[1990]

2  $v=1$ ,  $n=0,012$

3 1 2000.00000 1.00000 20.00000 0.0000000000 301.00000 2

4 0.01200 -14000.0000000000 4000.0000000000 10.0000000000 1.0000000000 1000000000 2.0000000000 1.00000

5 4

-14000.0000000000 10.0000000000

0.0000000000 10.0000000000

0.0100000000 2.0000000000

4000.0000000000 2.0000000000

6 2

-14000.0000000000 2.0000000000 5.0000000000 1000000000

4000.0000000000 2.0000000000 5.0000000000 1000000000

9

\*\*\*\*\* apli\_cb.dad \*\*\*\*\*

1 exemplo do On com declividade e resistencia nulas e com  $v=1,0$  m/s

2

3 1 2000.00000 1.00000 5.00000 0.00000 301.00000 2

4 0.00000 -14000.0000000000 4000.0000000000 10.0000000000 1.0000000000 2.0000000000 1.00000

5 4

-14000.0000000000 10.0000000000

0.0000000000 10.0000000000

0.0100000000 2.0000000000

4000.0000000000 2.0000000000

6 2

-14000.0000000000 2.0000000000 5.0000000000

4000.0000000000 2.0000000000 5.0000000000

9

\*\*\*\*\* apli\_cc.dad \*\*\*\*\*

1 Aplicacao 1 - caso 3 - exemplo do ON e LICH[1990]

2  $v=1$ ,  $n=0,0$

3 1 2000.00000 1.00000 20.00000 0.00000 301.00000 2

4 0.00000 -14000.0000000000 4000.0000000000 10.0000000000 0.0000000000 2.0000000000 1.00000

5 4

-14000.0000000000 10.0000000000

0.0000000000 10.0000000000

0.0100000000 2.0000000000

4000.0000000000 2.0000000000

6 2

-14000.0000000000 2.0000000000 0.0000000000

4000.0000000000 2.0000000000 0.0000000000

9

\*\*\*\*\* apli\_cd.dad \*\*\*\*\*

1 Aplicacao 1 - caso 3 - exemplo do ON e LICH[1990]

2  $v=1$ ,  $n=0,012$

3 1 2000.00000 1.00000 20.00000 0.00000 301.00000 2

4 0.01200 -14000.0000000000 4000.0000000000 10.0000000000 0.0000000000 2.0000000000 1.00000

5 4

-14000.0000000000 10.0000000000

0.0000000000 10.0000000000

0.0100000000 2.0000000000

4000.0000000000 2.0000000000

6 2

-14000.0000000000 2.0000000000 0.0000000000

4000.0000000000 2.0000000000 0.0000000000

9

\*\*\*\*\* apli\_da.dad \*\*\*\*\*

1 Aplicacao 1 - exemplo do ON... e PASINATO...

2 com declividade nula, com resistencia - b = 2 m e velocidade de 0,5 m/s

3 1 2000.00000 1.00000 2.00000 0.0000000000 300.00000 2

4 0.01200 -14000.0000000000 4000.0000000000 10.0000000000 0.5000000000 2.0000000000 1.00000

5 4

-14000.0000000000 10.0000000000

```

0.0000000000 10.0000000000
0.0100000000 2.0000000000
4000.0000000000 2.0000000000
6 2
-14000.0000000000 2.0000000000 2.500000000000000000
4000.0000000000 2.0000000000 2.500000000000000000
9

```

```

***** apli_db.dad *****

```

```

1 Aplicacao 1 - exemplo de ON... e PASINATO...
2 com declividade nula, com resistencia, b=5 m e com v=0,5 m/s
3 1 2000.00000 1.00000 5.00000 0.00000 300.00000 2
4 0.01200 -14000.0000000000 4000.0000000000 10.0000000000 0.5000000000 2.0000000000 1.00000
5 4
-14000.0000000000 10.0000000000
0.0000000000 10.0000000000
0.0100000000 2.0000000000
4000.0000000000 2.0000000000
6 2
-14000.0000000000 2.0000000000 2.5000000000000000
4000.0000000000 2.0000000000 2.5000000000000000
9

```

```

***** apli_dc.dad *****

```

```

1 Aplicacao 1 - exemplo de ON... e PASINATO...
2 declividade nula, com resistencia, b=20 m e v=0,5 m/s
3 1 2000.00000 1.00000 20.00000 0.0000000000 300.00000 2
4 0.01200 -14000.0000000000 4000.0000000000 10.0000000000 0.5000000000 2.0000000000 1.00000
5 4
-14000.0000000000 10.0000000000
0.0000000000 10.0000000000
0.0100000000 2.0000000000
4000.0000000000 2.0000000000
6 2
-14000.0000000000 2.0000000000 2.500000000000000000
4000.0000000000 2.0000000000 2.500000000000000000
9

```

```

***** apli_dd.dad *****

```

```

1 Aplicacao 1 - exemplo de ON... e PASINATO...
2 com declividade nula, com resistencia, b= 50m e v=0,5 m/s
3 1 2000.00000 1.00000 50.00000 0.0000000000 300.00000 2
4 0.01200 -14000.0000000000 4000.0000000000 10.0000000000 0.5000000000 2.0000000000 1.00000
5 4
-14000.0000000000 10.0000000000
0.0000000000 10.0000000000
0.0100000000 2.0000000000
4000.0000000000 2.0000000000
6 2

```

```

-14000.0000000000 2.0000000000 2.500000000000000000
4000.0000000000 2.0000000000 2.500000000000000000
9

```

```

***** apli_de.dad *****

```

```

1 Aplicacao 1 - exemplo de ON... e PASINATO...
2 com declividade nula, com resistencia, b= 200 m e v=0,5 m/s
3 1 2000.00000 1.00000 200.00000 0.0000000000 300.00000 2
4 0.01200 -14000.0000000000 4000.0000000000 10.0000000000 0.5000000000 2.0000000000 1.00000
5 4
-14000.0000000000 10.0000000000
0.0000000000 10.0000000000
0.0100000000 2.0000000000
4000.0000000000 2.0000000000
6 2
-14000.0000000000 2.0000000000 2.500000000000000000
4000.0000000000 2.0000000000 2.500000000000000000
9

```

```

***** apli_df.dad *****

```

```

1 Aplicacao 1 - exemplo de ON... e PASINATO...
2 com declividade nula, com resistencia, b= 2000 m e v=0,5 m/s
3 1 2000.00000 1.00000 2000.00000 0.0000000000 300.00000 2
4 0.01200 -14000.0000000000 4000.0000000000 10.0000000000 0.5000000000 2.0000000000 1.00000
5 4
-14000.0000000000 10.0000000000
0.0000000000 10.0000000000
0.0100000000 2.0000000000
4000.0000000000 2.0000000000
6 2
-14000.0000000000 2.0000000000 2.500000000000000000
4000.0000000000 2.0000000000 2.500000000000000000
9

```

```

***** apli_ea.dad *****

```

```

1 exemplo do On com declividade e vazao nulas, com resistencia - b = 2 m
2
3 1 2000.00000 1.00000 2.00000 0.0000000000 300.00000 2
4 0.01200 -14000.0000000000 4000.0000000000 10.0000000000 0.5000000000 2.0000000000 1.00000
5 4
-14000.0000000000 10.0000000000
0.0000000000 10.0000000000
0.0100000000 2.0000000000
4000.0000000000 2.0000000000
6 2
-14000.0000000000 2.0000000000 2.500000000000000000
4000.0000000000 2.0000000000 2.500000000000000000
9

```

\*\*\*\*\* apl1\_eb.dad \*\*\*\*\*

1 exemplo do On com declividade e vazao nulas, e com resistencia b=5 m

```

2 3 1 2000.00000 1.00000 5.00000 0.00000 300.000 2
4 0.01200 -14000.0000000000 4000.0000000000 10.0000000000 0.2000000 2.0000000000 1.0000
5 4
-14000.0000000000 10.0000000000
0.0000000000 10.0000000000
0.0100000000 2.0000000000
4000.0000000000 2.0000000000
6 2
-14000.0000000000 10.0000000000
-14000.0000000000 2.0000000000 1.0000000000
4000.0000000000 2.0000000000 1.0000000000
9

```

\*\*\*\*\* apl1\_ec.dad \*\*\*\*\*

1 Aplicacao 1 - Caso teorico - analise da variacao de largura com vazao de 100 m3/s

```

2 declividade nula e com resistencia (n=0,012) - b= 20m
3 1 2000.00000 1.00000 20.00000 0.00000 300.0 1
4 0.01200 -14000.0000000000 4000.0000000000 10.0000000000 0.0500000 2.0000000000 1.000
5 4
-14000.0000000000 10.0000000000
0.0000000000 10.0000000000
0.0100000000 2.0000000000
4000.0000000000 2.0000000000
6 2
-14000.0000000000 10.0000000000
-14000.0000000000 2.0000000000 0.2500000000
4000.0000000000 2.0000000000 0.2500000000
9

```

\*\*\*\*\* apl1\_ed.dad \*\*\*\*\*

1 Aplicacao 1 - Caso teorico - analise da variacao de largura com vazao de 100 m3/s

```

2 declividade nula e com resistencia (n=0,012) - b= 50m
3 1 2000.00000 1.00000 50.00000 0.00000 300.0 1
4 0.01200 -14000.0000000000 4000.0000000000 10.0000000000 0.0200000 2.0000000000 1.000
5 4
-14000.0000000000 10.0000000000
0.0000000000 10.0000000000
0.0100000000 2.0000000000
4000.0000000000 2.0000000000
6 2
-14000.0000000000 10.0000000000
-14000.0000000000 2.0000000000 0.1000000000
4000.0000000000 2.0000000000 0.1000000000
9

```

\*\*\*\*\* apl1\_ec.dad \*\*\*\*\*

1 Aplicacao 1 - Caso teorico - analise da variacao de largura com vazao de 100 m3/s

2 declividade nula e com resistencia (n=0,012) - b= 200m

```

3 1 2000.00000 1.00000 200.00000 0.00000 300.0 1
4 0.01200 -14000.0000000000 4000.0000000000 10.0000000000 0.0050000 2.0000000000 1.000
5 4
-14000.0000000000 10.0000000000
0.0000000000 10.0000000000
0.0100000000 2.0000000000
4000.0000000000 2.0000000000
6 2
-14000.0000000000 10.0000000000
-14000.0000000000 2.0000000000 0.0250000000
4000.0000000000 2.0000000000 0.0250000000
9

```

\*\*\*\*\* apl1\_ef.dad \*\*\*\*\*

1 Aplicacao 1 - Caso teorico - analise da variacao de largura com vazao de 100 m3/s

```

2 declividade nula e com resistencia (n=0,012) - b= 200m
3 1 2000.00000 1.00000 200.00000 0.00000 300.0 1
4 0.01200 -14000.0000000000 4000.0000000000 10.0000000000 0.0050000 2.0000000000 1.000
5 4
-14000.0000000000 10.0000000000
0.0000000000 10.0000000000
0.0100000000 2.0000000000
4000.0000000000 2.0000000000
6 2
-14000.0000000000 10.0000000000
-14000.0000000000 2.0000000000 0.0025000000
4000.0000000000 2.0000000000 0.0025000000
9

```

\*\*\*\*\* apl2\_aa.dad \*\*\*\*\*

1 Aplicacao 2 - caso unico - teste 1.1 (20) do WES - citado por MASCARENHAS[1990]

```

2 canal rugoso (n=0,009) e paredes paralelas
3 1 7.62000 1.00000 12.1520 0.0050000000 500.00000 2
4 0.00900 -38.1000000000 161.9600000000 0.3048000000 0.2284059100 0.0609600000 1.00000
5 18
-38.1000000000 0.1149000000
-31.6158000000 0.1408000000
-25.2019000000 0.1756000000
-17.0374000000 0.2134000000
-11.5348000000 0.2463000000
-6.9630000000 0.2695000000
-4.1548000000 0.2838000000
-2.5845000000 0.2917000000
-1.7521000000 0.2959000000
-1.3232000000 0.2981000000
-1.1055000000 0.2992000000
-0.8867000000 0.3003000000
-0.6667000000 0.3014000000
-0.4456000000 0.3025000000
-0.2234000000 0.3037000000
0.0000000000 0.3048000000
0.0010000000 0.0609600000

```

161.9600000000 0.0609600000  
6 2  
-38.1000000000 0.0609600000 1.1420295500  
161.9600000000 0.0609600000 1.1420295500  
9

\*\*\*\*\* apl3aa.dad \*\*\*\*\*

1 Barragem FICTICIA

2 H= 40 m; dt = 15 s; dx=2000 m; Q=30.86 m<sup>3</sup>/s  
3 1 2000.000000 15.000000 100.000000 0.0025000000 10000.000000 2  
4 0.03500 -30000.0000000000 30000.0000000000 40.0000000000 0.00771500000000000 0.4000000000 1.000000  
5 20

-30000.0000000000 0.4000000000  
-16018.9108000000 0.4000000000  
-15794.1282000000 0.6407000000  
-15315.4200000000 1.7175000000  
-14889.0098000000 2.7794000000  
-14121.3424000000 4.6971000000  
-12755.2425000000 8.1120000000  
-10720.3671000000 13.1991000000  
-9239.9018000000 16.9003000000  
-7892.4072000000 20.2690000000  
-6527.3578000000 23.6816000000  
-5583.1225000000 26.0422000000  
-4543.1489000000 28.6421000000  
-3397.7297000000 31.5057000000  
-2136.1734010000 34.6596000000  
-1458.2093000000 36.3545000000  
-746.7047000000 38.1332000000  
0.0000000000 40.0000000000  
0.0100000000 0.4000000000  
30000.0000000000 0.4000000000  
6 2  
-30000.0000000000 0.4000000000 0.77150000000000000  
30000.0000000000 0.4000000000 0.77150000000000000  
9

\*\*\*\*\* apl3ab.dad \*\*\*\*\*

1 Barragem FICTICIA

2 H= 40 m; dt = 10 s; dx=2000 m; Q=30.86 m<sup>3</sup>/s  
3 1 2000.000000 10.000000 100.000000 0.0025000000 10000.000000 2  
4 0.04500 -30000.0000000000 30000.0000000000 40.0000000000 0.00771500000000000 0.4000000000 1.000000  
5 20

-30000.0000000000 0.4654000000  
-16026.3361000000 0.4654000000  
-15783.1511000000 0.7056000000  
-15291.7691000000 1.7807000000  
-14865.0287000000 2.8408000000  
-14098.2073000000 5.8223000000  
-13671.3204000000 7.1545000000

-13138.3461000000 9.3273000000  
-12269.1421000000 13.2434000000  
-10251.0932000000 14.3723000000  
-9224.6651000000 16.9384000000  
-8355.8535000000 19.1104000000  
-6954.8700000000 22.6128000000  
-6056.6297000000 24.8584000000  
-4535.6544000000 28.6609000000  
-2132.6493000000 34.6684000000  
-745.4727000000 38.1363000000  
0.0000000000 40.0000000000  
0.0100000000 0.399934284861  
30000.0000000000 0.399934284861  
6 2  
-30000.0000000000 0.4000000000 0.77150000000000000  
30000.0000000000 0.4000000000 0.77150000000000000  
9

\*\*\*\*\* apl3ba.dad \*\*\*\*\*

1 Barragem FICTICIA

2 H= 40 m; dt = 10 s; dx=2000 m; Q=30.86 m<sup>3</sup>/s  
3 1 2000.000000 10.000000 100.000000 0.0025000000 10000.000000 2  
4 0.03500 -30000.0000000000 30000.0000000000 40.0000000000 0.00771500000000000 0.4000000000 1.000000  
5 20

-30000.0000000000 0.4000000000  
-16018.9108000000 0.4000000000  
-15794.1282000000 0.6407000000  
-15315.4200000000 1.7175000000  
-14889.0098000000 2.7794000000  
-14121.3424000000 4.6971000000  
-12755.2425000000 8.1120000000  
-10720.3671000000 13.1991000000  
-9239.9018000000 16.9003000000  
-7892.4072000000 20.2690000000  
-6527.3578000000 23.6816000000  
-4416.8775000000 26.0422000000  
-4543.1489000000 28.6421000000  
-3397.7297000000 31.5057000000  
-2136.1734010000 34.6596000000  
-1458.2093000000 36.3545000000  
-746.7047000000 38.1332000000  
0.0000000000 40.0000000000  
0.0100000000 0.4000000000  
30000.0000000000 0.4000000000  
6 2  
-30000.0000000000 0.4000000000 0.77150000000000000  
30000.0000000000 0.4000000000 0.77150000000000000  
9

\*\*\*\*\* apl3bb.dad \*\*\*\*\*

```

1 Barragem FICTICIA
2 H= 40 m; dt = 10 s; dx=2000 m; Q=30,86 m3/s
3 1 2000.00000 10.00000 100.00000 0.0012500000 10000.00000 1
4 0.03500 -40000.0000000000 60000.0000000000 40.0000000000 0.0077150000000000 1.00000
5 20
-40000.0000000000 0.4928000000
-32058.0894000000 0.4928000000
-31557.1880000000 0.7329000000
-30563.8652000000 1.8073000000
-29709.9847000000 2.8667000000
-28176.9882000000 4.7799000000
-27323.7470000000 5.8460000000
-26238.4993000000 7.1773000000
-25450.8501000000 8.1868000000
-24521.2687000000 9.3487000000
-21390.5307000000 13.2620000000
-17595.1821000000 18.0061000000
-14734.7336000000 21.5816000000
-12104.8435000000 24.8690000000
-7949.8548000000 30.0627000000
-4262.3346000000 34.6721000000
-1489.9094000000 38.1376000000
0.0000000000 40.0000000000
0.0100000000 0.4000000000
60000.0000000000 0.4000000000
6 2
-40000.0000000000 0.4000000000 0.77150000000000000 10000.000000 1.00000
60000.0000000000 0.4000000000 0.77150000000000000
9
***** apl3ca.dad *****

1 Barragem FICTICIA
2 H= 40 m; dt = 2 s; dx=2000 m; Q=30,86 m3/s
3 1 2000.00000 2.00000 100.00000 0.0025000000 10000.00000 2
4 0.03500 -30000.0000000000 30000.0000000000 40.0000000000 0.0077150000000000 1.00000
5 20
-30000.0000000000 0.4000000000
-16018.9108000000 0.4000000000
-15794.1282000000 0.6407000000
-15315.4200000000 1.7175000000
-14889.0098000000 2.7794000000
-14121.3424000000 4.6971000000
-12755.2425000000 8.1120000000
-10720.3671000000 13.1991000000
-9239.9018000000 16.9003000000
-7892.4072000000 20.2690000000
-6527.3578000000 23.6816000000
-4416.8775000000 26.0422000000
-4543.1489000000 28.6421000000
-3397.7297000000 31.5057000000
-1458.2093000000 36.3545000000
-746.7047000000 38.1332000000
0.0000000000 40.0000000000
0.0100000000 0.4000000000
30000.0000000000 0.4000000000
6 2
-30000.0000000000 0.4000000000 0.77150000000000000 10000.000000 1.00000
-16018.9108000000 0.4000000000 0.77150000000000000
30000.0000000000 0.4000000000 0.77150000000000000
9
***** apl3ca.dad *****

1 Barragem FICTICIA
2 H= 40 m; dt = 10 s; dx=2000 m; Q=30,86 m3/s
3 1 2000.00000 10.00000 100.00000 0.0025000000 10000.00000 2
4 0.03500 -30000.0000000000 30000.0000000000 40.0000000000 0.0077150000000000 1.00000
5 20
-30000.0000000000 0.4000000000
-16018.9108000000 0.4000000000
-15794.1282000000 0.6407000000
-15315.4200000000 1.7175000000
-14889.0098000000 2.7794000000
-14121.3424000000 4.6971000000
-12755.2425000000 8.1120000000
-10720.3671000000 13.1991000000
-9239.9018000000 16.9003000000
-7892.4072000000 20.2690000000
-6527.3578000000 23.6816000000
-4416.8775000000 26.0422000000
-4543.1489000000 28.6421000000
-3397.7297000000 31.5057000000

```

```

-2136.1734010000 34.6596000000
-1458.2093000000 36.3545000000
-746.7047000000 38.1332000000
0.0000000000 40.0000000000
0.0100000000 0.4000000000
30000.0000000000 0.4000000000
6 2
-30000.0000000000 0.4000000000 0.77150000000000000 10000.000000 1.00000
30000.0000000000 0.4000000000 0.77150000000000000
9
***** apl3cb.dad *****

1 Barragem FICTICIA
2 H= 40 m; dt = 5 s; dx=2000 m; Q=30,86 m3/s
3 1 2000.00000 5.00000 100.00000 0.0025000000 10000.00000 2
4 0.03500 -30000.0000000000 30000.0000000000 40.0000000000 0.0077150000000000 1.00000
5 20
-30000.0000000000 0.4000000000
-16018.9108000000 0.4000000000
-15794.1282000000 0.6407000000
-15315.4200000000 1.7175000000
-14889.0098000000 2.7794000000
-14121.3424000000 4.6971000000
-12755.2425000000 8.1120000000
-10720.3671000000 13.1991000000
-9239.9018000000 16.9003000000
-7892.4072000000 20.2690000000
-6527.3578000000 23.6816000000
-4416.8775000000 26.0422000000
-4543.1489000000 28.6421000000
-3397.7297000000 31.5057000000
-1458.2093000000 36.3545000000
-746.7047000000 38.1332000000
0.0000000000 40.0000000000
0.0100000000 0.4000000000
30000.0000000000 0.4000000000
6 2
-30000.0000000000 0.4000000000 0.77150000000000000 10000.000000 1.00000
30000.0000000000 0.4000000000 0.77150000000000000
9
***** apl3cc.dad *****

1 Barragem FICTICIA
2 H= 40 m; dt = 10 s; dx=2000 m; Q=30,86 m3/s
3 1 2000.00000 10.00000 100.00000 0.0025000000 10000.00000 2
4 0.03500 -30000.0000000000 30000.0000000000 40.0000000000 0.0077150000000000 1.00000
5 20
-30000.0000000000 0.4000000000
-16018.9108000000 0.4000000000
-15794.1282000000 0.6407000000
-15315.4200000000 1.7175000000
-14889.0098000000 2.7794000000
-14121.3424000000 4.6971000000
-12755.2425000000 8.1120000000
-10720.3671000000 13.1991000000
-9239.9018000000 16.9003000000
-7892.4072000000 20.2690000000
-6527.3578000000 23.6816000000
-4416.8775000000 26.0422000000
-4543.1489000000 28.6421000000
-3397.7297000000 31.5057000000

```

30000.000000000000 0.4000000000 0.77150000000000000000  
9

-15794.1282000000 0.6407000000  
-15315.4200000000 1.7175000000  
-14889.0098000000 2.7794000000  
-14121.3424000000 4.6971000000  
-12755.2425000000 8.1120000000  
-10720.3671000000 13.1991000000  
-9239.9018000000 16.9003000000  
-7892.4072000000 20.2690000000  
-6527.3578000000 23.6816000000  
-4416.8775000000 26.0422000000  
-4543.1489000000 28.6421000000  
-3397.7297000000 31.5057000000  
-2136.1734010000 34.6596000000  
-1458.2093000000 36.3545000000  
-746.7047000000 38.1332000000  
0.0000000000 40.0000000000  
0.0100000000 0.4000000000  
30000.0000000000 0.4000000000  
6 2  
-30000.0000000000 0.4000000000 0.77150000000000000000  
30000.0000000000 0.4000000000 0.77150000000000000000  
9

\*\*\*\*\* apl3cd dad \*\*\*\*\*

1 Barragem FICTICIA  
2 H= 40 m; dt = 20 s; dx=2000 m; Q=30.86 m3/s  
3 1 2000.00000 20.00000 100.00000 0.0025000000 10000.00000 2  
4 0.03500 -30000.00000000000 30000.0000000000 0.0077150000000000 0.4000000000 1.00000  
5 20  
-30000.0000000000 0.4000000000  
-16018.9108000000 0.4000000000  
-15794.1282000000 0.6407000000  
-15315.4200000000 1.7175000000  
-14889.0098000000 2.7794000000  
-14121.3424000000 4.6971000000  
-12755.2425000000 8.1120000000  
-10720.3671000000 13.1991000000  
-9239.9018000000 16.9003000000  
-7892.4072000000 20.2690000000  
-6527.3578000000 23.6816000000  
-4416.8775000000 26.0422000000  
-4543.1489000000 28.6421000000  
-3397.7297000000 31.5057000000  
-2136.1734010000 34.6596000000  
-1458.2093000000 36.3545000000  
-746.7047000000 38.1332000000  
0.0000000000 40.0000000000  
0.0100000000 0.4000000000  
30000.0000000000 0.4000000000  
6 2  
-30000.0000000000 0.4000000000 0.77150000000000000000

ESTE E' UM EXEMPLO DE ARQUIVO DE SAIDA DO PROGRAMA ROTRET.

+++++

# ARQUIVO DE TRANSICAO- PROCESSAMENTO/POS-PROCESSAMENTO

0. Dados de entrada:

1 Aplicacao 1 - Caso teorico - citado por ON...[1990] e por PASINATO...[1992]

2  $Q = 0$  e  $n = 0$

3 1 2000.00000 1.00000 20.00000 0.0000000000 300.00000 1

4 0.00000 -14000.00000000000 0.0000000000 10.0000000000 0.0000000000 100000 2.0000000000 1.00000

5 4

-14000.0000000000 10.0000000000

0.0000000000 10.0000000000

0.0100000000 2.0000000000

4000.0000000000 2.0000000000

6 2

-14000.0000000000 2.0000000000 0.0000000000 100000

4000.0000000000 2.0000000000 0.0000000000 100000

9

Perfil inicial (x,h,v,Zf,Zs) :

1, -14000.0000000000,10.0000000000,0.0000000000,0.0000000000,10.0000000000,10.0000000000  
 2, -12000.0000000000,10.0000000000,0.0000000000,0.0000000000,10.0000000000,10.0000000000  
 3, -10000.0000000000,10.0000000000,0.0000000000,0.0000000000,10.0000000000,10.0000000000  
 4, -8000.0000000000,10.0000000000,0.0000000000,0.0000000000,10.0000000000,10.0000000000  
 5, -6000.0000000000,10.0000000000,0.0000000000,0.0000000000,10.0000000000,10.0000000000  
 6, -4000.0000000000,10.0000000000,0.0000000000,0.0000000000,10.0000000000,10.0000000000  
 7, -2000.0000000000,10.0000000000,0.0000000000,0.0000000000,10.0000000000,10.0000000000  
 8, 0.0000000000,10.0000000000,0.0000000000,0.0000000000,10.0000000000,10.0000000000  
 9, 2000.0000000000,2.0000000000,0.0000000000,0.0000000000,0.0000000000,2.0000000000  
 10, 4000.0000000000,2.0000000000,0.0000000000,0.0000000000,0.0000000000,2.0000000000

\*\*\*\*\*

\*\*\* RESULTADOS PARA O TEMPO = 1.00000 segundos

1. Resultados no trecho afetado pelo choque (x,h,v,Zf,Zs) :

-9.9045444115, 10.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000, 10.0000000000, 10.0000000000  
 -9.5172098655, 9.7409875951, 0.2582230307, 0.0000000000, 9.7409875951  
 -9.1246905626, 9.4819751902, 0.5199025659, 0.0000000000, 9.4819751902  
 -8.7267725501, 9.229627852, 0.7851812409, 0.0000000000, 9.229627852  
 -8.3232267424, 8.9639503803, 1.0542117794, 0.0000000000, 8.9639503803  
 -7.9138073793, 8.7049379754, 1.3271580215, 0.0000000000, 8.7049379754  
 -7.4982502750, 8.4459255705, 1.6041960910, 0.0000000000, 8.4459255705  
 -7.0762708246, 8.1869131655, 1.8855157246, 0.0000000000, 8.1869131655  
 -6.6475617237, 7.9279007606, 2.173217919, 0.0000000000, 7.9279007606

-6.2117903497, 7.6688883557, 2.4618360412, 0.0000000000, 7.6688883557  
 -5.7685957417, 7.4098759508, 2.7572991132, 0.0000000000, 7.4098759508  
 -5.3175851006, 7.1508635459, 3.0579728740, 0.0000000000, 7.1508635459  
 -4.8583297130, 6.8918511409, 3.3641431324, 0.0000000000, 6.8918511409  
 -4.3903601790, 6.6328387360, 3.6761228217, 0.0000000000, 6.6328387360  
 -3.9131607914, 6.3738263311, 3.9942557467, 0.0000000000, 6.3738263311  
 -3.4261628765, 6.1148139262, 4.3189210234, 0.0000000000, 6.1148139262  
 -2.9287368494, 5.8558015212, 4.6505383748, 0.0000000000, 5.8558015212  
 -2.4201826693, 5.5967891163, 4.9895744948, 0.0000000000, 5.5967891163  
 -1.8997182803, 5.3377767114, 5.3365507542, 0.0000000000, 5.3377767114  
 -1.3664654936, 5.0787643065, 5.6920526119, 0.0000000000, 5.0787643065

2. Resultados do choque e do ponto critico (x,h,v,Zf,Zs) :

choque montante : 9.3898131249, 5.0787643065, 5.6919893695, 0.0000000000, 5.0787643065  
 choque jusante : 9.3898131249, 2.0000000000, 0.0000000001, 0.0000000000, 5.0787643065  
 critico : 0.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000

3. Resultados ao longo do canal (x,h,v,Zf,Zs) :

1, -14000.0000000000,10.0000000000,0.0000000000,0.0000000000,10.0000000000,10.0000000000  
 2, -12000.0000000000,10.0000000000,0.0000000000,0.0000000000,10.0000000000,10.0000000000  
 3, -10000.0000000000,10.0000000000,0.0000000000,0.0000000000,10.0000000000,10.0000000000  
 4, -8000.0000000000,10.0000000000,0.0000000000,0.0000000000,10.0000000000,10.0000000000  
 5, -6000.0000000000,10.0000000000,0.0000000000,0.0000000000,10.0000000000,10.0000000000  
 6, -4000.0000000000,10.0000000000,0.0000000000,0.0000000000,10.0000000000,10.0000000000  
 7, -2000.0000000000,10.0000000000,0.0000000000,0.0000000000,10.0000000000,10.0000000000  
 8, 0.0000000000,10.0000000000,5.0787643065,5.6919893695,5.0787643065  
 9, 2000.0000000000,2.0000000000,0.0000000000,0.0000000000,0.0000000000,2.0000000000  
 10, 4000.0000000000,2.0000000000,0.0000000000,0.0000000000,0.0000000000,2.0000000000

\*\*\* RESULTADOS PARA O TEMPO = 2.00000 segundos

1. Resultados no trecho afetado pelo choque (x,h,v,Zf,Zs) :

-9.9045444115, 10.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000, 10.0000000000, 10.0000000000  
 -9.5172098655, 9.7409875951, 0.2582230307, 0.0000000000, 9.7409875951  
 -9.1246905626, 9.4819751902, 0.5199025659, 0.0000000000, 9.4819751902  
 -8.7267725501, 9.229627852, 0.7851812409, 0.0000000000, 9.229627852  
 -8.3232267424, 8.9639503803, 1.0542117794, 0.0000000000, 8.9639503803  
 -7.9138073793, 8.7049379754, 1.3271580215, 0.0000000000, 8.7049379754  
 -7.4982502750, 8.4459255705, 1.6041960910, 0.0000000000, 8.4459255705  
 -7.0762708246, 8.1869131655, 1.8855157246, 0.0000000000, 8.1869131655  
 -6.6475617237, 7.9279007606, 2.173217919, 0.0000000000, 7.9279007606  
 -6.2117903497, 7.6688883557, 2.4618360412, 0.0000000000, 7.6688883557  
 -5.7685957417, 7.4098759508, 2.7572991132, 0.0000000000, 7.4098759508  
 -5.3175851006, 7.1508635459, 3.0579728740, 0.0000000000, 7.1508635459  
 -4.8583297130, 6.8918511409, 3.3641431324, 0.0000000000, 6.8918511409  
 -4.3903601790, 6.6328387360, 3.6761228217, 0.0000000000, 6.6328387360  
 -3.9131607914, 6.3738263311, 3.9942557467, 0.0000000000, 6.3738263311  
 -3.4261628765, 6.1148139262, 4.3189210234, 0.0000000000, 6.1148139262

choque montante : 28.1694423599, 5.0786938135, 5.6920873414, 0.0000000000, 5.0786938135  
choque jusante : 28.1694423599, 2.0000000000, 0.0000000001, 0.0000000000, 5.0786938135  
critico : 0.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000

### 3. Resultados ao longo do canal (x,h,y,Zf,Zs) :

1, -14000.0000000000, 10.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000, 10.0000000000, 10.0000000000  
2, -12000.0000000000, 10.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000, 10.0000000000, 10.0000000000  
3, -10000.0000000000, 10.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000, 10.0000000000, 10.0000000000  
4, -8000.0000000000, 10.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000, 10.0000000000, 10.0000000000  
5, -6000.0000000000, 10.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000, 10.0000000000, 10.0000000000  
6, -4000.0000000000, 10.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000, 10.0000000000, 10.0000000000  
7, -2000.0000000000, 10.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000, 10.0000000000, 10.0000000000  
8, 0.0000000000, 5.0787643065, 5.691989369472, 0.0000000000, 5.0787643065  
9, 2000.0000000000, 2.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000, 2.0000000000, 2.0000000000  
10, 4000.0000000000, 2.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000, 2.0000000000, 2.0000000000

### \*\*\* RESULTADOS PARA O TEMPO = 4.0000 segundos

#### 1. Resultados no trecho afetado pelo choque (x,h,y,Zf,Zs) :

-29.7136332346, 10.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000, 10.0000000000, 10.0000000000  
-26.8194794549, 9.3612228597, 0.6431193709, 0.0000000000, 9.3612228597  
-23.925326751, 8.7433976979, 1.2863750428, 0.0000000000, 8.7433976979  
-21.0311718954, 8.1467336814, 1.9295521981, 0.0000000000, 8.1467336814  
-18.1370181157, 7.5711743293, 2.5727063385, 0.0000000000, 7.5711743293  
-15.2428643360, 7.016667482, 3.2158973293, 0.0000000000, 7.016667482  
-12.3487105562, 6.4829615184, 3.8594364419, 0.0000000000, 6.4829615184  
-9.4545567765, 5.9706177125, 4.5026509491, 0.0000000000, 5.9706177125  
-6.5604029968, 5.4794909943, 5.1458605622, 0.0000000000, 5.4794909943  
-3.6662492171, 5.0796233046, 5.6932438674, 0.0000000000, 5.0796233046  
-0.7720954373, 5.0796879625, 5.6933167017, 0.0000000000, 5.0796879625  
2.1220583424, 5.0790821391, 5.6924577548, 0.0000000000, 5.0790821391  
5.0162121221, 5.0799633814, 5.6936654070, 0.0000000000, 5.0799633814  
7.9103659019, 5.0794517813, 5.6929676244, 0.0000000000, 5.0794517813  
10.8045196816, 5.0787598775, 5.6920587648, 0.0000000000, 5.0787598775  
13.6986734613, 5.0787409086, 5.6920851297, 0.0000000000, 5.0787409086  
16.5928272410, 5.0788167466, 5.6922432627, 0.0000000000, 5.0788167466  
19.4869810207, 5.0788580522, 5.6923156007, 0.0000000000, 5.0788580522  
22.3811348005, 5.0790044978, 5.6925191293, 0.0000000000, 5.0790044978  
25.2752885802, 5.0788099713, 5.6922488143, 0.0000000000, 5.0788099713

#### 2. Resultados do choque e do ponto critico (x,h,y,Zf,Zs) :

choque montante : 37.5592584694, 5.0786938136, 5.6920873414, 0.0000000000, 5.0786938136  
choque jusante : 37.5592584694, 2.0000000000, 0.0000000001, 0.0000000000, 5.0786938136  
critico : 0.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000

### 3. Resultados ao longo do canal (x,h,y,Zf,Zs) :

1, -14000.0000000000, 10.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000, 10.0000000000, 10.0000000000

-2.9287368494, 5.8558015212, 4.6503383748, 0.0000000000, 5.8558015212  
-2.4201826693, 5.5967891163, 4.9895744948, 0.0000000000, 5.5967891163  
-1.8997182803, 5.3377767114, 5.3365507542, 0.0000000000, 5.3377767114  
-1.3664654936, 5.0787643065, 5.6920526119, 0.0000000000, 5.0787643065

### 2. Resultados do choque e do ponto critico (x,h,y,Zf,Zs) :

choque montante : 18.7796262498, 5.0786938139, 5.6920873407, 0.0000000000, 5.0786938139  
choque jusante : 18.7796262498, 2.0000000000, 0.0000000001, 0.0000000000, 5.0786938139  
critico : 0.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000

### 3. Resultados ao longo do canal (x,h,y,Zf,Zs) :

1, -14000.0000000000, 10.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000, 10.0000000000, 10.0000000000  
2, -12000.0000000000, 10.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000, 10.0000000000, 10.0000000000  
3, -10000.0000000000, 10.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000, 10.0000000000, 10.0000000000  
4, -8000.0000000000, 10.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000, 10.0000000000, 10.0000000000  
5, -6000.0000000000, 10.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000, 10.0000000000, 10.0000000000  
6, -4000.0000000000, 10.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000, 10.0000000000, 10.0000000000  
7, -2000.0000000000, 10.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000, 10.0000000000, 10.0000000000  
8, 0.0000000000, 5.0787643065, 5.691989369472, 0.0000000000, 5.0787643065  
9, 2000.0000000000, 2.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000, 2.0000000000, 2.0000000000  
10, 4000.0000000000, 2.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000, 2.0000000000, 2.0000000000

### \*\*\* RESULTADOS PARA O TEMPO = 3.0000 segundos

#### 1. Resultados no trecho afetado pelo choque (x,h,y,Zf,Zs) :

-19.809888231, 10.0000000000, 0.0000000000, 0.0000000000, 10.0000000000, 10.0000000000  
-17.8796330694, 9.3611515028, 0.6431924182, 0.0000000000, 9.3611515028  
-15.9502173158, 8.7431933729, 1.2865914727, 0.0000000000, 8.7431933729  
-14.0207815621, 8.1464424847, 1.9298717437, 0.0000000000, 8.1464424847  
-12.0913458085, 7.5708131195, 2.5731175040, 0.0000000000, 7.5708131195  
-10.1619100548, 7.0162241029, 3.2164207251, 0.0000000000, 7.0162241029  
-8.2324743012, 6.4822990829, 3.8602512920, 0.0000000000, 6.4822990829  
-6.3030385476, 5.9699097500, 4.5035583901, 0.0000000000, 5.9699097500  
-4.3736027939, 5.4782770626, 5.1473154677, 0.0000000000, 5.4782770626  
-2.4441670403, 5.0787649150, 5.6920517632, 0.0000000000, 5.0787649150  
-0.5147312866, 5.0787689974, 5.6920460910, 0.0000000000, 5.0787689974  
1.4147044670, 5.0787730792, 5.6920404188, 0.0000000000, 5.0787730792  
3.3441402207, 5.0788765339, 5.6921728560, 0.0000000000, 5.0788765339  
5.2735759743, 5.0788629302, 5.6921426049, 0.0000000000, 5.0788629302  
7.2030117280, 5.0789459012, 5.6922465727, 0.0000000000, 5.0789459012  
9.132474816, 5.0790298128, 5.6923785714, 0.0000000000, 5.0790298128  
11.0618832352, 5.0791641968, 5.6926004802, 0.0000000000, 5.0791641968  
12.9913189889, 5.0787511008, 5.6920615155, 0.0000000000, 5.0787511008  
14.9207547425, 5.0787343749, 5.6920734172, 0.0000000000, 5.0787343749  
16.8501904962, 5.0787176231, 5.6920853178, 0.0000000000, 5.0787176231

#### 2. Resultados do choque e do ponto critico (x,h,y,Zf,Zs) :

2,-12000.000000000000,10.000000000000,0.0000000000010, 0.000000000000, 10.000000000000  
3,-10000.000000000000,10.000000000000,0.0000000000010, 0.000000000000, 10.000000000000  
4,-8000.000000000000,10.000000000000,0.0000000000010, 0.000000000000, 10.000000000000  
5,-6000.000000000000,10.000000000000,0.0000000000010, 0.000000000000, 10.000000000000  
6,-4000.000000000000,10.000000000000,0.0000000000010, 0.000000000000, 10.000000000000  
7,-2000.000000000000,10.000000000000,0.0000000000010, 0.000000000000, 10.000000000000  
8, 0.000000000000, 5.078764306469, 5.691989369472, 0.000000000000, 5.0787643065  
9, 2000.000000000000, 2.000000000000, 0.00000000000050, 0.000000000000, 2.000000000000  
10, 4000.000000000000, 2.000000000000, 0.00000000000050, 0.000000000000, 2.000000000000

... continua ...

**ANEXO C**

MANUAIS COMPACTOS DE CONSULTA AOS PROGRAMAS  
ANALITIC E ROTRET

## ANEXO C

### C.1 - Manual Compacto de Consulta ao Programa ANALITIC

O programa ANALITIC funciona de modo direto, sem arquivo de entrada de dados; o resultado do programa, porém, é mostrado em um arquivo de saída (tipo texto). Os dados de entrada são solicitados na tela (com entrada via teclado), sendo o primeiro dado necessário o tipo de canal a jusante da barragem antes da ruptura (ver figura C.1-1). As opções são:

- Leito seco a jusante (que utiliza o método de Ritter - item 2.5);
- Leito submerso a jusante (que utiliza o método de Stoker- item 2.5).

A seguir, o programa solicita um nome para o arquivo de saída- ver figura C.1-2 (a extensão padrão é .REL, e não deve ser fornecida); o nome padrão do arquivo é STANDARD.REL.

Na sequência o programa passa a solicitar os seguintes dados, em função da opção já realizada quanto ao tipo de canal (ver figuras C.1-3- dados de entrada- C.1-4 e C.1-5- impressões das janelas do programa):

- Leito seco a jusante
  - profundidade a montante-  $h_0$ - (m);
  - velocidade de retirada do obstáculo-  $w$ - (m/s) - caso a retirada seja total, fornecer valor superior a duas vezes a celeridade da onda de montante;
  - posição da barragem-  $x_b$ - (m);
  - posição do final do canal-  $x_c$ - (m);
  - intervalo de tempo a adotar-  $dt$ - (s);
  - número máximo de intervalos de tempo-  $nt$ .
- 
- Leito submerso a jusante
    - profundidade a montante-  $h_0$ - (m);
    - profundidade a jusante-  $h_4$ - (m);
    - velocidade a montante-  $v_0$ - (m/s);
    - posição da barragem-  $x_b$ - (m);
    - posição do final do canal-  $x_c$ - (m);
    - intervalo de tempo a adotar-  $dt$ - (s);
    - número máximo de intervalos de tempo-  $nt$ .

O acesso ao arquivo de resultados pode ser realizado via qualquer editor de texto, e uma visão parcial é apresentada na figura C.1-6.

RUPTURA DE BARRAGENS  
metodos analiticos

- 1- leito seco a jusante,
- 2- leito submerso a jusante,
- 3- fim do programa.

OPCAO [    ]

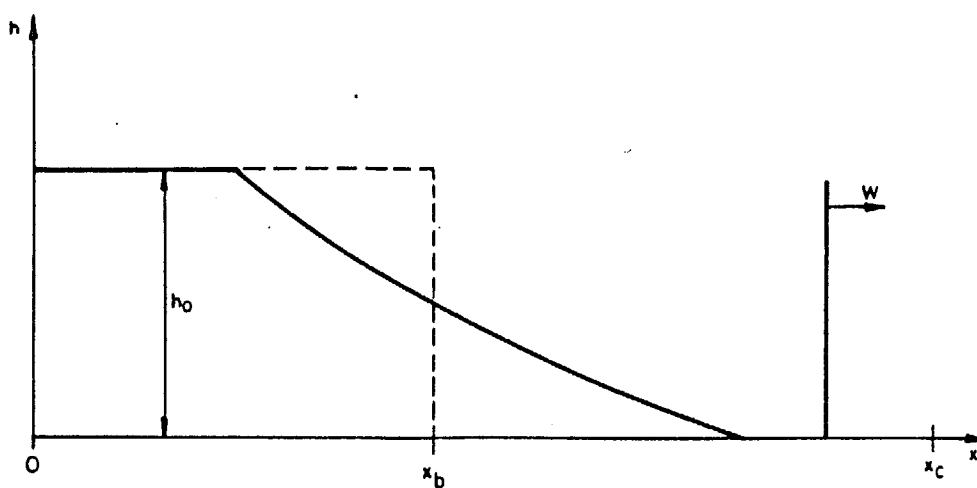
Figura C.1-1 - Menu principal do programa ANALITIC

RUPTURA DE BARRAGENS  
metodos analiticos

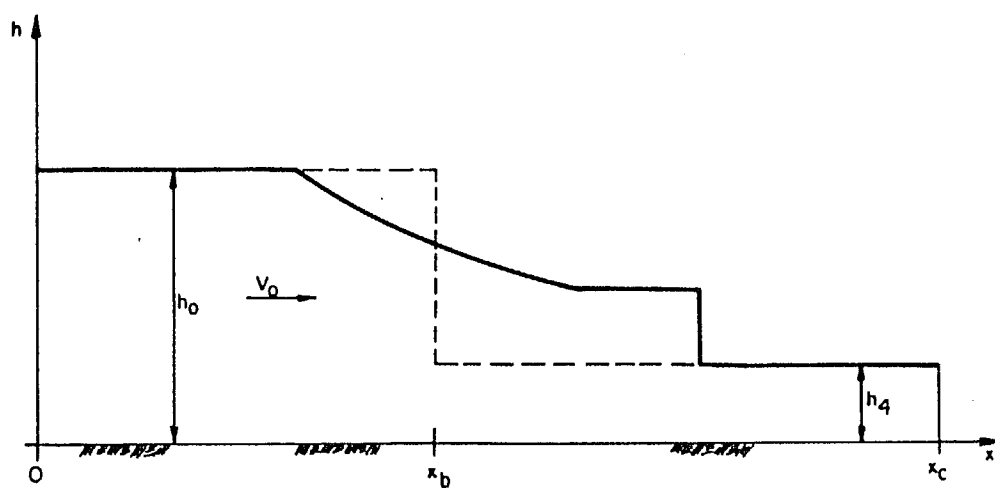
- 1- leito seco a jusante,
- 2- leito submerso a jusante,
- 3- fim do programa.

OPCAO [ 1 ]  
entre o nome do arquivo de saida : exemplo1

Figura C.1-2 - Solicitação do nome do arquivo



Leito seco a jusante



Leito submerso a jusante

Figura C.1-3 - Dados de entrada necessários

profundidade a montante :  
10  
velocidade de retirada da barragem :  
25  
posicao da barragem :  
10000  
posicao do final do canal :  
20000  
intervalo de tempo :  
10  
numero maximo de intervalos de tempo :  
5

Figura C.1-4 - Dados de entrada para a opção de  
leito seco a jusante

profundidade a montante :  
10  
profundidade a jusante :  
2  
velocidade a montante :  
0  
posicao da barragem :  
10000  
posicao do final do canal :  
20000  
intervalo de tempo :  
10  
numero maximo de intervalos de tempo :  
5

Figura C.1-5 - Dados de entrada para a opção de  
leito submerso a jusante

arquivo:exemplo2.rel - Leito submerso a jusante

#### 1. Dados de Entrada

profundidade a montante : 10.000 m  
 profundidade a jusante : 2.000 m  
 velocidade a montante : 0.000 m/s  
 posição da barragem : 10000.000 m  
 posição do final do canal : 20000.000 m  
 intervalo de tempo : 10.000 s  
 número máximo de intervalos de tempo : 5

#### 2. Características da Frente de Choque:

celeridade = 9.390 m/s  
 velocidade = 5.692 m/s  
 profundidade = 5.079 m

#### 3. Resultados obtidos para tempo = 10.0 s

##### 3.1 Região não afetada pelo choque

Para as posições compreendidas entre 0,000 m e 9900.955 m  
 tem-se : profundidade = 10.000 m e velocidade = 0.000 m/s

##### 3.2 Trecho Parabólico

| posição (m) | profundidade (m) | velocidade (m/s) |
|-------------|------------------|------------------|
| 9900.955    | 10.000           | 0.000            |
| 9909.193    | 9.453            | 0.549            |
| 9917.673    | 8.906            | 1.115            |
| 9926.417    | 8.360            | 1.698            |
| 9935.453    | 7.813            | 2.300            |
| 9944.810    | 7.266            | 2.924            |
| 9954.527    | 6.719            | 3.572            |
| 9964.648    | 6.172            | 4.246            |
| 9975.228    | 5.626            | 4.952            |
| 9986.336    | 5.079            | 5.692            |
| 10000.000   | 5.079            | 6.603            |

##### 3.3 Região entre o trecho parabólico e a frente de onda (ou o fim do canal)

Para as posições entre  $x = 9986.336$  m e  $x = 10093.898$   
 temos: profundidade = 5.079 m e velocidade = 5.692 m/s

##### 3.4 Trecho Final do Canal

Para as posições compreendidas entre  $x = 10093.898$  m e  $x = 20000.000$  m  
 temos: profundidade = 2.000 m e velocidade = 0.000 m/s

#### 4. Resultados obtidos para tempo = 20.0 s

...

Figura C.1-6 - Listagem de saída dos resultados

## C.2 - Manual Compacto de Consulta ao Programa ROTRET

O programa ROTRET é destinado ao estudo de ondas de rupturas instantâneas de barragens em canais retangulares, sem contribuição lateral; o canal pode ou não possuir declividade longitudinal, rugosidade e vazão inicial.

A utilização do programa é iniciada a partir do editor do compilador do Turbo-Pascal 7.0, ou através do aviso do DOS, digitando ROTRET (dentro do diretório que contém os arquivos do programa).

O programa utiliza um esquema de arquivos de dados e de resultados, todos incluídos no diretório que contém o programa e as suas "UNIT"s. Os arquivos necessários para a execução do programa são:

- xxxxxxx.DAD, arquivo de dados existente ou gerado pelo programa;
- xxxxxxx0.REL a xxxxxx9.REL, arquivos com os resultados da execução do programa (criados automaticamente, com 10% do tempo máximo armazenado em cada arquivo);
- xxxxxxx.SAD, arquivo com resultados parciais (na opção de relatório completo), para verificações intermediárias (criado automaticamente, e normalmente encontra-se em branco).

O programa está organizado em menus, para execução das diversas etapas do programa. A seguir é apresentada, de maneira sucinta, a utilização do programa.

#### A. Menu principal

No menu principal são realizadas as opções gerais do programa, através do número da opção:

- 1- Entrada de dados (**Entr. dados**);
- 2- Manipulação de arquivos (**Manipula arq.**);
- 3- Opção de tipo de relatório (**Relatório**);
- 4- Processamento (**Processamento**);
- 5- Testes (**Teste**);
- 6 a 8- opções não disponíveis;
- 9- Finalização do programa (**Fim**).

A figura C.2.1 mostra a tela inicial do programa, juntamente com o menu principal.

A maioria das opções acima conduz a sub-menus, conforme descrito na seqüência.

|                                                                                                                                       |                                                                                                                                                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p style="text-align: center;">BEM VINDO AO PROGRAMA DE RUPTURA DE BARRAGENS</p> <p>CANAL RETANGULAR COM DECLIVIDADE CONSTANTE...</p> | <p>Menu:</p> <p>1 Entr. dados<br/> 2 Manipula arg.<br/> 3 Relatorio<br/> 4 Processamento<br/> 5 Testes<br/> 6<br/> 7<br/> 8<br/> 9 Fim</p> <p>Opcao: [ ]</p> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Figura C.2.1 - Tela principal do programa

## B. Menus Secundários

### B.1- Entrada de dados (opção 1 - **Entr. dados**)

Este menu secundário dá acesso às opções:

B.1.1 - Entrada de dados para análise em canal retangular (opção 2)

A entrada de dados é realizada de modo iterativo, via teclado e tela do computador. Os dados necessários são, pela ordem:

a. Dados gerais

- .Nome do arquivo de gravação;
- .Comentários a respeito do exemplo;
- .Incrementos de espaço e tempo ( $\Delta x$  e  $\Delta t$ );
- .Largura do canal;
- .Abcissas do início e do final do canal (origem na barragem);
- .Profundidade e velocidade a montante da barragem, e profundidade a jusante, antes da ruptura;
- .Número de Courant para a estabilidade;
- .Tempo máximo de cálculo.

b. Condições iniciais

- .Número de pontos, e pares abcissa-cota, das condições iniciais (pré-ruptura);
- .Número de pontos, e ternos abcissa-cota-velocidade, das "condições naturais" (existentes antes da construção da barragem);

As figuras C.2.2 a C.2.4 mostram as telas de entrada de dados de um exemplo de aplicação.

| Entrada de dados - canal retangular constante                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|------------------|
| > Nome do arquivo de gravacao > exemplo1<br>> Comentarios Principais (max. 2x40 carac.) ><br>este e' um exemplo de entrada de dados<br>> Comentarios Secundarios (max. 2x40 carac.) >                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  | ENTRADA DE DADOS |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |  | 1                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |  | 2 Dados Retang.  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |  | 3                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |  | 4                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |  | 5                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |  | 6                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |  | 7                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |  | 8                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |  | 9 Saida          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |  | Opcao: [2]       |
| > Intervalo de tempo - dt > 1<br>> Intervalo de espaco - dx > 2000<br>> Largura do canal > 20<br>> Tempo maximo de calculo > 300<br>> Declividade do canal - constante > 0.00<br>> Coeficiente de rugosidade de Manning > 0.012<br>> Abcissa do inicio do reservatorio > -14000<br>> Abcissa do final do canal > 4000<br>> Profundidade a montante da barragem > 10<br>> Profundidade a jusante da barragem > 2<br>> Velocidade a montante da barragem > 0.5<br>> Numero de COURANT, para estab. (<1)) > 1 |  |                  |

Figura C.2.2 - Tela de entrada de dados gerais

| Entrada de dados - canal retangular constante                      |  |                  |
|--------------------------------------------------------------------|--|------------------|
| > Numero de pontos com condicoes iniciais > 4<br>pares (xini,hini) |  | ENTRADA DE DADOS |
|                                                                    |  | 1                |
|                                                                    |  | 2 Dados Retang.  |
|                                                                    |  | 3                |
|                                                                    |  | 4                |
|                                                                    |  | 5                |
|                                                                    |  | 6                |
|                                                                    |  | 7                |
|                                                                    |  | 8                |
|                                                                    |  | 9 Saida          |
|                                                                    |  | Opcao: [2]       |
| 1 -14000 10<br>2 0 10<br>3 0.01 2<br>4 4000 2                      |  |                  |

Figura C.2.3 - Tela de entrada de dados de condições iniciais

| Entrada de dados - canal retangular constante                                                                                          |                                                                                                                                                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <pre> &gt; Numero de pontos com condicoes "naturais" &gt; 2 ternos (xininat,hininat,vininat) 1  -14000 0.5 0.6 2   4000 0.5 0.6 </pre> | <p>ENTRADA DE DADOS</p> <p>1</p> <p>2 Dados Retang.</p> <p>3</p> <p>4</p> <p>5</p> <p>6</p> <p>7</p> <p>8</p> <p>9 Saida</p> <p>Opcao: [2]</p> |

Figura C.2.4 - Tela de entrada de dados de condições naturais

B.1.2 - Retorno ao menu principal (opção 9)

As demais opções não estão disponíveis.

B.2- Manipulação de arquivos (opção 3 - **Manipula arq.**)

Esta opção de menu secundário acessa as seguintes opções:

B.2.1 - Gravação de arquivo (opção 1)

Solicita o nome do arquivo a ser gravado, e grava os dados de entrada do programa (já fornecidos, lidos ou alterados), com a extensão .DAD.

#### B.2.2 - Leitura de arquivo (opção 2)

Lê o arquivo de dados (a extensão .DAD é padrão, não sendo fornecida na entrada do dado), após o seu nome ser fornecido.

#### B.2.3 - Troca de nome de arquivo (opção 3)

Troca o nome de um arquivo que será gravado na opção B.2.1.

#### B.2.4 - Retorno ao menu principal (opção 9).

### B.3- Opção de tipo de relatório (opção 3 - **Relatório**)

Permite a impressão de um relatório completo ou sucinto.

### B.4- Processamento (opção 4 - **Processamento**)

Executa todos os cálculos do programa, através da rotina PROCESSA. O programa só retorna ao menu principal (automaticamente) após satisfeita uma das opções de finalização do programa (tempo excessivo, canal curto, onda dissipada ou erro na solução de um sistema de equações). A figura C.2.5 mostra uma tela do programa durante o processamento.

### B.5- Testes (opção 5 - **Teste**)

Esta opção é utilizada para teste de parte do programa, sem passar por etapas precedentes. Esta opção está, no momento, inativa, podendo ser ativada em qualquer instante, alterando-se a rotina TESTE, na UNIT TESTES.

### B.6- opções 6 a 8 não disponíveis.

### B.7- Finalização do programa (opção 9 - **Fim**)

Finaliza o programa e retorna ao aviso do DOS.

| RUPTURA DE BARRAGEM / CANAL RETANGULAR    | exemplol        |
|-------------------------------------------|-----------------|
| Primeiro intervalo de tempo armazenado... | Menu:           |
| Onda negativa calculada - 2               | 1 Entr. dados   |
| Onda calculada - ONDA_CHOQUE              | 2 Manipula arq. |
| Pontos internos calculados                | 3 Relatorio     |
| Ponto critico calculado                   | 4 Processamento |
| Dados armazenados... NOVA ITERACAO        | 5 Testes        |
|                                           | 6               |
|                                           | 7               |
| Onda negativa calculada - 3               | 8               |
| Onda calculada - ONDA_CHOQUE              | 9 Fim           |
| Pontos internos calculados                | Opcao: [4]      |
| Ponto critico calculado                   |                 |
| Dados armazenados... NOVA ITERACAO        |                 |
| Onda negativa calculada - 4               |                 |
| Onda calculada - ONDA_CHOQUE              |                 |

Figura C.2.5 - Tela de processamento do programa ROTRET

### C. Variáveis do Programa

As variáveis principais do programa são:

- Condições do choque (tempo, velocidade e celeridade do choque, velocidade e profundidade a montante e a jusante do choque);
- Condições nos pontos para cálculo das características- pontos P, M, L, R e S (tempo, posição, velocidade e profundidade);
- Condições na região afetada pelo choque (tempo, posição, velocidade e profundidade em 20 pontos igualmente espaçados na região afetada);
- Condições ao longo do canal (tempo, posição, velocidade e profundidade nos pontos espaçados de  $\Delta x$ );
- Condições do ponto de escoamento crítico, se existir (tempo, posição, velocidade e profundidade).

A figura C.2.6 mostra um trecho de um arquivo de saída.

## ARQUIVO DE TRANSICAO- PROCESSAMENTO/POS-PROCESSAMENTO

## 0. Dados de entrada:

1 este e' um exemplo de entrada de dados

```

2
3 1 2000.00000 1.00000 20.00000 0.0000000000 300.00000 2
4 0.01200 -14000.0000000000 4.0667082707 10.0000000000 0.500000000000000
5
-14000.0000000000 10.0000000000
0.0000000000 10.0000000000
0.0100000000 2.0000000000
4000.0000000000 2.0000000000
6
2
-14000.0000000000 0.5000000000 0.60000000000003638
4000.0000000000 0.5000000000 0.60000000000003638
9

```

## Perfil inicial (x,h,v,Zf,Zs) :

```

1, -14000.00000000000, 10.00000000000, 0.50000000000, 0.0000000000, 10.0
2, -12000.00000000000, 10.00000000000, 0.50000000000, 0.0000000000, 10.0
3, -10000.00000000000, 10.00000000000, 0.50000000000, 0.0000000000, 10.0
4, -8000.00000000000, 10.00000000000, 0.50000000000, 0.0000000000, 10.0
5, -6000.00000000000, 10.00000000000, 0.50000000000, 0.0000000000, 10.0
6, -4000.00000000000, 10.00000000000, 0.50000000000, 0.0000000000, 10.0
7, -2000.00000000000, 10.00000000000, 0.50000000000, 0.0000000000, 10.0
8, 0.00000000000, 10.00000000000, 0.50000000000, 0.0000000000, 10.00000
9, 2000.00000000000, 2.00000000000, 2.50000000000, 0.0000000000, 2.000
10, 4000.00000000000, 2.00000000000, 2.50000000000, 0.0000000000, 2.000

```

\*\*\*\*\*

\*\*\* RESULTADOS PARA O TEMPO = 1.00000 segundos

## 1. Resultados no trecho afetado pelo choque (x,h,v,Zf,Zs) :

```

-10.4045444115, 10.0000000000, 0.5000000000, 0.0000000000, 10.0000000000
-9.9667907096, 9.7075220570, -0.0414975321, 0.0000000000, 9.7075220570
-9.5223912781, 9.4150441140, 0.2547687556, 0.0000000000, 9.4150441140
-9.0710339257, 9.1225661710, 0.5556736572, 0.0000000000, 9.1225661710
-8.6123812251, 8.8300882280, 0.8614421243, 0.0000000000, 8.8300882280
-8.1460675608, 8.5376102850, 1.1723179005, 0.0000000000, 8.5376102850
-7.6716957185, 8.2451323420, 1.4885657954, 0.0000000000, 8.2451323420
-7.1888329235, 7.9526543990, 1.8104743253, 0.0000000000, 7.9526543990
-6.6970062183, 7.6601764560, 2.1383587955, 0.0000000000, 7.6601764560
-6.1956970359, 7.3676985130, 2.4725649171, 0.0000000000, 7.3676985130
-5.6843347945, 7.0752205700, 2.8134730780, 0.0000000000, 7.0752205700
-5.1622892856, 6.7827426270, 3.1615034173, 0.0000000000, 6.7827426270
-4.6288615685, 6.4902646840, 3.5171218953, 0.0000000000, 6.4902646840
-4.0832729936, 6.1977867410, 3.8808476119, 0.0000000000, 6.1977867410
-3.5246518643, 5.9053087980, 4.2532616982, 0.0000000000, 5.9053087980
-2.9520170836, 5.6128308550, 4.6350182186, 0.0000000000, 5.6128308550
-2.3642579098, 5.3203529120, 5.0268576678, 0.0000000000, 5.3203529120
-1.7601086228, 5.0278749690, 5.4296238591, 0.0000000000, 5.0278749690
-1.1381164487, 4.7353970260, 5.8442853085, 0.0000000000, 4.7353970260
-0.4966004060, 4.4429190830, 6.2719626703, 0.0000000000, 4.4429190830

```

## 2. Resultados do choque e do ponto critico (x,h,v,Zf,Zs) :

```

choque montante : 10.8778605088, 4.4429190830, 7.1047240799, 0.0000000000
choque jusante : 10.8778605088, 2.0000000000, 2.5000000000, 0.0000000000
critico : 4.0667082707, 4.442919083012, 6.6018964097, 0.0000000000, 4.4

```

## 3. Resultados ao longo do canal (x,h,v,Zf,Zs) :

```

1, -14000.00000000000, 10.00000000000, 0.50000000000, 0.0000000000, 10.0
2, -12000.00000000000, 10.00000000000, 0.50000000000, 0.0000000000, 10.0
3, -10000.00000000000, 10.00000000000, 0.50000000000, 0.0000000000, 10.0
4, -8000.00000000000, 10.00000000000, 0.50000000000, 0.0000000000, 10.0
5, -6000.00000000000, 10.00000000000, 0.50000000000, 0.0000000000, 10.0
6, -4000.00000000000, 10.00000000000, 0.50000000000, 0.0000000000, 10.0
7, -2000.00000000000, 10.00000000000, 0.50000000000, 0.0000000000, 10.0
8, 0.00000000000, 4.442919083012, 6.308320406963, 0.0000000000, 4.44291
9, 2000.00000000000, 2.00000000000, 2.50000000000, 0.0000000000, 2.000
10, 4000.00000000000, 2.00000000000, 2.50000000000, 0.0000000000, 2.000

```

Figura C.2.6 - Trecho de um arquivo de saída do programa

ROTRET