

Manual Técnico do Programa *SisCCoH*

Versão 1.1

Maio, 2019



Sistema para Cálculos de Componentes Hidráulicos

O conteúdo e as especificações do programa podem estar sujeitos a alterações sem aviso prévio. A Pimenta de Ávila e a UFMG se reservam o direito de alterar e atualizar sem aviso prévio.

**Diretoria da
Pimenta de Ávila**
Joaquim Pimenta de
Ávila
Cristiano Vieira de
Ávila

**Departamento de
Engenharia
Hidráulica e
Recursos Hídricos**
Márcio Benedito
Baptista

Coordenação
Gladstone Rodrigues
Alexandre

**Elaboração do
texto**
Josiane Marinho
Barcelos

**Orientação e
Revisão do Texto**
Márcio Benedito
Baptista
Gladstone Rodrigues
Alexandre

Conteúdo	
Lista de Símbolos.....	2
Índice de Figuras.....	6
Índice de Tabelas	7
Apresentação.....	8
Instalação e Desinstalação do SisCCoH	11
1 INTRODUÇÃO.....	12
2 CONDUTOS FORÇADOS	14
2.1 Condutos Simples.....	14
2.1.1 Escoamento permanente	14
3 ESCOAMENTOS LIVRES.....	17
3.1 Máxima eficiência.....	17
3.2 Seções Regulares.....	19
3.2.1 Uniforme	19
3.2.2 Crítico	23
3.2.3 Variado.....	25
3.2.4 Canais em Enrocamento	35
4 ESTRUTURAS HIDRÁULICAS	38
4.1 Bueiros	38
4.2 Escoamento em Degraus	42
4.2.1 Regime de Escoamento em Degraus.....	42
4.2.2 Regime Nappe Flow	46
4.2.3 Regime Skimming Flow	50
4.2.4 Canais em Trechos Distintos	59
4.2.5 Quedas Singulares.....	62
4.3 Bacias de dissipação por Ressalto Hidráulico.....	63
4.4 Bacias de dissipação em enrocamento	67
5 SINGULARIDADES	72
5.1 Confluência de Canais.....	72
5.2 Curvas em Canais.....	77

Alexandre, Gladstone Rodrigues. Baptista, Márcio Benedito. Barcelos, Josiane Marinho.

Manual Técnico do SisCCoH / Gladstone Rodrigues Alexandre. Márcio Benedito Baptista, Josiane Marinho Barcelos. – 1. Ed. - Belo Horizonte: Pimenta de Ávila Consultoria e Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos – EHR UFMG, 2019.

Lista de Símbolos

A	Área da seção, seção molhada (m^2), coeficiente usado no cálculo do coeficiente de atrito no regime Skimming Flow.
B	Largura superficial (m)
B _{inf} , b	Largura inferior (m)
b _c	Largura interna da confluência (m)
borda _{livre}	Altura da borda livre (m)
b _s	Largura máxima da bacia de separação (m)
C _e	Perda de carga na entrada (m)
C _s	Perda de carga na saída (m)
C _{med}	Concentração média de ar
C _u	Coeficiente de uniformidade
D	Diâmetro (m)
D _N	Número de queda
D ₅₀	Diâmetro correspondente ao tamanho médio dos grãos (m)
D ₁₀₀	Diâmetro máximo dos grãos (m)
d	Adimensional usado no cálculo de C _{med} no regime Skimming Flow
d _w	Profundidade representativa do escoamento (m)
E _c	Energia crítica (m)
E _r	Energia residual do regime não uniforme do escoamento Skimming Flow (m)
E _{res}	Energia residual (m)
E _{ru, tipo A}	Energia residual do regime aproximadamente uniforme do escoamento Skimming Flow tipo A (m)
E _{ru, tipo B}	Energia residual do regime aproximadamente uniforme do escoamento Skimming Flow tipo B (m)
Eq	Equação auxiliar
E _{tot}	Energia total (m)
f	Coeficiente de perda de carga da equação universal; coeficiente de atrito no regime Skimming Flow
f'	Número de Froude rugoso
f _{máx}	Coeficiente de atrito máximo no regime Skimming Flow.
Fr	Número de Froude

g	Aceleração da gravidade (adotada igual a 9,81 m/s ²)
H_d	Altura da descida em degraus (m)
H_{dam}	Altura total da queda (m)
H_e	Altura do escoamento não uniforme (m)
H_{dissip}	Energia dissipada (m)
$H_{máx}$	Energia máxima (m)
$H_{parede,mín,sem\ ressalto}$	Altura da parede mínima sem formação de ressalto (m)
$H_{parede,mín,com\ ressalto}$	Altura da parede mínima com formação de ressalto (m)
$H_{r,completo}$	Energia residual com ressalto completo (m).
$H_{r,parcial}$	Energia residual com ressalto parcial (m)
H_w	Altura do muro da escada (m)
h_o	Altura acima do centro de gravidade (m)
I	Declividade do fundo do canal (m/m)
h_s	Profundidade da linha d'água (m)
$I_{c, celular}$	Declividade crítica para bueiro celular (m/m)
$I_{c, tubular}$	Declividade crítica para bueiro tubular (m/m)
J	Declividade da energia total (m/m)
k	Rugosidade na superfície da calha
L	Comprimento (m)
L_A	Comprimento da aproximação da bacia de dissipação (m)
L_a	Posição de início da aeração (m)
L_s	Comprimento da bacia de dissipação (m)
L_{IV}	Comprimento da bacia de dissipação tipo IV(m)
L'	Semitrecho linear da sobrelevação (m)
Q	Vazão (m ³ /s)
L_d	Comprimento da queda (m)
$Q_{adm,celular,o}$	Vazão admissível no bueiro celular funcionando como orifício (m ³ /s)
$Q_{adm,celular,subcri}$	Vazão admissível no bueiro celular no regime subcrítico (m ³ /s)
$Q_{adm, celular,supercri}$	Vazão admissível no bueiro celular no regime supercrítico (m ³ /s)
$Q_{adm,tubular,o}$	Vazão admissível no bueiro tubular funcionando como orifício (m ³ /s)

$Q_{adm, tubular, subcri}$	Vazão admissível no bueiro tubular no regime subcrítico (m ³ /s)
$Q_{adm, tubular, supercri}$	Vazão admissível no bueiro tubular no regime supercrítico (m ³ /s)
q_d	Vazão específica (m ³ /s.m)
Q_o	Vazão transportada em funcionamento como orifício (m ³ /s)
R_h	Raio hidráulico (m)
S	Altura do degrau (m)
$\left(\frac{S}{y_c}\right)_S$	Limite superior do regime Skimming Flow
$\left(\frac{S}{y_c}\right)_B$	Limite entre regimes do tipo A e B do Skimming Flow
U	Velocidade (m/s).
$U_{celular, o}$	Velocidade no bueiro celular funcionando como orifício (m/s)
$U_{celular, subcri}$	Velocidade no bueiro celular no regime subcrítico (m/s).
$U_{celular, supercri}$	Velocidade no bueiro celular no regime supercrítico (m/s)
$U_{saída}$	Velocidade de saída (m/s)
$U_{tubular, o}$	Velocidade no bueiro tubular funcionando como orifício (m/s)
$U_{tubular, subcri}$	Velocidade no bueiro tubular no regime subcrítico (m/s)
$U_{tubular, supercri}$	Velocidade no bueiro tubular no regime supercrítico (m/s)
V_{cra}	Velocidade crítica de cavitação (m/s)
W_B	Espessura na saída da bacia (m)
W_0	Largura do <i>riprap</i> (m)
Y_a	Profundidade de início da aeração (m)
y_1, D_1	Profundidade conjugada a montante(m)
y_2, D_2	Profundidade conjugada a jusante(m)
y_3	Profundidade na saída da bacia (m)
y_c	Profundidade crítica (m)
$y_{0,9}$	Profundidade normal para a concentração de ar igual a 0,9 (m)
z	Declividade lateral (m/m)
α	Coefficiente de Coriolis
β	Coefficiente de Boussinesq, ângulo da onda em confluência de canais (°)

Δh	Perda de carga (m)
ΔE	Energia dissipada (m)
Δy_{sub}	Sobrelevação no regime subcrítico a montante da curva. (m)
Δy_{super}	Sobrelevação no regime supercrítico a montante da curva. (m)
δ	Ângulo médio entre as linhas do escoamento secundário e principal,
θ	Ângulo formado pelo alinhamento das quinas da escada ou entre dois canais em confluência de canais (°)
μ	Coefficiente de contração

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Arquitetura do Programa SisCCoH.	13
Figura 2.1 - Conduto Forçado Simples em regime de escoamento permanente.	15
Figura 3.1 - <i>Dados e Resultados</i> para condição de Máxima Eficiência	18
Figura 3.2 - <i>Quantitativos e Relatório</i> para condição de Máxima Eficiência	19
Figura 3.3 – <i>Dados e Resultados</i> de Escoamento permanente livre uniforme	22
Figura 3.4 - <i>Quantitativos e Relatório</i> de seção retangular sob regime de escoamento permanente livre uniforme	22
Figura 3.5 - <i>Dados e Resultados</i> do Regime Crítico	24
Figura 3.6 - <i>Dados e Resultados</i> em Escoamento Gradualmente Variado.	27
Figura 3.7 - <i>Visualização</i> do Perfil da linha d'água e relatório	28
Figura 3.8 - Profundidade conjugada do ressalto hidráulico em canais inclinados.	30
Figura 3.9 - Comprimento dos ressaltos em canais inclinados.	31
Figura 3.10 - <i>Dados e Resultados</i> do ressalto hidráulico	34
Figura 3.11 - <i>Visualização</i> dos resultados e <i>Relatório</i>	35
Figura 3.12 - <i>Dados e Resultados</i> de Canais em enrocamento.	37
Figura 4.1 - <i>Dados e Resultados</i> de um bueiro tubular de concreto	41
Figura 4.2 - <i>Visualização e Relatório</i> de Bueiros	41
Figura 4.3 - <i>Caracterização do escoamento de Canais em Degraus</i>	46
Figura 4.4 - Caracterização do Regime de Escoamento Nappe Flow	49
Figura 4.5 - <i>Dados e Resultados</i> do regime Nappe Flow	49
Figura 4.6 - <i>Relatório</i> Regime de Escoamento Nappe Flow	50
Figura 4.7 - Esquema de escadas utilizadas. Em (a) descida em degraus utilizada para $\theta=19, 23, 30$ e 55° e em (b) utilizada para $\theta=5,7, 8,5$ e $11,3^\circ$.	51
Figura 4.8 - <i>Dados e Resultados</i> do regime Skimming Flow	56
Figura 4.9 - <i>Visualização e Início do Escoamento</i> do regime Skimming Flow	57
Figura 4.10 - Notificação das condições de contorno consideradas	57
Figura 4.11 - <i>Risco de Cavitação e Relatório</i> do regime Skimming Flow	58
Figura 4.12 - <i>Dados</i> em canais distintos em escoamento em degraus ou calha lisa.	60
Figura 4.13 - <i>Resultados</i> de canais com trechos distintos	61
Figura 4.14 - <i>Relatório</i> em Canais com Trechos Distintos	61
Figura 4.15 - <i>Dados e Resultados</i> de Quedas Singulares	62
Figura 4.16 - <i>Visualização e Relatório</i> de Quedas Singulares.	63

Figura 4.17 - Bacia de dissipação tipo III	65
Figura 4.18 - Bacia de dissipação IV	66
Figura 4.19 - <i>Dados e Resultados</i> de Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico	67
Figura 4.20 - <i>Visualização</i> de Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico	67
Figura 4.21 - <i>Dados</i> do módulo Bacias de dissipação em Enrocamento.	70
Figura 4.22 - <i>Resultados</i> do módulo Bacias de dissipação em Enrocamento	70
Figura 5.1 - Esquema da Dinâmica do Escoamento nas Confluência	72
Figura 5.2 - Esquema da junção de dois escoamentos torrenciais	75
Figura 5.3 - <i>Dados</i> da Confluência em Canais Retangulares	76
Figura 5.4 - <i>Resultados</i> da Confluência em Canais Retangulares	77
Figura 5.5 - Comprimento de trecho com sobrelevação.	79
Figura 5.6 - Ondas oblíquas em um trecho de canal em curva	80
Figura 5.7 - <i>Dados e Altura da Sobrelevação</i> de Curvas em Canais	81
Figura 5.8 - <i>Pontos de sobrelevação</i> de Curvas em Canais	82
Figura 5.9 - <i>Comprimento da Sobrelevação e Resultados</i> de Curvas em Canais	82

Índice de Tabelas

Tabela.2.1 - Variáveis a serem calculadas e dados necessários.	14
Tabela 3.1 - Geometria, profundidade normal e área de seções típicas regulares.....	17
Tabela 3.2 - Dados necessários.....	20
Tabela 3.3 - Tabela comparativa das curvas.....	26
Tabela 3.4 - Classificação do Ressalto Hidráulico.....	29
Tabela 4.1 - Exemplo de canal com trechos distintos	59
Tabela 5.1 - Cálculo dos coeficientes de <i>Boussinesq</i>	73

Apresentação

O *software SisCCoH* é um programa de livre acesso concebido, à princípio, durante pesquisas de caráter de Iniciação Científica no Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da EE – UFMG, sob orientação de Márcio Baptista e Márcia Lara, apoiado pela pró-reitoria de Pesquisa da UFMG, pela FAPEMIG e pelo CNPq.

O *Software SisCCoH* possui contribuições de diferentes profissionais relacionados à Hidráulica Computacional desde 1992. Primeiramente, sob o nome *Hidro* e foi posteriormente atualizado para *Hidrowin*, incorporando rotinas de cálculo do escoamento bruscamente variado, estruturas hidráulicas e redes ramificadas. Por fim, com o nome atual *SisCCoH*, incorporou o cálculo de escoamento em degraus, algumas singularidades e outras estruturas hidráulicas.

Inicialmente, em 1992, o programa *Hidro* foi desenvolvido para solucionar questões do cálculo de escoamento uniforme e gradualmente variado, tendo como linguagem original, o Fortran. O *software Hidro* foi desenvolvido por Márcio Resende e P. Lima. Durante os anos de 1994 e 1995, a nova versão *Hidro 1* foi desenvolvida na linguagem Pascal por Marcelo Medeiros e Márcio Cândido, apresentando resolução para Conduitos Forçados.

Em 2001, o *software* foi renomeado para *Hidrowin* e continha as adaptações para a linguagem Visual Basic para Windows e foi desenvolvido por Francisco Eustáquio Oliveira Silva. De 2002 a 2005, não houve nenhuma publicação nova do programa, até que em 2005 quando Gladstone Rodrigues Alexandre desenvolveu a versão 2.0 e incorporou o cálculo de estruturas hidráulicas e escoamento bruscamente variado, além do cálculo de redes ramificadas, programado por Rubens Gomes Dias Campos. Novamente atualizado por Gladstone, em 2009, a versão *Hidrowin 2.1* readequou os cálculos dos módulos de escoamento em degraus.

Em 2014, o *software* foi renomeado para *SisCCoH*, versão 1.0, desenvolvido por Bernardo Mourão Mesquita na linguagem Visual Basic .NET para ambiente Windows utilizando a IDE Visual Studio 2008 Professional Edition. Essa versão incorporou módulos de escoamento em degraus de canais retangulares, de singularidades como

canais em curva, confluência de canais e estruturas hidráulicas como bacias de dissipação e canais em enrocamento. Bernardo foi orientado por Gladstone Alexandre, Felipe Figueiredo e Lucas Brasil.

Participaram do desenvolvimento, numa parceria entre a UFMG e a Pimenta de Ávila, os professores Márcio Benedito Baptista e Márcia Maria Lara Pinto Coelho, engenheiros civis e doutores em Engenharia de Recursos Hídricos e Hidráulica, respectivamente; Gladstone Alexandre e Lucas Brasil, engenheiros civil e mestres em Engenharia de Recursos Hídricos; José Luiz Teixeira Garcia Filho e Bernardo Mourão Filho, ambos graduandos em Ciência da Computação em 2014; e Josiane Marinho Barcelos, graduanda em Engenharia Civil, incorporou-se ao projeto em 2018.

Atualmente, o *software* 1.1 do *SisCCoH* foi atualizado para a versão 1.1 por Josiane Marinho Barcelos, incorporando adequações ao programa e manual técnico, utilizando a linguagem VB.NET no compilador Visual Studio 2015, sob orientação de Gladstone Alexandre e Márcio Baptista.

A Tabela 1 resume o histórico do programa e suas principais características:

Tabela 1 – Síntese do Histórico do Programa

Ano	Programador (a)	Nome/ Versão	Linguagem de Programação
2019	Josiane Barcelos	<i>SisCCoH</i> 1.1	Visual Basic .NET (Visual Studio 2015), para ambiente Windows
2014	Bernardo Mesquita	<i>SisCCoH</i> 1.0	Visual Basic .NET (Visual Studio 2008 Professional Edition), para ambiente Windows
2009	Gladstone Alexandre	HIDROwin 2.1	Visual Basic 6.0, para ambiente Windows

(Continua...)

(Continuação)

Ano	Programador (a)	Nome/ Versão	Linguagem de Programação
2005	Gladstone Alexandre	HIDROwin 2.0	Visual Basic 6.0, para ambiente Windows
2001 e 2002	Francisco Eustáquio	HIDROwin	Visual Basic 6.0, para ambiente Windows
1994 e 1995	Marcelo Medeiros e Márcio Cândido	HIDRO 1	FORTRAN, para ambiente DOS
1992	Márcio Resende e P. Lima	HIDRO	FORTRAN, para ambiente DOS

Conforme apresentado anteriormente, é possível perceber a participação ao longo de vinte e seis anos de diferentes profissionais, com a finalidade de desenvolver o *SisCCoH* para consulta, utilização para fins acadêmicos, bem como daqueles profissionais que se interessarem em utilizar a ferramenta para solucionar problemas no dimensionamento dos componentes hidráulicos.

Instalação e Desinstalação do SisCCoH

O programa é instalado a partir de um setup e para instalar no computador, o usuário deve seguir as seguintes etapas:

- 1) Fazer o download na página do departamento de Engenharia Hidráulica e de Recursos Hídricos em <http://www.ehr.ufmg.br/downloads/> ou no site da empresa Pimenta de Ávila Consultoria Ltda no endereço <http://www.pimentadeavila.com.br/SisCCoH/>.
- 2) Salvar o executável em algum diretório e executar o arquivo “*SisCCoH 1.1*” do tipo Pacote do Windows Installer.
- 3) Seguir as etapas de instalação, clicando em *Next* e aguardar a instalação.

Durante a instalação, o setup pode criar, uma pasta chamada *SisCCoH* no diretório selecionado, um atalho na área de trabalho e uma pasta de mesmo nome no Menu Iniciar.

O executável do programa após a instalação pode ser acessado na área de trabalho, no menu iniciar, ou se, durante a instalação o usuário não personalize a pasta de instalação na seguinte pasta: C:\Program Files (x86)\Pimenta de Ávila e EHR\SisCCoH 1.1. Além disso, o programa requer alguns arquivos e dados específicos para os cálculos e se forem excluídos, será notificado ao usuário que determinado arquivo não foi encontrado. Neste caso, recomenda-se a reinstalação do *SisCCoH*.

Para desinstalar o programa, acesse o menu Iniciar, em seguida, painel de Controle. Em Programas, selecione a opção “Desinstalar um programa” e pesquise por *SisCCoH 1.1*, selecione o programa e clique em Desinstalar e em seguida, com o aviso “Tem certeza de que deseja desinstalar *SisCCoH 1.1*?”, clique em sim para confirmar a desinstalação ou em não, caso deseje cancelar. Em seguida uma janela permitindo a solicitação de alteração será exibida na tela e assim será necessária a confirmação. O programa pode também solicitar o fechamento de eventuais arquivos em PDF, para a finalização do processo e solicitar que reinicie a sua máquina para concluir a desinstalação.

1 DESCRIÇÃO GERAL

O programa *SisCCoH* é uma ferramenta computacional que permite o dimensionamento de diversos componentes hidráulicos, tais como: condutos forçados, canais em calha lisa, canais em degraus, canais em enrocamento, curvas em canais, confluência de canais, bacias de dissipação, bueiros, dentre outros.

A versão 1.1 do *SisCCoH* está agrupada nas seguintes tipologias de estruturas hidráulicas: *Condutos Forçados*, *Escoamentos Livres*, *Estruturas Hidráulicas* e *Singularidades*.

Em *Condutos Forçados*, é possível calcular variáveis como velocidade, perda de carga unitária, vazão, velocidade e diâmetro de condutos simples, desde que informado os dados necessários para o programa. Os cálculos para condutos compostos estão em desenvolvimento para lançamento em futuras versões.

No item *Escoamentos Livres*, a versão atual disponibilizou para o usuário os módulos de *Máxima Eficiência* e *Seções Regulares* que calcula parâmetros do escoamento uniforme, crítico, variado e canais em enrocamento.

Em *Estruturas Hidráulicas*, o *SisCCoH* auxilia no dimensionamento de *Bueiros*, *Escoamento em Degraus* e *Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico* e por *Enrocamento*. Quanto ao *Escoamento em Degraus*, o programa apresenta-se como uma importante ferramenta para a caracterização do regime de escoamento em degraus (*Nappe Flow*, em transição ou *Skimming Flow*) além de permitir o cálculo de canais em trechos distintos e de quedas singulares.

E, por fim, em *Singularidades*, o *SisCCoH* auxilia no cálculo de *Confluência de Canais* e dimensionamento de *Curvas em Canais*.

O *SisCCoH* apresenta-se como uma alternativa para cálculos de estruturas hidráulicas, a fim de otimizar etapas de cálculo no dimensionamento de componentes hidráulicos.

Atualmente, o programa *SisCCoH 1.1* possui 14 módulos habilitados para cálculos hidráulicos. Na continuidade do projeto *SisCCoH* pretende-se incorporar mais 15 novos módulos, conforme indicado na Figura 1.1.

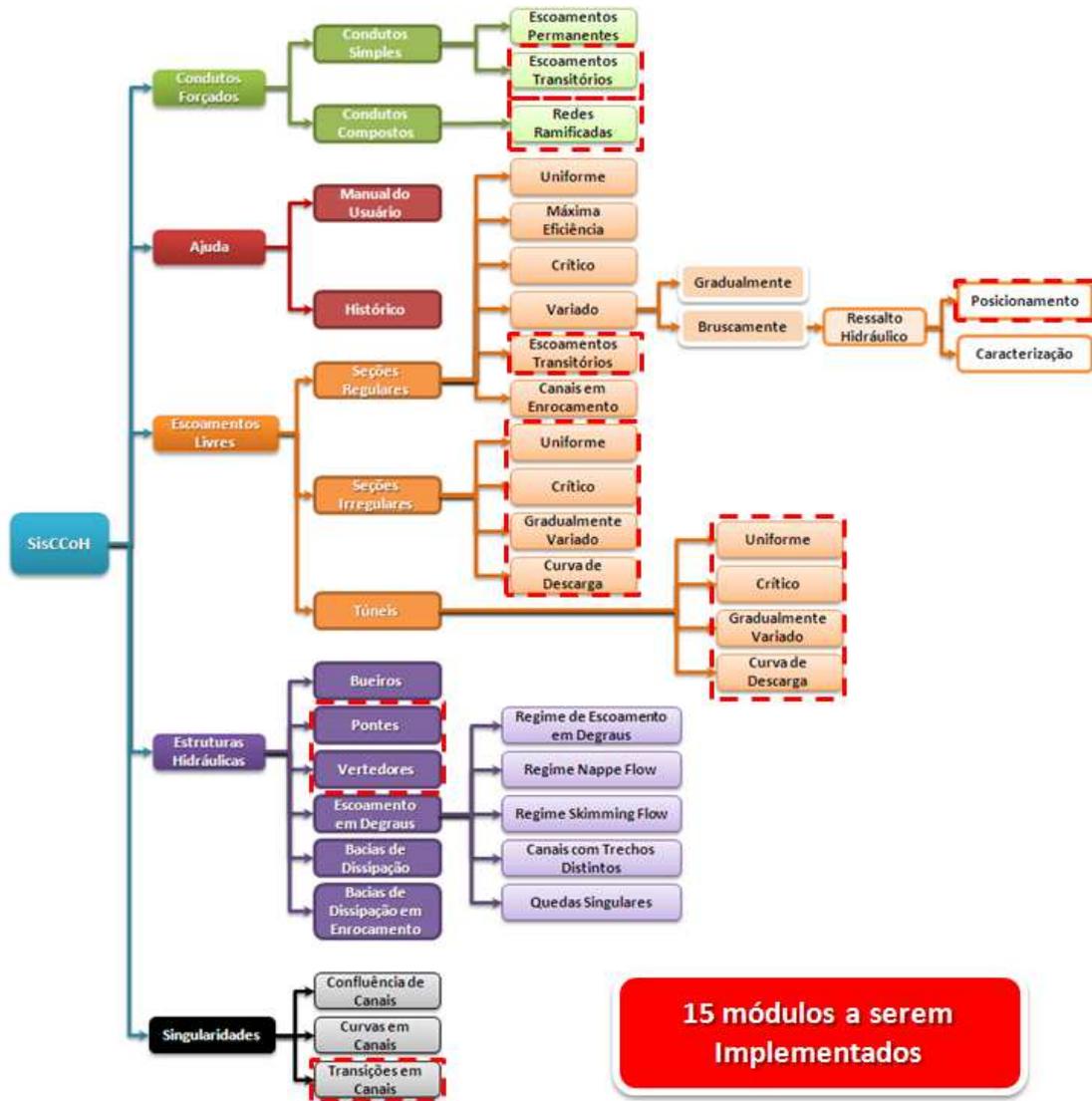


Figura 1.1 - Arquitetura do Programa *SisCCoH*.

Conforme mostrado na Figura 1.1, os módulos habilitados na versão 1.1 são: escoamento permanente de condutos simples; escoamentos livre uniforme, crítico e variado para as seções regulares; seção de máxima eficiência; bueiros; regime de escoamento em degrau, regime Nappe Flow, regime Skimming Flow, canais com trechos distintos; e quedas singulares; bacias de dissipação por ressalto hidráulico e por enrocamento, confluência de canais e curvas em canais. Nos próximos tópicos serão apresentadas as principais funcionalidades dos módulos habilitados na versão 1.1 do software *SisCCoH*.

2 CONDUTOS FORÇADOS

2.1 Condutos Simples

2.1.1 Escoamento permanente

Ao escoar por um conduto, o líquido perde irreversivelmente energia por efeito Joule. A perda de carga pode ser calculada no *SisCCoH* utilizando o método da equação Universal (2.1) ou da equação de *Hazen-Williams* (2.2).

$$\Delta h_{eq\ universal} = \frac{8 \cdot f \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} \cdot L \quad (2.1)$$

$$\Delta h_{Hazen-Williams} = 10,64 \cdot \frac{Q^{1,85}}{C^{1,85} \cdot D^{4,87}} \cdot L \quad (2.2)$$

Em que: Δh : perda de carga ao longo do percurso;
 f : coeficiente de perda de carga da equação universal;
 g : aceleração da gravidade em m/s²;
 Q : a vazão no trecho (m³/s);
 D : diâmetro do conduto (m);
 L : comprimento do trecho (m)

As entradas e as variáveis a serem calculadas estão resumidas na Tabela.2.1.

Tabela.2.1 - Variáveis a serem calculadas e dados necessários.

Variáveis	Equação de Hazen-Williams	Equação Universal
<i>Velocidade e Perda de Carga Unitária</i>	Vazão (m ³ /s); diâmetro (m); Coeficiente de perda de carga C	Vazão (m ³ /s) Diâmetro (m) Aspereza relativa (mm) Viscosidade cinemática (m ² /s).
<i>Diâmetro e Perda de Carga Unitária</i>	Vazão (m ³ /s) Velocidade (m/s) Coeficiente de perda de carga C	Vazão (m ³ /s) Velocidade (m/s) Aspereza relativa (mm) Viscosidade cinemática (m ² /s)
<i>Vazão e Perda de Carga Unitária</i>	Diâmetro (m); velocidade (m/s); Coeficiente de perda de carga C	Diâmetro (m) Velocidade (m/s) Aspereza relativa (mm) Viscosidade cinemática (m ² /s)
<i>Vazão e Velocidade</i>	Diâmetro (m); Perda de carga unitária (m/m) Coeficiente de perda de carga C	Diâmetro (m); Perda de carga unitária (m/m) Aspereza relativa (mm) Viscosidade cinemática (m ² /s)

(Continua...)

(Continuação)

Variáveis	Equação de Hazen-Williams	Equação Universal
<i>Diâmetro e Velocidade</i>	Vazão (m); Perda de carga unitária (m/m) Coeficiente de perda de carga C	Vazão (m); Perda de carga unitária (m/m) Aspereza relativa (mm) Viscosidade cinemática (m ² /s)
<i>Vazão e Diâmetro</i>	Velocidade (m/s) Perda de carga unitária (m/m) Coeficiente de perda de carga C	Velocidade (m/s) Perda de carga unitária (m/m) Aspereza relativa (mm) Viscosidade cinemática (m ² /s)

A seguir é apresentada uma aplicação no *SisCCoH* para o cálculo de um conduto simples.

Exemplo 2.1: Cálculo de Conduto Simples

Uma adutora de 400 mm diâmetro e de 1 km de extensão fornece uma vazão de 100 l/s por meio de uma tubulação de concreto. Determine a velocidade e a perda de carga.

Acessando o menu *Condutos Forçados*, seguido por *Condutos Simples* e *Escoamentos Permanentes* pode-se digitar os dados. Os itens marcados com interrogação apresentam dicas para o cálculo.

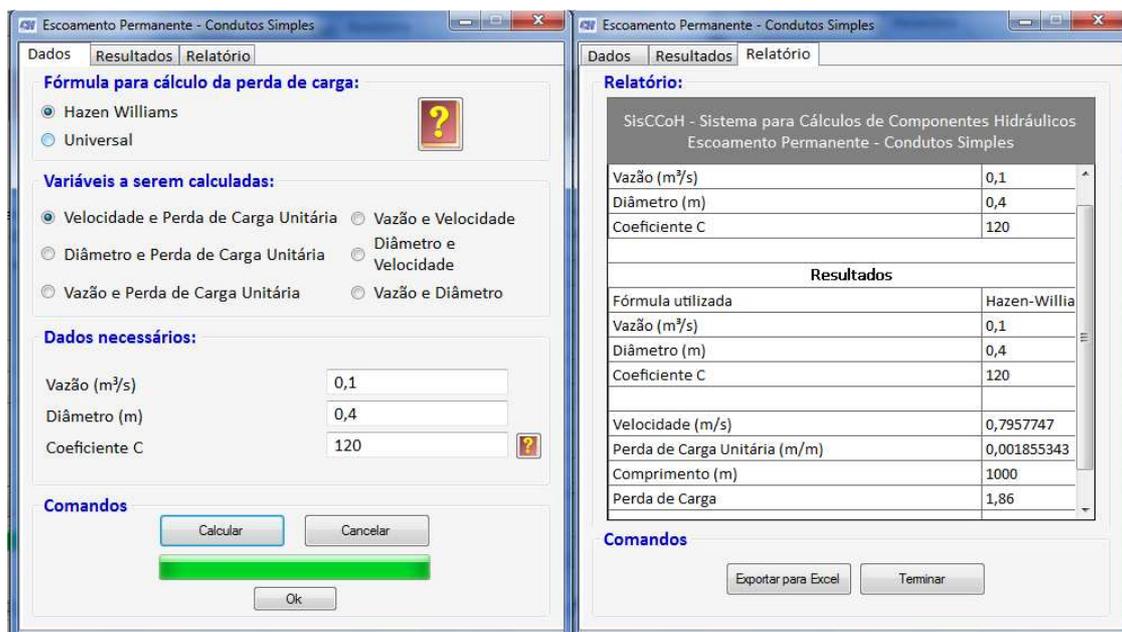


Figura 2.1 - Conduto Forçado Simples em regime de escoamento permanente.

A figura anterior mostra a entrada de dados no programa. É possível selecionar as opções desejadas, digitar os valores dos dados e, em seguida, calcular as variáveis desejadas. Na aba *Resultados* são exibidos alguns dos resultados e o *Software* permite informar o comprimento do trecho para cálculo da perda de carga total que é exibido no canto inferior direito.

O relatório, apresentado a direita na Figura 2.1, exibe os resultados e uma opção para a exportação para o Excel. Para concluir, basta clicar em *Terminar* e então o programa exibirá a tela principal que contém os menus principais.

3 ESCOAMENTOS LIVRES

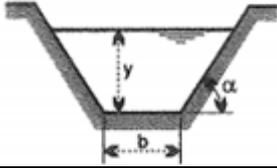
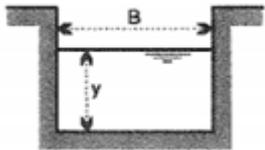
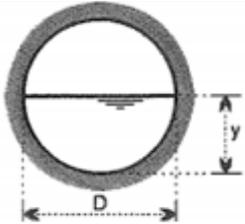
3.1 Máxima eficiência

A janela *Máxima Eficiência* permite a definição de uma seção ótima para canais, a fim de transportar a vazão de projeto. Uma vez definidas a rugosidade e a declividade média do canal, o cálculo da máxima eficiência considera a redução de custos de implantação pela minimização da área a ser revestida e do volume a ser escavado de material para transporte de uma vazão máxima.

É possível calcular a geometria para seções retangulares, triangulares, trapezoidais ou circulares. O *SisCCoH* utiliza a fórmula de Manning. A vazão máxima é obtida quando o perímetro molhado é mínimo, mantendo-se os valores da área, do coeficiente de Manning e da inclinação inalterados.

Foram utilizadas as relações apresentadas na Tabela 3.1 nas rotinas de cálculo do *SisCCoH*.

Tabela 3.1 - Geometria, profundidade normal e área de seções típicas regulares.
Adaptado de Baptista e Lara (2012).

Seção	Geometria ótima	Profundidade Normal (y)	Área(A)
	$\alpha = 60^\circ$ $b = \frac{2}{\sqrt{3}} y$	$0,968 \left[\frac{Qn}{I^{1/2}} \right]^{3/8}$	$1,622 \left[\frac{Qn}{I^{1/2}} \right]^{3/4}$
	$B = 2 y$	$0,917 \left[\frac{Qn}{I^{1/2}} \right]^{3/8}$	$1,682 \left[\frac{Qn}{I^{1/2}} \right]^{3/4}$
	$\alpha = 45^\circ$	$1,297 \left[\frac{Qn}{I^{1/2}} \right]^{3/8}$	$1,682 \left[\frac{Qn}{I^{1/2}} \right]^{3/4}$
	$D = 2 y$	$1,00 \left[\frac{Qn}{I^{1/2}} \right]^{3/8}$	$1,583 \left[\frac{Qn}{I^{1/2}} \right]^{3/4}$

A Tabela 3.1 apresenta os aspectos da geometria para cada tipo de seção, além da profundidade normal e a área para uma verificação preliminar. Naturalmente, algumas condições de contorno como localização e elementos do projeto podem inviabilizar a sua aplicação prática.

A seguir é apresentado um exemplo com o tipo de seção circular.

Exemplo 3.1: Cálculo de seção triangular em condição de máxima eficiência

Determine os parâmetros hidráulicos de uma seção circular, na condição de máxima eficiência, em que a vazão é $5 \text{ m}^3/\text{s}$, a declividade longitudinal igual a $0,005 \text{ m/m}$ e a seção é revestida com concreto pré-moldado.

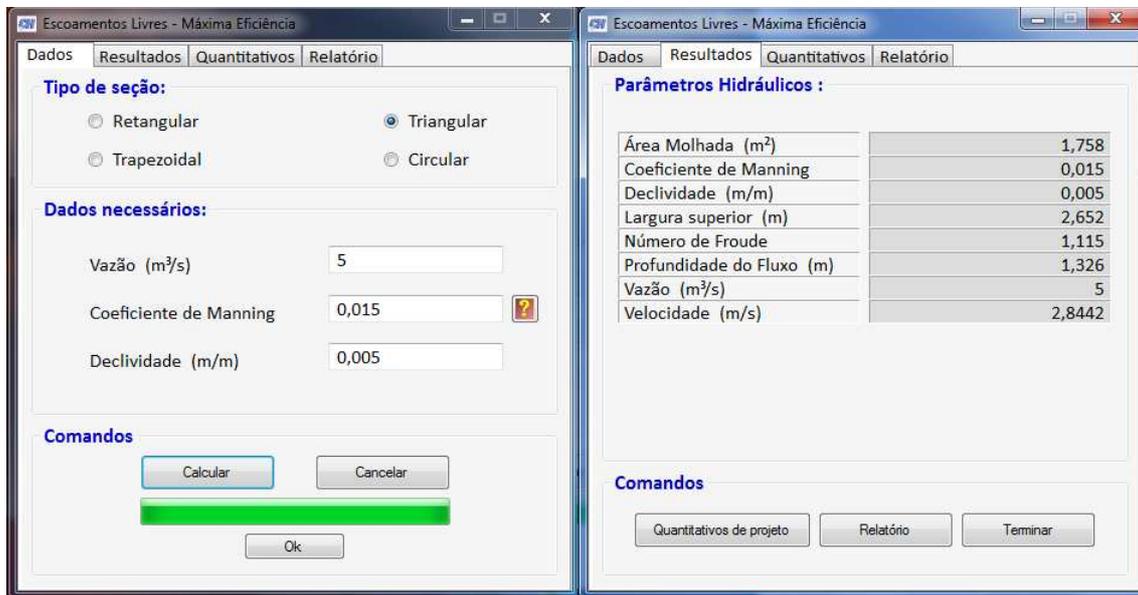


Figura 3.1 - *Dados e Resultados* para condição de Máxima Eficiência

Acessando o menu *Escoamentos Livres* e em seguida *Máxima Eficiência*, foi calculado os parâmetros hidráulicos da seção triangular. A esquerda é exibida a aba da entrada de dados e a direita a dos resultados. O *SisCCoH* calcula apenas quantitativos de projetos para seções retangulares, trapezoidais e triangulares. A Figura 3.2 exhibe os dados de quantitativos de projeto e o Relatório que resume os dados de entrada, resultados e os quantitativos de projeto.

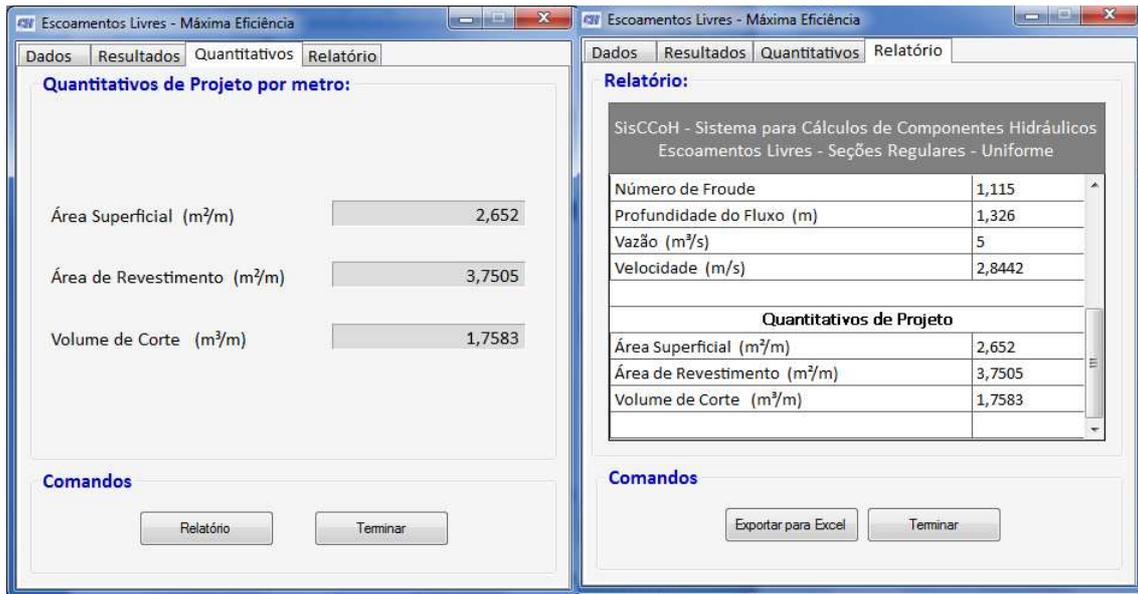


Figura 3.2 - *Quantitativos e Relatório* para condição de *Máxima Eficiência*

A área superficial calculada foi a interna equivalente a largura superficial em (m^2/m), a área do revestimento foi considerada igual ao perímetro molhado (m^2/m), desconsiderando a borda livre. E o volume de corte considerou a área molhada da seção (m^3/m) sem considerar a espessura do revestimento, nem eventual corte a ser efetuado, como, por exemplo, aquele a ser executado por limitação do ângulo da lâmina da escavadeira durante o corte ou de áreas extras necessárias para a execução da fôrma.

3.2 Seções Regulares

3.2.1 Uniforme

No escoamento uniforme as velocidades e a profundidade se mantêm ao longo do canal e são retilíneas e paralelas ao fundo.

A janela *Seções Regulares* pode ser acessada no menu *Escoamentos Livres*, *Seções Regulares* e em seguida em *Uniforme*. Neste módulo, seleciona-se a variável desejada (profundidade, a rugosidade de Manning, a vazão ou a declividade) utilizando-se outros dados para o regime de escoamento uniforme.

Ao acessar o módulo, na aba *Dados* será requisitado o tipo de seção e a variável a ser calculada. Caso seja dada a relação máxima Y/D da seção, opcionalmente, pode ser digitada o valor da relação selecionando o campo na região *Parâmetro opcional para seção circular*, depois de selecionada a geometria do tipo circular na região *Tipo de seção*.

Para cada formato geométrico da seção (retangular, triangular, trapezoidal ou retangular) e cada variável a ser calculada, diferentes dados são requeridos. A Tabela 3.2 indica os elementos necessários para cada situação:

Tabela 3.2 - Dados necessários

Variáveis	Seção Retangular	Seção Triangular	Seção Trapezoidal	Seção Circular
Profundidade (m)	Vazão Coeficiente de Manning; Declividade; Largura.	Vazão; Coeficiente de Manning; Declividade; Inclinação lateral.	Vazão; Coeficiente de Manning; Declividade; Largura inferior; Inclinação Lateral.	Vazão; Diâmetro; Aspereza relativa; Viscosidade cinemática.
Coeficiente de Manning	Vazão; Profundidade; Declividade; Largura.	Vazão; Profundidade; Declividade; Inclinação lateral.	Vazão; Profundidade; Declividade; Largura inferior; Inclinação lateral.	Vazão; Diâmetro; Profundidade; Declividade.
Vazão (m ³ /s)	Profundidade; Coeficiente de Manning; Declividade; Largura.	Profundidade; Coeficiente de Manning; Declividade; Inclinação lateral.	Profundidade; Coeficiente de Manning; Declividade; Largura inferior; Inclinação lateral.	Profundidade; Diâmetro; Coeficiente de Manning; Declividade.
Declividade (m/m)	Vazão; Profundidade; Coeficiente de Manning; Largura.	Vazão; Profundidade; Coeficiente de Manning; Inclinação lateral.	Vazão; Profundidade; Coeficiente de Manning; Largura inferior; Inclinação lateral.	Vazão; Diâmetro; Profundidade; Coeficiente de Manning.

O *SisCCoH* calcula a área molhada, a largura superior, o perímetro molhado, o raio hidráulico, a vazão (utilizando a fórmula de Manning, apresentada na equação (3.1), a profundidade hidráulica (razão entre área molhada e largura superior), a velocidade, pela equação da continuidade, e o número de Froude (*Fr*). A equação da continuidade é apresentada na equação (3.2) e a do número de Froude na (3.3).

$$Q = \frac{1}{n} AR_h^{2/3} \sqrt{I} \quad (3.1)$$

$$Q = U \cdot A \quad (3.2)$$

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g \cdot A}} \quad (3.3)$$

Em que: U : velocidade (m/s);
 Q : a vazão (m³/s);
 A : área da seção (m);
 Fr : número de Froude
 g : aceleração da gravidade (m/s²)

Ressalta-se que o método numérico utilizado para a solução da equação de Manning para cálculo da profundidade de escoamento é o de Newton- Raphson.

As abas *Resultados* e *Relatórios* apresentam os valores calculados. Assim, como em outros módulos, o relatório pode ser exportado para o Excel. Os valores de Froude menores que 1 indicam o regime de escoamento subcrítico; os iguais a 1, o regime de escoamento crítico; e os maiores que 1, o escoamento supercrítico.

Exemplo 3.2: Cálculo de seção retangular em escoamento livre uniforme

Dado um canal retangular com revestimento em concreto que possui declividade de 0,06%, largura de 1 metro e profundidade da linha de água igual a 5 m, calcule a vazão, a velocidade e o número de Froude, assumindo uma borda livre de 20%.

Acessando a opção *Escoamento Livre* e preenchendo as variáveis de entrada na aba *Dados* pode-se calcular os parâmetros hidráulicos. A Figura 3.3 apresenta os dados de entrada e os resultados obtidos pelo *SisCCoH*:

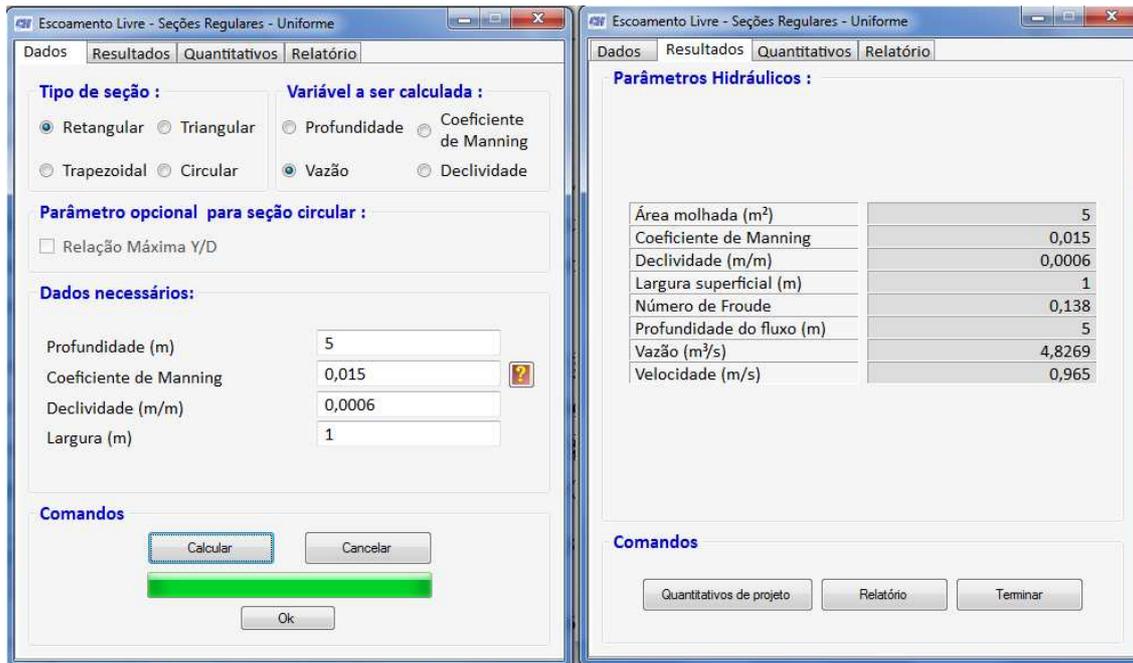


Figura 3.3 – *Dados e Resultados* de escoamento permanente livre uniforme

Outra utilidade do *SisCCoH* é o cálculo de quantitativos. Em *Quantitativos*, exibido na Figura 3.4, o usuário pode informar a borda livre utilizada e o programa calcula, por metro longitudinal de canal, a profundidade interna, a área superficial e o volume de corte.

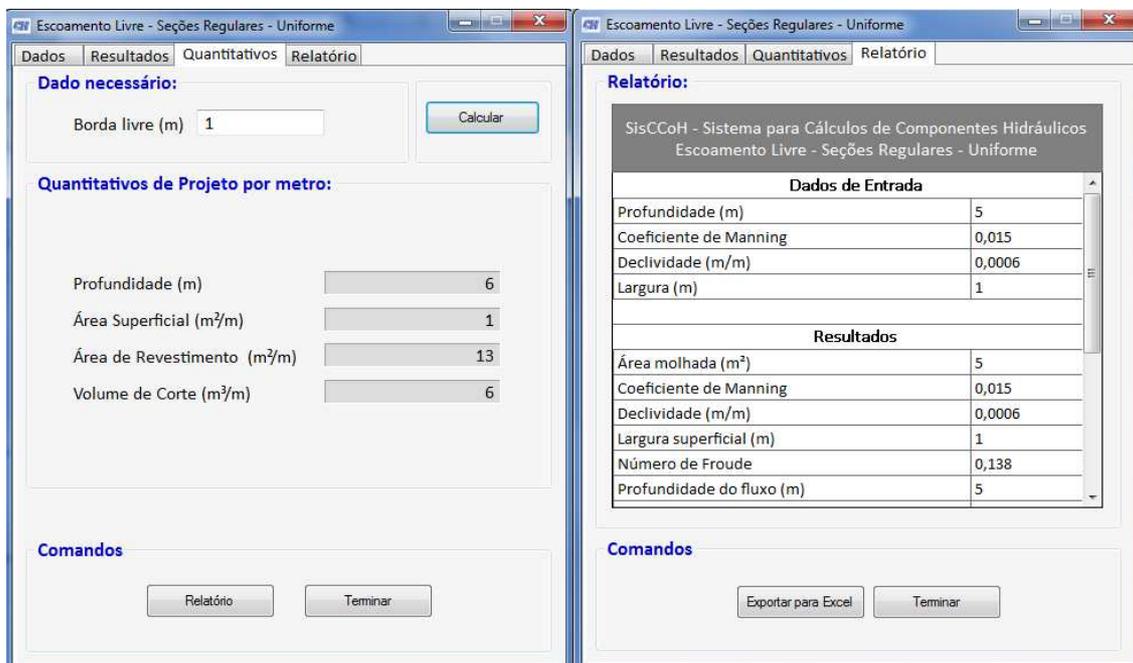


Figura 3.4 - *Quantitativos e Relatório* de seção retangular sob regime de escoamento permanente livre uniforme

Em uma abordagem mais simplificada, os resultados dos quantitativos não consideram a espessura do revestimento, bem como no volume de corte, a área lateral necessária de corte para execução dos trabalhos de compactação, preparo do terreno, posicionamento das formas (quando utilizado o revestimento de concreto) e a espessura do revestimento.

3.2.2 Crítico

O escoamento crítico é aquele que possui o número de Froude igual a 1 e a energia crítica (E_c) pode ser calculada pela equação (3.4):

$$E_c = \frac{3}{2} y_c \quad (3.4)$$

Em que: E_c : Energia crítica (m);

y_c : Profundidade crítica (m);

No aplicativo, essa opção pode ser acessada no menu *Escoamentos Livres, Seções Regulares, Crítico*. A interface solicita o tipo de seção e possibilita o cálculo da profundidade ou da vazão. Em seguida, o usuário deve informar os dados da geometria e uma das variáveis, profundidade ou vazão.

Para as seções retangulares, obtém-se a profundidade crítica (y_c), pela equação 3.4, a área molhada, a velocidade – pela equação (3.2) – a profundidade crítica (y_c), calculada pela equação (3.5), o número Froude da equação (3.3) e Energia Crítica (E_c), calculada pela equação (3.6):

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g \cdot B^2}} \quad (3.5)$$

$$E_c = y_c + \frac{U^2}{2 \cdot g} \quad (3.6)$$

Em que: y_c : Profundidade crítica (m);

B é a largura superficial (m);

E_c : Energia crítica (m);

Para as seções triangulares incorpora-se a variável inclinação lateral, e a profundidade crítica é calculada pela equação (3.7):

$$y_c = \sqrt[5]{\frac{2 \cdot Q^2}{g \cdot z^2}} \quad (3.7)$$

Em que: z : a inclinação lateral

Os cálculos para outras seções são análogos ao cálculo da profundidade crítica, mantendo-se a relação da equação 3.7 a seguir.

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{A^3}{B} \quad (3.8)$$

Após clicar em OK na interface, os resultados são apresentados na Aba *Resultados* e o programa fica à disposição, caso o usuário queira imprimir o relatório ou terminar.

Exemplo 3.3: Cálculo da profundidade crítica em escoamento livre permanente crítico.

Dado um canal trapezoidal com inclinações laterais de 1:1 e largura inferior unitária calcule a profundidade crítica quando a vazão é de 14 m/s.

Após a seleção do tipo de seção, escolhendo-se a variável profundidade e informados os dados necessários, é possível obter os parâmetros hidráulicos desejados, conforme exibido na Figura 3.5:

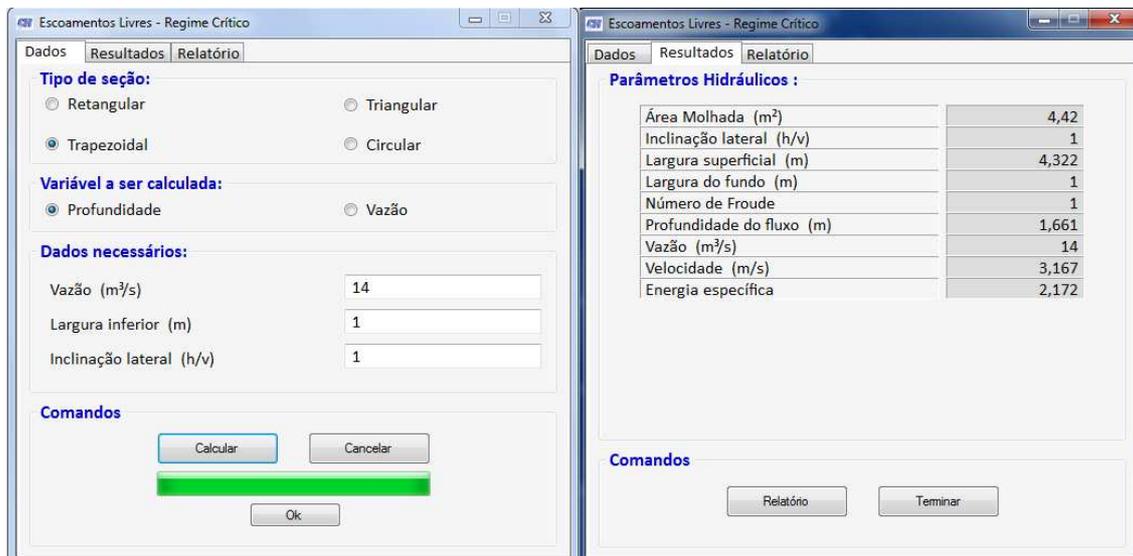


Figura 3.5 - *Dados e Resultados* do Regime Crítico

Logo, conforme apresentado a direita na aba *Resultados* da Figura 3.5, a profundidade crítica calculada foi de 1,661m. Verifica-se, também, que o *SisCCoH*

calcula outros parâmetros hidráulicos como área molhada, número de Froude, velocidade e energia específica.

3.2.3 Variado

3.2.3.1 Gradualmente

Um escoamento gradualmente variado é aquele que apresenta variação das características do fluxo no espaço de forma gradual e a inclinação do canal e da superfície livre diferem entre si. Este tipo de escoamento geralmente ocorre em trechos de transições verticais e horizontais e/ou quando a declividade não permanece constante.

As hipóteses para o cálculo da equação diferencial do escoamento gradualmente variado consideram a geometria prismática, a distribuição constante da velocidade e a pressão hidrostática ao longo da seção. As equações diferenciais relevantes para o cálculo, assumindo essas hipóteses, são as de variação da energia específica ao longo do canal, e da altura pelas equações (3.9) e (3.10), respectivamente, e a variação da altura da linha d'água ao longo do canal (3.11).

$$\frac{dE}{dx} = I - J \quad (3.9)$$

$$\frac{dE}{dy} = 1 - Fr^2 \quad (3.10)$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{I - J}{1 - Fr^2} \quad (3.11)$$

Em que: I é a declividade do fundo do canal em m/m;

J é a declividade da energia total em m/m.

Para a resolução do escoamento gradualmente variado, o *SisCCoH* utiliza os métodos numéricos de Newton-Raphson e da Bissecção. Primeiramente, o programa itera até 5000 vezes, possuindo como critério de parada a precisão de 10^{-6} , utilizando uma vazão de teste para verificar se a precisão foi alcançada. Se a diferença entre uma vazão e a de teste for superior a 0,01 é aplicado o método da Bissecção.

O método de Newton-Raphson, quando converge, é mais rápido que o método da Bissecção para encontrar as raízes, no entanto, ele nem sempre converge e requer o cálculo da derivada da função. Por outro lado, o método da bissecção possui uma

convergência mais lenta, mas encontra pelo menos uma raiz, desde que ela exista dentro do intervalo considerado. A associação dos dois métodos foi utilizada no programa *SisCCoH*.

Dada uma vazão de escoamento, a rugosidade de Manning, a largura, a profundidade inicial, e o intervalo de cálculo em função da variação da profundidade, é possível calcular as coordenadas e exibir o perfil da linha d'água no programa. Para uma maior precisão, recomenda-se utilizar o intervalo igual a 0,01.

O *software* verifica a declividade, se ela é inferior, igual ou superior à declividade crítica para definir o tipo da linha d'água. É considerado no *SisCCoH* os canais com: declividade fraca, quando a declividade do canal é menor que a crítica; declividade crítica, quando as declividades do canal e crítica são iguais; e a declividade forte, quando a declividade do fundo do canal é maior que a crítica.

Os parâmetros de entrada são processados pelo programa e, inicialmente, é verificado se um ou mais dados são menores ou iguais a zero. Se verificado, a seguinte mensagem é exibida para o usuário: "Dados incompatíveis para a resolução do problema!" e "Entrada incompleta de dados!".

A Tabela 3.3 indica os nomes das curvas comparando-se a profundidade normal (y_n), a crítica (y_c) e a da linha d'água (y_i).

Tabela 3.3 - Tabela comparativa das curvas

Comparação y_n e y_c	Tipo de declividade	Comparação Y_i e Y_n	Tipo de curva
$y_n > y_c$	Declividade Fraca	$y_i > y_n$	M1
		$y_i > y_c$ e $y_i < y_n$	M2
		$y_i < y_c$	M3
$y_n = y_c$	Declividade Crítica	$y_i > y_c$	C1
		$y_i < y_c$	C3
		$y_i > y_c$	S1
$y_n < y_c$	Declividade Forte	$y_i < y_c$ e $y_i > y_n$	S2
		$y_i < y_c$	S3

O exemplo 3.4 apresenta uma aplicação do escoamento gradualmente variado.

Exemplo 3.4 Cálculo da linha d'água em escoamento gradualmente variado

Considerando uma descarga de 8 m³/s, coeficiente de Manning igual a 0,013, declividade de 1%, largura e profundidade inicial no canal igual a 1 m e intervalo de cálculo de 0,1 m, calcule e mostre a linha d'água.

Acessando o menu *Escoamentos Livres, Seções Regulares, Variado* e é possível abrir a janela para cálculo no *SisCCoH*. A Figura 3.6 e a Figura 3.7 mostram os resultados de alguns pontos do eixo x (considerando o intervalo de 0,1 m na profundidade do perfil da linha d'água) e o perfil da linha d'água.

The image displays two screenshots of the SisCCoH software interface. The left window, titled 'Seções Regulares - Variado - Gradualmente', shows the 'Dados' (Data) tab. It includes a 'Tipo de seção' (Section Type) section with radio buttons for Retangular (selected), Triangular, Trapezoidal, and Circular. Below this is the 'Dados necessários' (Required Data) section with input fields for Vazão (m³/s) set to 8, Coeficiente de Manning set to 0,013, Declividade (m/m) set to 0,01, Largura (m) set to 1, Profundidade Inicial (m) set to 1, and Intervalo de Cálculo - ΔY (m) set to 0,1. At the bottom are 'Comandos' (Commands) buttons: Calcular, Cancelar, and Ok.

The right window, also titled 'Seções Regulares - Variado - Gradualmente', shows the 'Resultados' (Results) tab. It features a table with the following data:

Distância (m)	Profundidade (m)	Velocidade (m/s)	Froude
0	1	8	2,554
14,761	1,1	7,273	2,214
28,908	1,2	6,667	1,943
42,474	1,3	6,154	1,723
55,463	1,4	5,714	1,542
67,845	1,5	5,333	1,39
79,517	1,6	5	1,262
90,22	1,7	4,706	1,152
99,191	1,8	4,444	1,058
102,575	1,86855	4,281	1

Below the table are 'Comandos' (Commands) buttons: Visualizar, Relatório, and Terminar.

Figura 3.6 - *Dados e Resultados* em Escoamento Gradualmente Variado.

A Figura 3.7 exibe o perfil da linha d'água calculado com o intervalo da profundidade de 0,1 m e o relatório final.

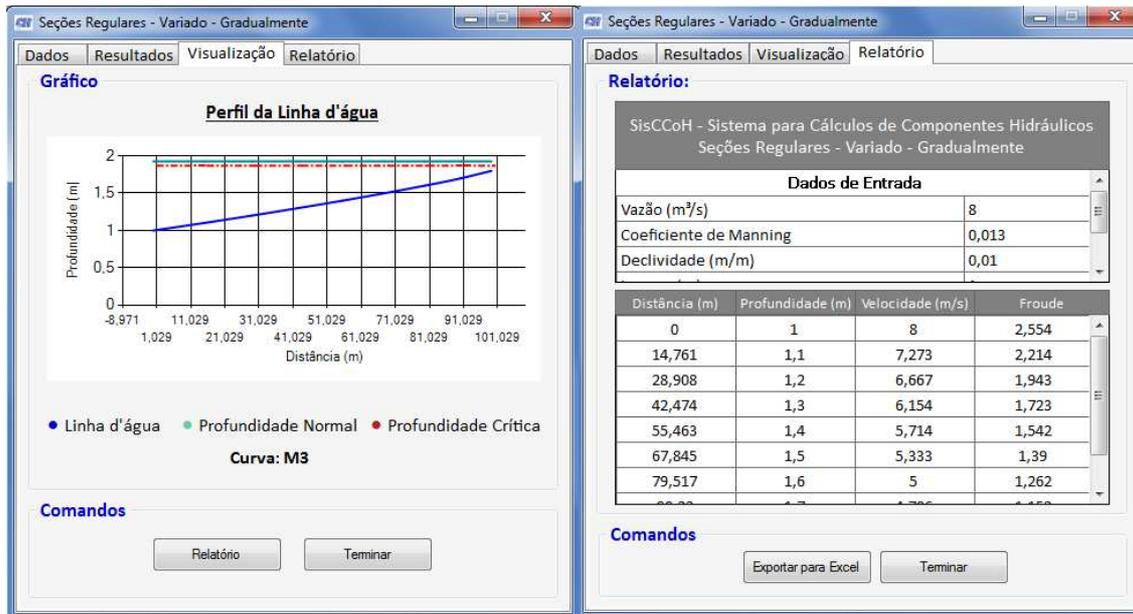


Figura 3.7 - Visualização do Perfil da linha d'água e relatório

Verifica-se no *SisCCoH* a exibição da linha d'água em azul, da profundidade crítica em vermelho e da profundidade normal em verde. Abaixo do perfil da linha d'água o programa também indica o tipo de curva, que foi classificada como a curva M3 neste exemplo.

3.2.3.2 Bruscamente

O escoamento bruscamente variado é caracterizado pela mudança rápida do regime de escoamento entre duas seções de controle. Neste tipo de escoamento não é válida a hipótese da distribuição hidrostática de pressões e as diferenças de velocidades implicam em variações significativas dos coeficientes de Coriolis (α) e de Boussinesq (β). O escoamento é mais influenciado pelas condições de contorno, como a geometria do canal, do que a rugosidade do canal. Neste tipo de escoamento, verifica-se a formação de vórtices, correntes secundárias e zonas de estagnação.

O ressalto hidráulico, um exemplo de escoamento bruscamente variado, corresponde a transição do regime torrencial ao fluvial em uma certa distância horizontal e pode ser calculado e classificado pelo *SisCCoH*. Outras estruturas hidráulicas como escoamento em degraus, canais em transição são também dimensionados pelo *SisCCoH*, mas foram abordadas pelo *software* nos menus de *estruturas hidráulicas e singularidades*.

O dimensionamento do ressalto pode ser acessado pelo seguinte caminho: *Escoamentos Livres; Seções Regulares; Bruscamente; Ressalto Hidráulico*; e, por fim, *Caracterização*. Na aba *Dados* devem ser preenchidos os parâmetros de entrada e, em seguida, deve-se selecionar a profundidade conjugada, a qual se deseja calcular (a montante ou a jusante). Os resultados fornecidos são a profundidade conjugada desejada, a perda de carga, o comprimento do ressalto, a profundidade crítica, as velocidades e o número de Froude nas seções conjugadas.

A área a montante do ressalto é calculada utilizando a profundidade a montante, e outros dados de acordo com o tipo da seção. A velocidade a montante e o número de Froude são calculados pelas equações (3.2) e (3.3), respectivamente. Após calcular o número de Froude o *SisCCoH* apresenta a classificação do ressalto de acordo com o valor do Froude a montante, conforme apresentado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Classificação do Ressalto Hidráulico

Froude a montante	Classificação
$1,2 \leq Fr_1 < 1,7$	Falso Ressalto (onduloso)
$1,7 \leq Fr_1 < 2,5$	Pré-ressalto
$2,5 \leq Fr_1 < 4,5$	Ressalto Oscilante (fraco)
$4,5 \leq Fr_1 < 10$	Ressalto Verdadeiro (estacionário)
$1,7 \leq Fr_1 < 2,5$	Grande Turbulência (forte)

Para a seção retangular, quando informada a profundidade a jusante pelo usuário, ela é utilizada para calcular a área do ressalto. A velocidade, o número de Froude e a profundidade crítica são calculados por equações apresentadas anteriormente.

A profundidade conjugada é calculada pela equação (3.12):

$$y_2 = \frac{y_1}{2} (\sqrt{(1 + 8 Fr^2)} - 1) \quad (3.12)$$

Em que: y_2 : profundidade conjugada a jusante (m);
 y_1 : profundidade conjugada a montante (m);

O comprimento do ressalto para as seções retangulares com declividade nula é calculado pela equação (3.13)(3.13).

$$Lr = 6.9 (y_2 - y_1) \quad (3.13)$$

Em que: Lr : comprimento do ressalto.

A perda de carga é calculada em função das profundidades conjugadas através da equação (3.14), válida para todas as geometrias de seções:

$$\Delta h = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4 y_1 y_2} \quad (3.14)$$

Para o caso da seção retangular com fundo inclinado, no cálculo da profundidade conjugada foi utilizada a razão entre profundidade a jusante e a montante e comparadas com o valor do Froude a montante, utilizando o ábaco de profundidades conjugadas em ressalto em canais inclinados (Figura 3.8), proposto por Chow (1959), em seus estudos sobre ressalto hidráulico e dissipação de energia.

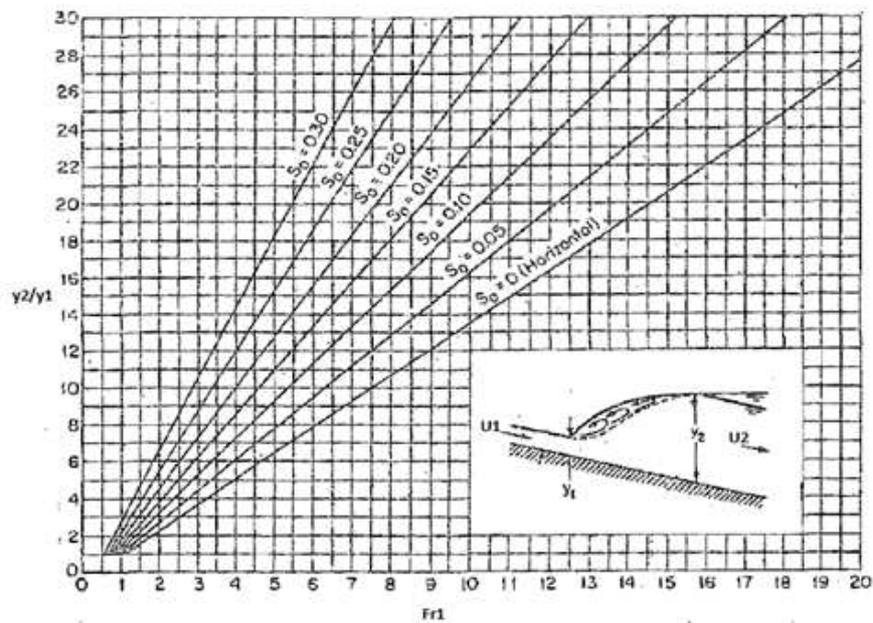


Figura 3.8 - Profundidade conjugada do ressalto hidráulico em canais inclinados.

No *SisCCoH*, a profundidade é calculada para inclinações entre zero e 10%. O ábaco fornece curvas parametrizadas a cada 5%, e para valores intermediários, eles são interpolados com o valor da declividade indicada e as discretizadas. Já para o cálculo do comprimento do ressalto em canais inclinados é utilizado o ábaco apresentado na Figura 3.9, também desenvolvido por Chow (1959).

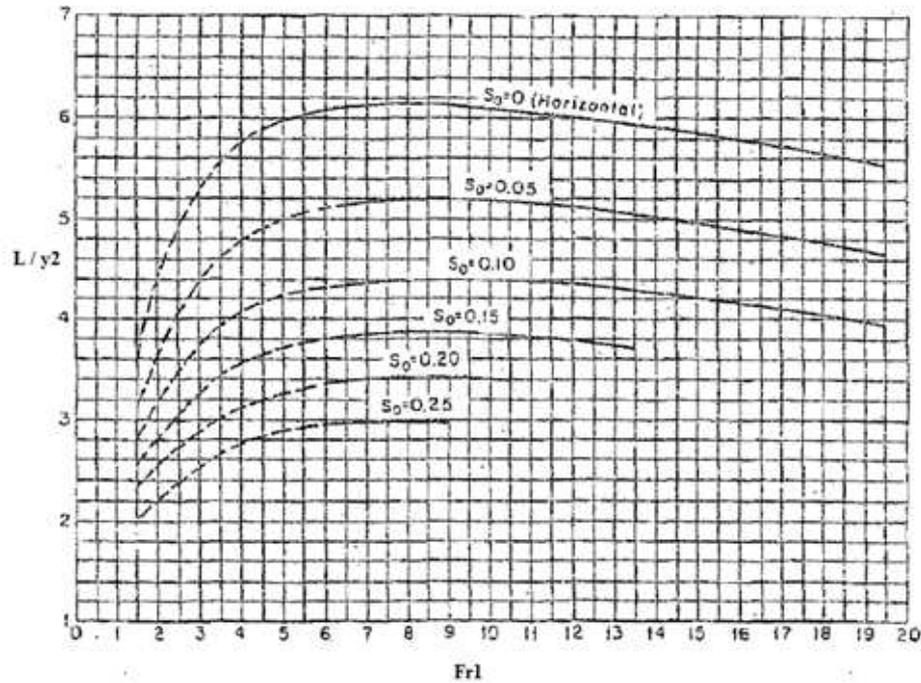


Figura 3.9 - Comprimento dos ressaltos em canais inclinados.

No caso da seção trapezoidal e triangular, são calculados a área da seção à montante de teste e outros parâmetros de teste como a velocidade, o número de Froude a montante, assumindo a seção como aproximadamente horizontal e retangular. A profundidade conjugada de teste ($y_{2,\text{teste}}$) é calculada conforme a equação (3.12):

A profundidade conjugada de teste é utilizada para determinar o valor final do intervalo para cálculo das raízes considerando a seção retangular. O intervalo considerado para cálculo das raízes foi de $y_1+0,1$ e $3y_{2,\text{teste}}$. Adotando um valor inicial igual a 10^{-6} , valor final de 99,9% da altura conjugada a jusante e, considerando uma precisão de 10^{-5} , o *software* calcula raízes para a profundidade conjugada real utilizando a combinação dos métodos de Newton-Raphson e Bisseção com máximo de 100 iterações. Nesse cálculo é considerado o tipo da seção trapezoidal, a inclinação das paredes do canal, a base inferior e uma equação auxiliar (Eq) em que utiliza a altura acima do centro de gravidade da seção (h_o), utilizando a vazão e a área da seção a montante. Essa equação é apresentada na equação (3.15):

$$\text{Eq} = \frac{Q^2}{gA} + A h_o \quad (3.15)$$

Em que: Eq: equação auxiliar

ho: altura acima do centro de gravidade (m);

Para o caso da seção circular, o *SisCCoH* utiliza as seguintes equações simplificadas por French *apud* Baptista & Lara (2012) para o cálculo do número de Froude, profundidade conjugada e profundidade crítica:

$$Fr_1 = \left(\frac{y_c}{y_1} \right)^{1,93} \quad (3.16)$$

$$y_2 = \frac{y_c^2}{y_1} \quad , \text{ para } Fr < 1,7 \quad (3.17)$$

$$y_2 = \frac{y_c^{1,8}}{y_1^{0,73}} \quad , \text{ para } Fr \geq 1,7 \quad (3.18)$$

$$y_c = \frac{1,01}{D^{0,264}} \left(\frac{Q\sqrt{\alpha}}{\sqrt{g}} \right)^{0,506} \quad (3.19)$$

Em que: α : Coeficiente de *Coriolis*

As equações (3.17) e (3.18) diferem quanto sua aplicação, sendo válidas para faixas de diferentes valores do número de Froude, indicados acima. Além disso, para o cálculo da profundidade crítica, a equação (3.19) é válida para a relação $0,2 < y/D < 0,85$.

O comprimento do ressalto para seções não retangulares e não inclinados é considerado, para fins práticos, equivalente ao de seções retangulares, apresentado anteriormente na equação (3.13).

As notificações do *SisCCoH* são relacionadas a entrada de dados inadequada, posições relativas da altura do perfil da linha d'água em relação ao diâmetro do canal, considerações sobre valores de entrada e as hipóteses assumidas. Essas notificações são descritas a seguir:

- "Entrada incompleta de dados!": ocorre quando o usuário não preencheu todos os dados de entrada necessários para o cálculo;
- "Dados incompatíveis para a resolução do problema!": se pelo menos um dos valores de vazão, largura, profundidade conjugada (montante ou a jusante) for digitado com um valor menor ou igual a zero; e se, após o cálculo do ressalto, o comprimento calculado pelo programa for menor ou igual a zero;
- "O cálculo é válido para a faixa de Fr_1 entre 1.5 e 15.3!" Neste caso, a mensagem é exibida para o usuário quando a declividade do canal é maior que 0,05 m/m, dada a leitura do ábaco de ressalto em seções inclinadas;

- "O cálculo é válido para a faixa de Fr_1 entre 1.5 e 18!". Essa mensagem é exibida caso o usuário informe uma declividade menor que 0,05 m/m, para seções inclinadas, conforme apresentado no ábaco de Chow (1959);
- "O cálculo é válido para a faixa de y_1/D entre 0.02 e 0.85!". Informa ao usuário o intervalo da razão entre a profundidade normal e o diâmetro do canal circular;
- "Declividade deve ser menor que 10%." O *SisCCoH* considera declividades menores que 0,1 m/m, a fim de considerar uma distribuição hidrostática de pressões;
- "Não foi possível completar o cálculo solicitado, uma vez que a profundidade a montante (y_1) é maior que a profundidade crítica (y_c), impedindo assim, a formação do ressalto hidráulico." Em tal caso, o escoamento é subcrítico e não há transição do regime fluvial para torrencial que possibilite a formação do ressalto;
- "Não foi possível completar o cálculo solicitado, uma vez que a profundidade a montante (y_1) é maior que o diâmetro(D)". Nesta situação, a seção funciona como orifício e deve ser calculada no módulo de bueiros em estruturas hidráulicas;
- "Não foi possível completar o cálculo solicitado, uma vez que a profundidade a jusante (y_2) é maior que o diâmetro (D)" Neste caso, indica ao usuário que o canal funciona parcialmente como conduto livre, mas ao longo do sentido de formação do ressalto, a sua altura dentro do canal fica limitado ao diâmetro do canal;
- "Não foi possível completar o cálculo solicitado, uma vez que a profundidade a jusante (y_2) é menor que a profundidade crítica (y_c), impedindo assim, a formação do ressalto hidráulico";
- "Assegure-se que a profundidade inicial permite a definição de uma curva de remanso." Essa mensagem indica que a profundidade normal é menor ou igual a crítica.

Exemplo 3.4: Caracterização do ressalto hidráulico

Dada uma vazão de $3\text{m}^3/\text{s}$, um canal retangular de largura unitária e declividade do canal igual a 1% com profundidade a montante de 0,25, calcule a profundidade a jusante, a perda de carga, a profundidade crítica, e, para as seções conjugadas, as velocidades e o número de Froude.

A Figura 3.10 mostra a entrada de dados para a resolução deste cálculo e os resultados obtidos pelo programa:

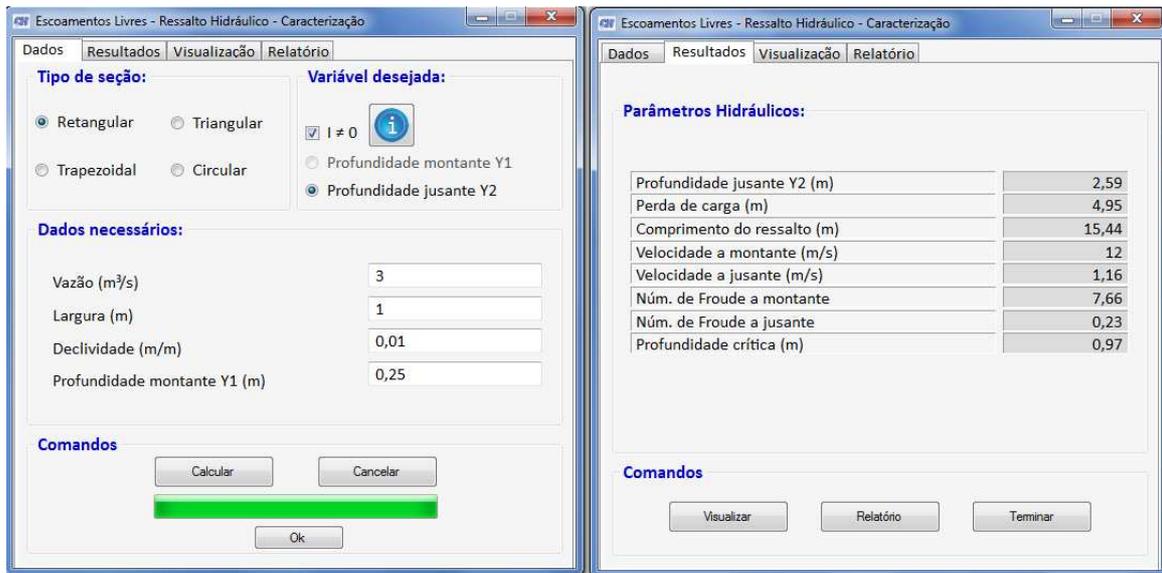


Figura 3.10 - *Dados e Resultados* do ressalto hidráulico

A Figura 3.11 ilustra um esquema com as variáveis calculadas e a aba com o relatório resumo dos dados de entrada e resultados.

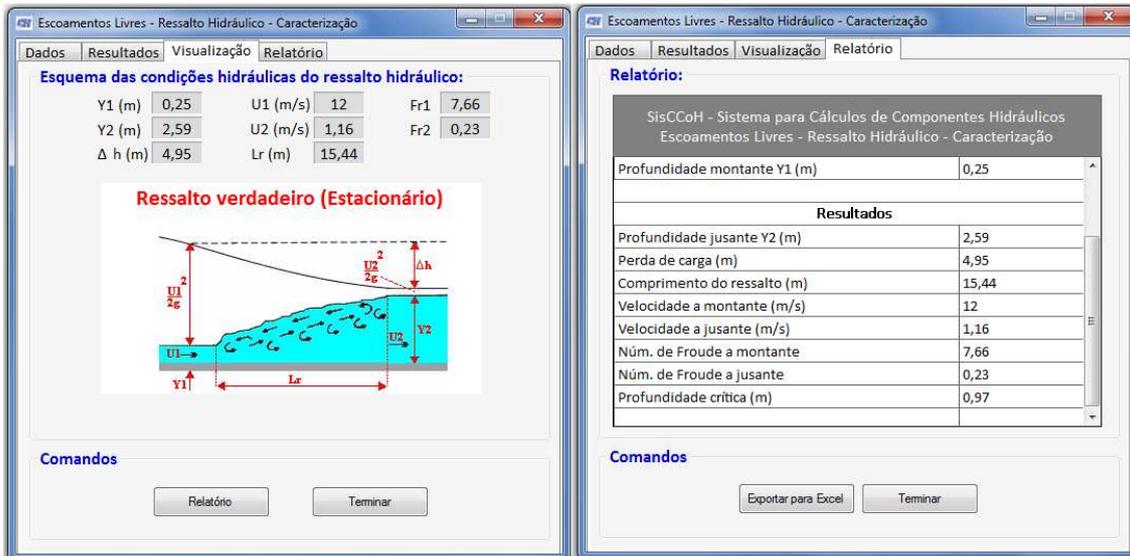


Figura 3.11 - Visualização dos resultados e Relatório

3.2.4 Canais em Enrocamento

Neste dimensionamento é verificado o diâmetro médio das pedras do enrocamento, calculado o coeficiente de Manning para um D_{50} adotado e a espessura do enrocamento. A formulação é válida apenas para declividade de 0,01 a 0,45 m/m e com D_{50} e entre 0,01 a 0,33. A vazão específica de projeto (q_d)

$$q_d = \frac{Q}{B_{inf}} * f_s \quad (3.20)$$

Em que: q_d : vazão específica ($m^3/s.m$)

B_{inf} : largura inferior (m)

f_s : coeficiente de majoração, adotado igual a 1,35

O *SisCCoH* calcula o D_{50} com base na metodologia proposta por Abt *et al* (2008), em função da declividade do canal, conforme apresentado nas equações (3.21) e (3.22). Caso a declividade esteja situada entre 0,10 e 0,20, o programa *SisCCoH* adota, conservadoramente, o maior valor obtido.

$$D_{50} = 50.74 * I^{0,43} * \frac{q_d^{0,56}}{100}, \text{ para } 0.01 \leq I < 0.1 \quad (3.21)$$

$$D_{50} = 97.82 * C_u^{0,7} * I^{0,7} * \frac{q_d^{0,68}}{100}, \text{ para } 0.2 \leq I \leq 0.45 \quad (3.22)$$

Em que: D_{50} : Diâmetro do tamanho médio das pedras (m)
Cu: Coeficiente de uniformidade

O cálculo do coeficiente de Manning associado ao D_{50} utiliza as equações seguintes - (3.23) ou (3.24), propostas por Abt *et al.* (1987a). Caso a declividade esteja entre 0,0281m/m e 0,2 o *software* escolhe o maior coeficiente de Manning.

$$n = 0.029 (1000 \cdot i \cdot d_{50_{Adotado}})^{0.147}, \text{ para } 0.01 \leq i < 0.0281 \quad (3.23)$$

$$n = 0.0273 (1000 \cdot i \cdot d_{50_{Adotado}})^{0.159}, \text{ para } 0.2 \leq i \leq 0.451 \quad (3.24)$$

Em que: D_{50} : Diâmetro do tamanho médio das pedras (m)
Cu: Coeficiente de uniformidade

Por sua vez, a metodologia assumida para os cálculos do diâmetro mínimo (D_0), do diâmetro máximo (D_{100}) e da espessura da camada foi a recomendada por Pinheiro (2006) em que a espessura do enrocamento é maior ou igual a 1,5 vezes o D_{50} , ou 2 vezes o D_{50} .

Exemplo 3.5: Cálculo de um canal em enrocamento

Para uma vazão de projeto de 2,5 m³/s, uma seção trapezoidal em enrocamento com inclinação lateral de 2:1, largura inferior de 1,5 m, declividade longitudinal de 2% e Cu de 2,12 obtenha o diâmetro médio do enrocamento (D_{50}), o Manning associado ao D_{50} adotado, a profundidade normal, velocidade do escoamento e espessura do enrocamento.

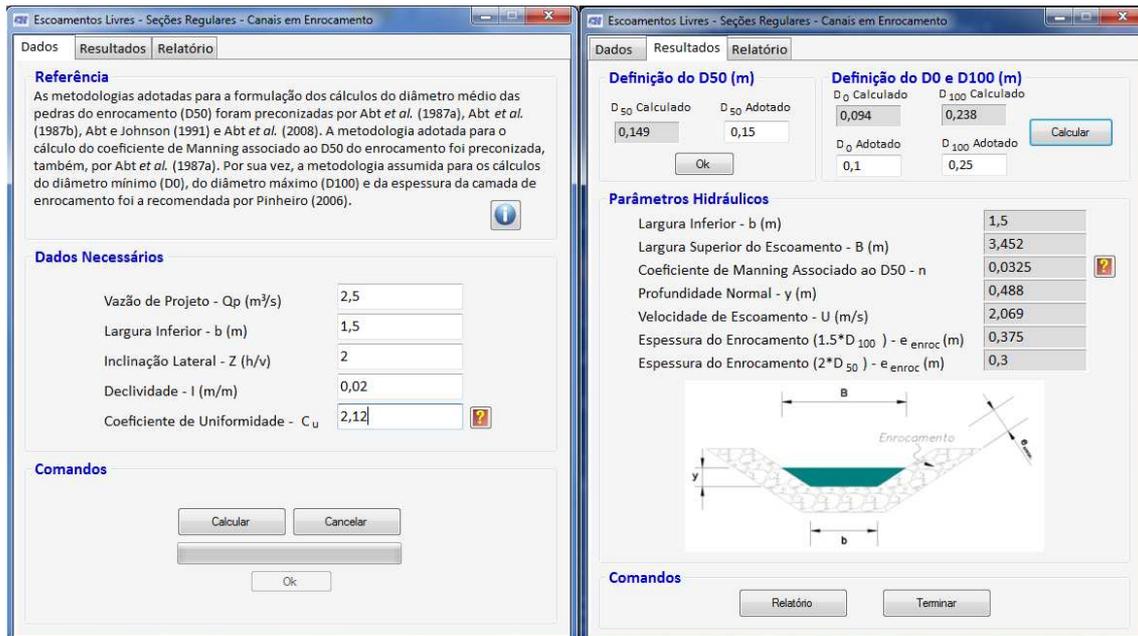


Figura 3.12 - *Dados e Resultados* de Canais em enrocamento.

A Figura 3.12 - *Dados e Resultados* de Canais em enrocamento. A Figura 3.12 exibe a aba da entrada de dados e a direita os resultados fornecidos. É possível fornecer os valores de D_{50} , d_0 e D_{100} , mediante a disponibilidade real do material do enrocamento. Em *Relatório* são resumidos os resultados e dados de entrada, permitindo ao usuário exportar para o Excel.

No próximo item serão explicitados os dimensionamentos de algumas estruturas hidráulicas, como bueiros, canais em degraus e bacias de dissipação calculadas pelo *SisCCoH*.

4 ESTRUTURAS HIDRÁULICAS

4.1 Bueiros

No dimensionamento de bueiros no *SisCCoH*, três tipos de funcionamento da estrutura são considerados: escoamento em canal livre, orifício e conduto forçado.

No caso de bueiros funcionando como canal, tanto o emboque quanto o desemboque não estão submersos. A declividade do canal é comparada à declividade crítica e o controle ocorre a montante se o regime verificado é torrencial e a jusante se o regime é fluvial.

$$I_{c,tubular} = 32,82 * \frac{n^2}{\sqrt[3]{D}} \quad (4.1)$$

$$Q_{adm,tubular,subcri} = \frac{0.305}{n} D^{\frac{8}{3}} \sqrt{i} \quad (4.2)$$

$$U_{tubular,subcri} = \frac{0.452}{n} D^{\frac{2}{3}} \sqrt{i} \quad (4.3)$$

$$Q_{adm,tubular,supercri} = 1,533D^{\frac{5}{2}} \quad (4.4)$$

$$U_{tubular,supercri} = 2,56\sqrt{D} \quad (4.5)$$

Em que: $I_{c,tubular}$: Declividade crítica para bueiro tubular.

$Q_{adm,tubular,subcri}$: Vazão admissível no bueiro tubular no regime subcrítico

$U_{tubular,subcri}$: Velocidade no bueiro tubular no regime subcrítico

$Q_{adm,tubular,supercri}$: Vazão admissível no bueiro tubular no regime supercrítico

$U_{tubular,supercri}$: Velocidade no bueiro tubular no regime supercrítico

O *SisCCoH* calcula a declividade crítica, a vazão admissível e a velocidade no canal para bueiros tubulares utilizando as equações (4.1),(4.2),(4.3),(4.4) e (4.5).

As equações (4.2) e (4.3), diferenciam-se das equações (4.4) e (4.5) quanto ao regime de escoamento no canal, em que o índice *subcri* indica o regime subcrítico e *supercri*, o regime supercrítico. A definição do regime foi feita comparando-se a equação (4.1) à declividade do canal.

Analogamente, para bueiros celulares, o *SisCCoH* utiliza as equações (4.6) a (4.10) :

$$I_{c,celular} = \frac{2.6 n^2}{\sqrt[3]{H}} \left(3 + \frac{4 H}{B} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (4.6)$$

$$Q_{adm,celular,subcri} = \left[\frac{(0.8 B H)^5}{(B + 1.6 H)^2} \right]^{\frac{1}{3}} \frac{\sqrt{i}}{n} \quad (4.7)$$

$$U_{celular,subcri} = \frac{Q_{adm}}{0,8BH} \quad (4.8)$$

$$Q_{adm,celular,supercri} = 1,705BH^{\frac{3}{2}} \quad (4.9)$$

$$U_{celular,supercri} = 2,56\sqrt{H} \quad (4.10)$$

Em que: $I_{c, celular}$: Declividade crítica no bueiro celular.

$Q_{adm, celular, subcri}$: Vazão admissível no bueiro celular no regime subcrítico.

$U_{celular, subcri}$: Velocidade no bueiro celular no regime subcrítico.

$Q_{adm, celular, supercri}$: Vazão admissível no bueiro celular no regime supercrítico.

$U_{celular, supercri}$: Velocidade no bueiro celular no regime supercrítico.

Na situação de funcionamento como orifício, a vazão transportada, a admissível e velocidade nos bueiros tubulares são calculadas pelas equações (4.11) a (4.15).

$$Q_o = C_d A \sqrt{2gh} \quad (4.11)$$

$$Q_{adm,tubular,o} = 2,192D^2\sqrt{h} \quad (4.12)$$

$$U_{tubular,o} = 2,79\sqrt{h} \quad (4.13)$$

$$Q_{adm,celular,o} = 2,79Bh\sqrt{h} \quad (4.14)$$

$$U_{celular,o} = 2,79\sqrt{h} \quad (4.15)$$

Em que: Q_o : Vazão transportada em funcionamento como orifício.

$Q_{adm, celular, o}$: Vazão admissível no bueiro tubular funcionando como orifício.

$U_{tubular, o}$: Velocidade no bueiro tubular funcionando como orifício.

$Q_{adm, celular, o}$: Vazão admissível no bueiro celular funcionando como orifício.

$U_{celular, o}$: Velocidade no bueiro celular funcionando como orifício.

No caso de funcionamento com entrada e saída do bueiro afogadas, considerou-se a equação da Conservação de Energia e a perda de carga foi calculada por:

$$\Delta h = \left(C_e + C_s + \frac{2 \text{ gn}^2 L}{R_h^{\frac{4}{3}}} \right) \frac{U^2}{2g} \quad (4.16)$$

Em que: C_e : Perda de carga na entrada (m).

C_s : Perda de carga na saída (m).

R_h : Raio hidráulico (m).

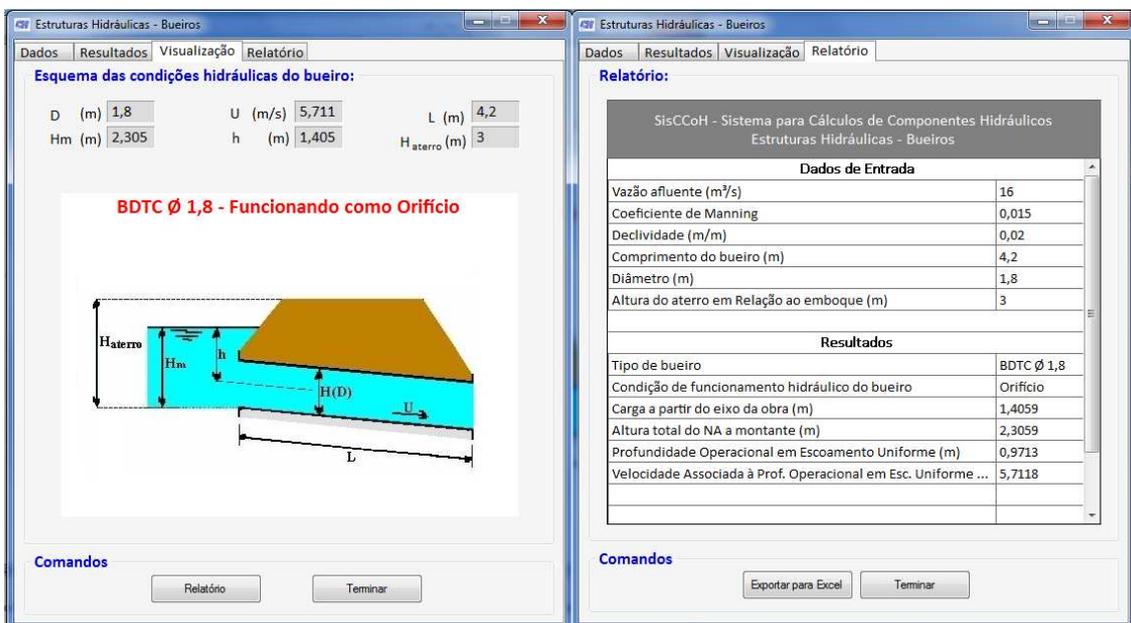
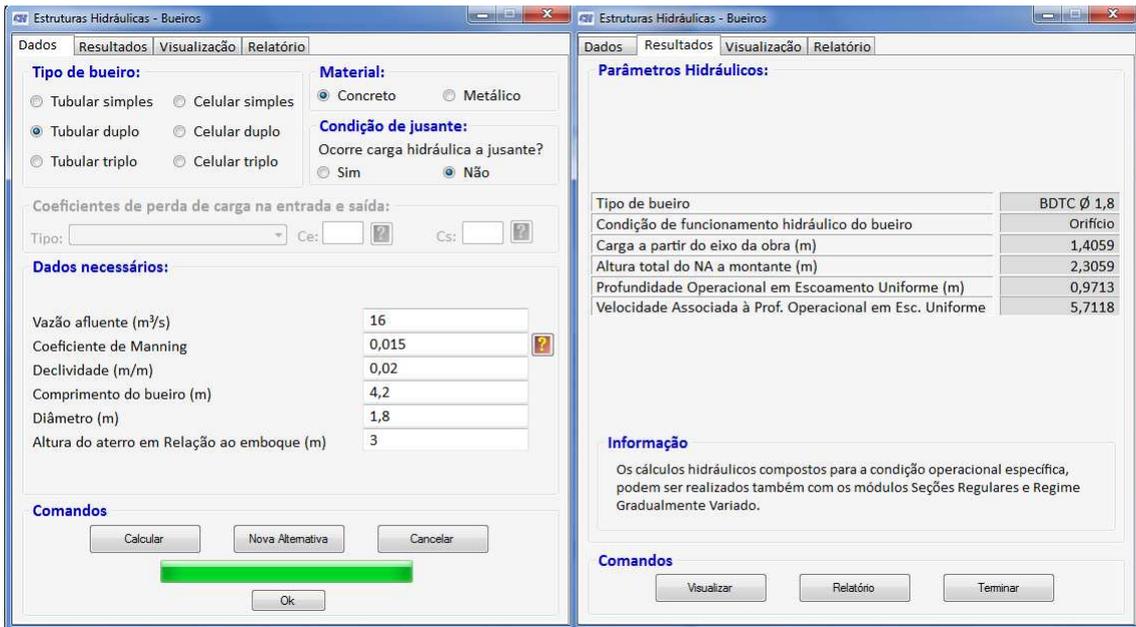
Na equação (4.16), o termo C_e é avaliado entre 0,2 a 0,7 e o coeficiente C_s varia entre 0,3 a 1,0, segundo (U.S. Army Corps of Engineers *apud* Marcio & Lara 2012).

Ressalta-se que no caso de linhas múltiplas, o programa considera uma redução da capacidade de vazão de 5% para cada linha adicional. Assim, admite-se que para um bueiro duplo sua capacidade de vazão total seja de 95% da soma das capacidades de vazão de cada linha de bueiro; para bueiros triplos, 90%, e assim em diante.

Exemplo 3.6: Verificação de um bueiro tubular duplo de concreto

Determine as características hidráulicas de um bueiro tubular de concreto com vazão afluyente de 16 m/s, rugosidade de 0,015, declividade de 2%, diâmetro de 1,80 m com extensão de 4,20 e altura do aterro em relação ao emboque de 3 m.

A figura 4.1 exhibe as abas *Dados* (a esquerda) e *Resultados* (a direita). Na primeira, é possível escolher entre bueiros tubulares e celulares, além do número de linhas, das quais é constituído. Pode-se escolher o material entre concreto ou metálico e informar a condição de jusante, se o bueiro está submerso ou não. Se submerso, ele funciona como um conduto forçado e é necessário informar os coeficientes C_s e C_e , que usualmente são adotados iguais a 0,2 e 1,0, respectivamente.



4.2 Escoamento em Degraus

4.2.1 Regime de Escoamento em Degraus

Em escoamento em degraus é apresentado ao usuário as seguintes janelas: Regime de Escoamento em Degraus, Regime Nappe Flow, Regime Skimming Flow, Canais com Trechos Distintos e Quedas singulares.

No módulo Regime de Escoamento é caracterizado o regime de escoamento que pode ser classificado em Nappe Flow, em Skimming Flow, ou regime de transição. O regime Nappe Flow possui a formação de bolsões de ar em cada degrau, conhecido também como quedas sucessivas. O regime Skimming Flow, segundo Ohtsu *et al.* (2004), possui a formação de vórtices em cada degrau, conhecido também como escoamento deslizante sob turbilhões. O regime de transição ora forma o escoamento aerado, ora forma os vórtices em cada degrau, alternando suas características dentre os dois tipos de escoamento anteriores (Matos e Quintela *apud* Simões 2008).

O *SisCCoH* dimensiona o escoamento em degraus baseado em estudos empíricos e uma simplificação da metodologia é a desconsideração do tipo do material do canal em degraus. A dissipação de energia neste escoamento é mais influenciada pelas características do degrau que a rugosidade do material. Dessa forma, desde que as geometrias características para o cálculo do escoamento em degraus sejam estabelecidas, pode-se adotar uma variedade de revestimentos, tais como o concreto, pedra argamassada, gabião caixa dentre outros. No entanto, para estruturas de maior magnitude ou passíveis de conduzir escoamentos em altas velocidades, recomenda-se a estrutura revestida em concreto, dadas as grandes perturbações do escoamento e dissipação de energia que ocorrem ao longo do canal em degraus.

Para a identificação do regime do escoamento, os dados requeridos são: a vazão de entrada (Q), a largura do canal (B), altura dos degraus (S) e o comprimento dos degraus (l). E, a partir dos dados de entrada são calculados a razão S/l , o ângulo formado entre um plano horizontal e aquele que contém as quinas dos degraus da escada (θ), a profundidade crítica, a vazão específica e a vazão para a profundidade crítica máxima dos regimes Nappe Flow, Skimming Flow e em transição.

O cálculo do regime Nappe Flow é válido para declividades entre 0,05 e 1,43, sendo que para declividades entre 0,05 e 0,1 o dimensionamento foi baseado nos experimentos de Chanson (2001) e para as declividades entre 0,1 a 1,43 na metodologia de Yasuda *et al.* (2001). Em sua modelagem empírica, foi verificado que a relação y_c/h estava sujeita ao número de Reynolds, à relação entre a largura e a profundidade crítica e à declividade do canal, mas que poderiam ser desprezadas para os valores $B/y_c \geq 5$ e $Re \geq 20.000$ (Yasuda *et al.* 2001).

Para as declividades inferiores a 0,1 podem ser identificados no *SisCCoH* o regime de transição ou o regime Nappe Flow. A vazão máxima do regime Nappe Flow (igual a mínima do regime de transição) é calculada a partir de considerações de Chanson (2001) e a profundidade crítica máxima é obtida pela equação (4.17):

$$y_{c,m\acute{a}x} = \left(0,89 - 0,4 \frac{S}{l}\right) S, \quad \text{para } 0,05 \leq \frac{S}{l} < 0,1 \quad (4.17)$$

Em que: l : Comprimento do degrau.

S : Altura do degrau.

$y_{c,m\acute{a}x}$: Profundidade crítica máxima.

A partir da profundidade crítica é obtida a vazão limite do Nappe Flow. Se a vazão for acima deste valor para uma determinada geometria, o regime a ser caracterizado é o regime de transição, desde que respeitadas as condições de contorno.

No caso do regime Nappe Flow com declividades superiores a 0,1, é válida a equação (4.18) (Yasuda *et al.*, 2001) para o limite inferior no intervalo de θ entre $5,7^\circ$ e 55° .

$$\frac{S}{y_c} = 0,57 \cdot (\tan \theta)^3 + 1,3, \quad \text{para } 5,7^\circ \leq \theta \leq 55^\circ \quad (4.18)$$

Em que: θ : Ângulo formado entre o plano horizontal e o formado pelo alinhamento das quinas dos degraus.

Este tipo de regime pode ser ainda subdividido em Nappe Flow com completo ou parcial desenvolvimento de ressalto hidráulico. O limite do regime com formação de ressalto completo é dado pela equação (4.19), válido para $5,7^\circ \leq \theta \leq 10,2^\circ$:

$$\frac{S}{y_c} \geq -12,5537 \cdot (\tan \theta)^3 + 21,4360 \cdot (\tan \theta)^2 + 15,7799 \cdot (\tan \theta) - 0,4583 \quad (4.19)$$

O Nappe Flow com parcial desenvolvimento do ressalto hidráulico pode ocorrer caso a equação (4.20) seja satisfeita e caso ocorresse um aumento do valor da declividade ou da vazão, estes não contribuiriam para a formação do ressalto hidráulico completo (Chanson, 1994).

$$\frac{S}{y_c} \geq \{[0,0916(\tan \theta)]^{-1,276}\}^{-1}, \text{ para } 11,31^\circ \leq \theta \leq 30,96^\circ \quad (4.20)$$

O dimensionamento do regime Skimming Flow é válido para declividades entre 0,1 e 1,43 e foi fundamentado nas proposições de Ohtsu *et al.* (2004). Para identificar o regime Skimming Flow é calculado o limite superior dado pela equação (4.21).

$$\left(\frac{S}{y_c}\right)_s = \left[\frac{7}{6}(\tan \theta)\right]^{\frac{1}{6}}, \quad \text{para } 5,7^\circ < \theta < 55^\circ \quad (4.21)$$

Em que: $\left(\frac{S}{y_c}\right)_s$: limite superior do regime Skimming Flow

A vazão mínima do regime Skimming Flow é calculada a partir de y_c obtido nessa equação. E o regime Skimming Flow também pode ser subdividido em tipo A e tipo B. O limite entre esses tipos é apresentado na equação (4.22):

$$\left(\frac{S}{y_c}\right)_B = 13(\tan \theta)^2 - 2,73 \cdot \tan \theta + 0,373, \text{ para } 5,7^\circ < \theta < 19^\circ \quad (4.22)$$

Em que: $\left(\frac{S}{y_c}\right)_B$: limite entre tipo A e B do Skimming Flow

As notificações desse módulo referem-se ao preenchimento adequado do formulário para a rotina de cálculo realizada pelo programa. Se o usuário deixar de preencher algum campo a mensagem "Entrada incompleta de dados!" é mostrada ao usuário, assim como se o mesmo entrar com algum valor nulo é exibida a mensagem "Dados incompatíveis para a resolução do problema!" pelo programa. A mensagem "Faixas de Vazão não Calculada!" é exibida no campo de classificação do regime, caso ocorra uma solução negativa para as vazões máximas e mínimas calculadas pelo programa e, nesta situação a mensagem "Dados incompatíveis com o problema!" é exibida na tela. Neste caso, o usuário precisa alterar as dimensões da geometria da escada para novo dimensionamento.

A mensagem “Os cálculos são válidos para o intervalo $0,1 \leq (S/y_c) < (S/y_c)s$ ” indica uma condição de contorno do regime skimming flow baseado nos experimentos de Ohtsu (2004). Além disso, a notificação “S/y_c maior que 10. Tente outros valores!” refere-se ao limite superior do regime Nappe Flow com formação de ressalto completo. O aviso que o “O cálculo é válido para a faixa de inclinações com ângulos entre 2,86° e 5,71°.”, refere-se aos limites de cálculo do regime Nappe Flow quando utilizada declividades inferiores a 0,1. Ainda neste módulo, o aviso “S/y_c menor que 1,14 ou S/y_c maior que 7. Tente outros valores!” refere-se a um limite do Nappe para declividades menores que 0,1, conforme estudos de Chanson (2001). E, por fim, a notificação “Tente outros Valores!” indicam que os dados de entrada estão fora do condicionamento empírico dos autores consultados e sugere ao usuário tentar outros valores.

Exemplo 4.1: Identificação do regime de escoamento em degraus.

Dado um escoamento em degraus com vazão igual a 10 m³/s, largura do canal igual a 2,5 m, altura de cada degrau igual a 0,50 m e comprimento do degrau igual a 1,0 m. Identifique o regime de escoamento existente nessa estrutura.

O módulo pode ser acessado por meio do menu *Estruturas Hidráulicas*, *Escoamento em Degraus*, e por fim, *Regime de Escoamento em Degraus*. Após acessar o regime de escoamento em degraus a janela apresentada na Figura 4.3 é aberta e nesta é possível entrar com os dados para caracterizar o regime.

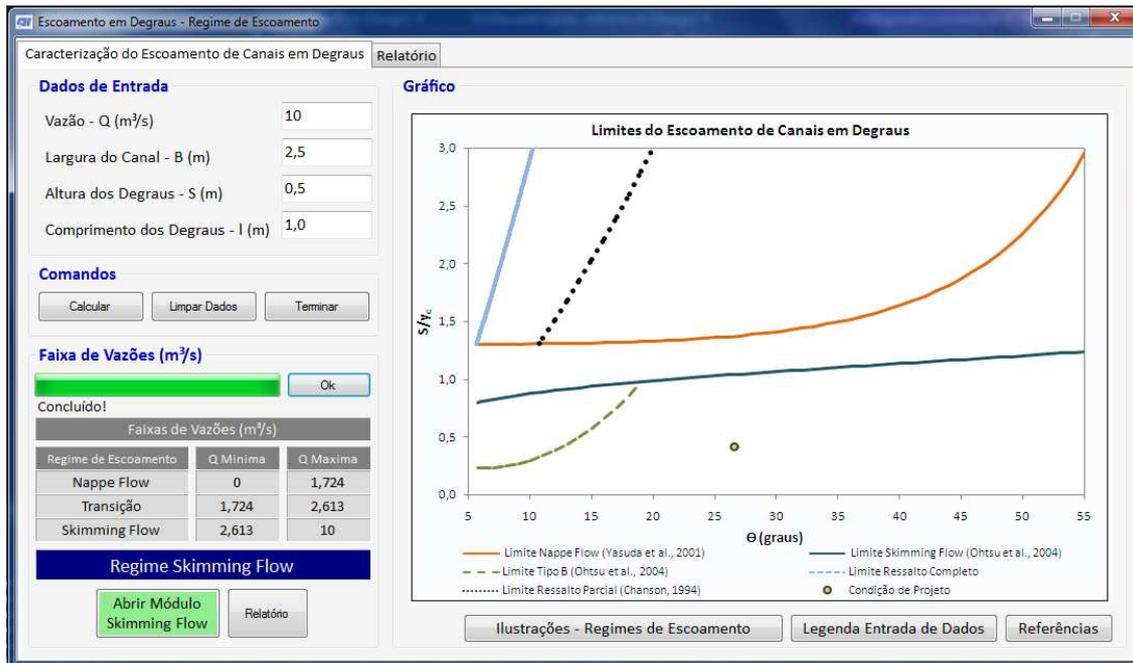


Figura 4.3 - Caracterização do escoamento de Canais em Degraus

A Figura 4.3 ilustra uma aplicação do módulo em que o regime de escoamento Skimming Flow foi detectado:

O botão *Legenda Entrada de Dados* facilita a visualização em desenho dos dados de entrada, mostrando o posicionamento de cada uma das variáveis. E o botão *Ilustrações* apresenta modelos esquemáticos definindo em perfil a indicação das principais características geométricas relevantes no dimensionamento hidráulico de descidas em degraus.

O campo *Faixa de Vazões* indica as vazões máximas e mínimas, para cada regime de escoamento em degraus, e clicando-se em *Abrir Módulo Skimming Flow* é possível continuar o dimensionamento do canal em degraus.

4.2.2 Regime Nappe Flow

Depois de caracterizado o regime de escoamento Nappe Flow, pode-se calcular os dados para dimensionamento clicando em abrir módulo Nappe Flow do módulo descrito anteriormente ou em *Estruturas Hidráulicas, Escoamento em degraus, e Regime Nappe Flow*.

Neste módulo é calculado o ângulo da estrutura em degraus, a vazão específica, a profundidade crítica, o número de queda (4.23), a altura da parede – equação (4.27) ou (4.28) -, a energia máxima (4.29), a energia residual (4.30) ou (4.31), eficiência de energia dissipada, a profundidade final do escoamento, a velocidade e o número de Froude ao final do escoamento em degraus.

$$D_N = \frac{\left(\frac{Q}{B}\right)^2}{9,81 \cdot S^3} \quad (4.23)$$

Em que: D_N : Número de queda.

O comprimento da queda (L_d), as profundidades conjugadas (y_1 e y_2) foram calculadas pelas equações (4.24), (4.25) e (4.26).

$$L_d = 4,3 * D_N^{0,27} \quad (4.24)$$

$$\frac{y_1}{S} = 0,54 D_N^{0,425} \quad (4.25)$$

$$\frac{y_2}{S} = 1,66 D_N^{0,27} \quad (4.26)$$

Em que: L_d : Comprimento da queda (m)

A altura da parede mínima, para que não ocorra o extravasamento lateral, é calculada pela equação (4.27), no caso de Nappe Flow sem desenvolvimento de ressalto hidráulico, e pela equação (4.28) com desenvolvimento de ressalto hidráulico, ainda que parcial (Simões, 2008):

$$H_{parede,mín,sem\ ressalto} = 2 * \tanh(0,02^{2,5,0} + 0,65) * y_c * 1,4 \quad (4.27)$$

$$H_{parede,mín,com\ ressalto} = 1,4 * y_2 \quad (4.28)$$

Em que: $H_{parede,mín,sem\ ressalto}$: Altura da parede mínima sem formação de ressalto

$H_{parede,mín,com\ ressalto}$: Altura da parede mínima com formação de ressalto

As energias máxima ($H_{máx}$), residual (H_r) quando ocorre ou não o ressalto e dissipada (H_{dissip}) foram calculadas pelas equações (4.29) a (4.32).

$$H_{m\acute{a}x} = H_d + 1,5 * y_c \quad (4.29)$$

$$H_{r,completo} = \frac{H_{m\acute{a}x} * 0,54 * \left(\frac{y_c}{S}\right)^{0,275} + 1,715 * \left(\frac{y_c}{S}\right)^{-0,55}}{1,5 + H_d/y_c} \quad (4.30)$$

$$H_{r,parcial} = 1 - \frac{(1 - \alpha) \left[1 + 1,5 \left(\frac{y_c}{h}\right)\right] + \sum_{i=1}^{N-1} (1 - \alpha)^{-1}}{N + 1,5\left(\frac{y_c}{h}\right)} \quad (4.31)$$

$$H_{dissip} = H_{max} - H_r \quad (4.32)$$

Em que: $H_{m\acute{a}x}$: Energia máxima (m)

H_d : Altura da escada (m)

$H_{r,completo}$: Energia residual com ressalto completo (m)

$H_{r,parcial}$: Energia residual com ressalto parcial (m)

H_{dissip} : Energia dissipada (m)

A seguir é mostrado um exemplo de cálculo do escoamento em degraus em regime Nappe Flow.

Exemplo 4.2: Cálculo do escoamento em degraus em regime de Nappe Flow.

Uma descida de água em degraus que consiste em 10 degraus, altura dos degraus de 0,5m, 2,5 m de comprimento, 4,0 m de largura e desnível total de 5,0 m recebe uma vazão de 2,0 m³. Identifique as condioes do escoamento e a energia dissipada na base dessa estrutura hidráulica.

Acessando o módulo *Escoamento em Degraus, Regime de Escoamento* é possível, inicialmente, identificar o tipo de escoamento como Nappe Flow, conforme ilustrado na Figura 4.4.

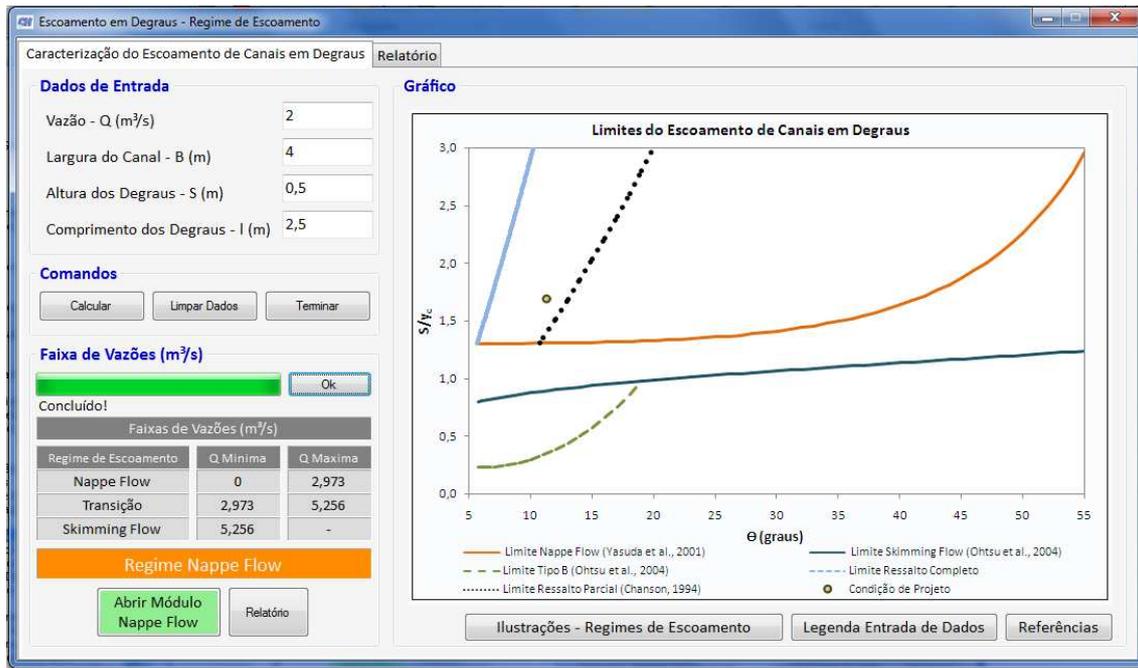


Figura 4.4 - Caracterização do Regime de Escoamento Nappe Flow

A Figura 4.5 exibe a entrada de dados a esquerda e a direita os resultados. Percebe-se do lado direito a apresentação dos resultados agrupados por *Parâmetros Hidráulicos* e os *Dados para Dimensionamento*.

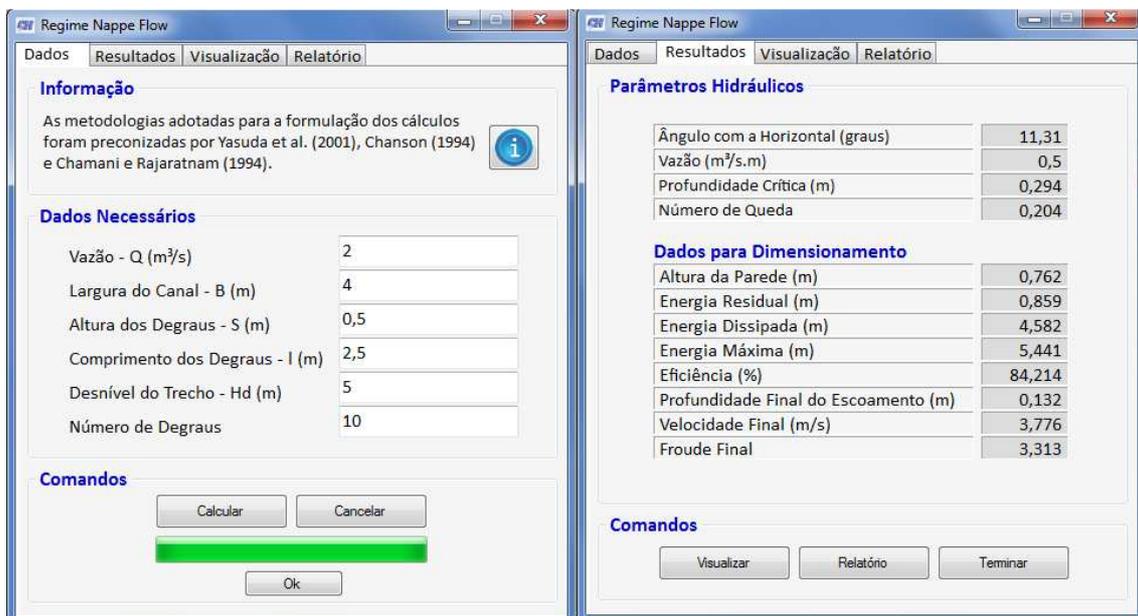


Figura 4.5 - *Dados e Resultados* do regime Nappe Flow

Já na Figura 4.6 são ilustradas as dimensões em um esquema geral do regime Nappe Flow indicando a altura do degrau, o comprimento da queda e do ressalto.

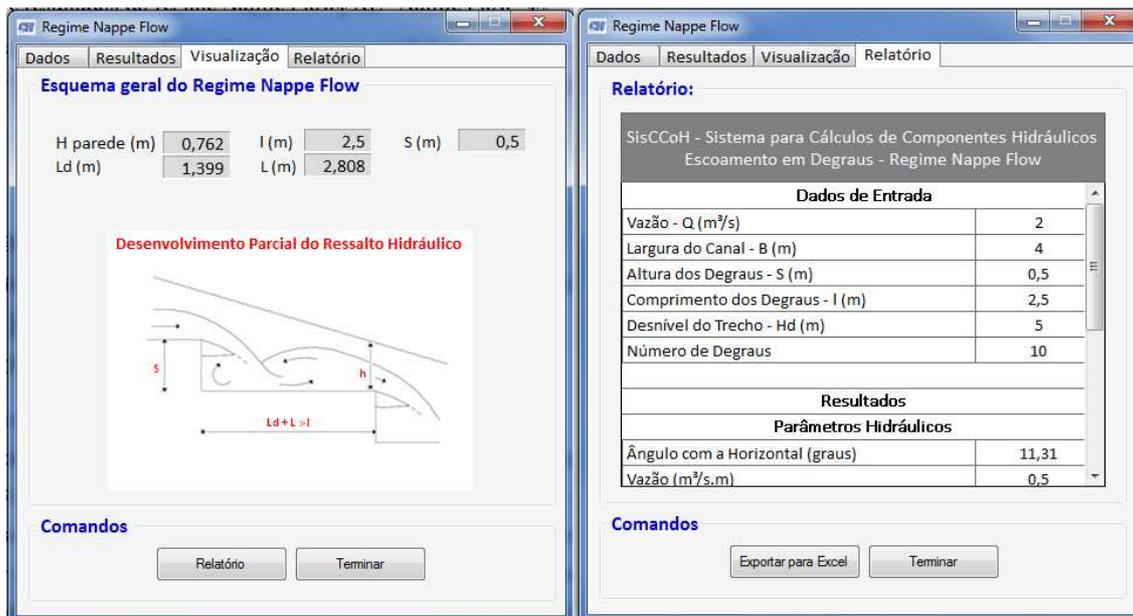


Figura 4.6 - *Relatório* Regime de Escoamento Nappe Flow

Na aba *Visualização* é mostrado o tipo de desenvolvimento do ressalto hidráulico e em *Relatórios* são exibidos os dados para dimensionamento da estrutura.

4.2.3 Regime Skimming Flow

Uma vez caracterizado o regime de escoamento Skimming Flow, na janela Regime de escoamento em degraus, o dimensionamento pode ser acessado pelo campo na parte inferior esquerda indicado por *Abrir Módulo Skimming Flow*. A metodologia adotada para a formulação dos cálculos foi fundamentada em Ohtsu *et al.* (2004). Segundo o autor, a importância da estimativa do escoamento em degraus relaciona-se à medição da dissipação de energia e à resistência ao escoamento. Este módulo é composto pelas seguintes abas: *Dados*, *Resultados*, *Visualização*, *Início do Escoamento*, *Risco de Cavitação* e *Relatório*.

Os experimentos de Ohtsu *et al.* (2004) para o regime *Skimming Flow* foram realizados em descidas em degraus com inclinação entre $5,7^\circ$ e 55° . Para escoamento em degraus entre 19° e 55° , a linha d'água era quase uniforme e independente da relação entre a altura do degrau e a profundidade crítica, formando um perfil Tipo A, com a lâmina d'água paralela ao plano formado entre as quinas dos degraus. E, para as inclinações entre $5,7^\circ$ e 19° , o escoamento nem sempre era paralelo a linha formada pelas quinas dos degraus, variando entre o *Tipo A* e quando a razão S/y_c se tornava

maior caracterizava um regime *Tipo B*. Segundo Ohtsu *et al.* (2004) o limite superior e o limite entre os tipos A e B pode ser verificado pelas equações (4.21) e (4.22), apresentadas anteriormente.

Na rotina de cálculo do *Skimming Flow* é requerido ao usuário informar a vazão, a largura do canal, a altura do degrau, o comprimento do patamar do degrau e a altura total da queda (H_{dam}). O *SisCCoH* calcula a profundidade crítica do escoamento, o adimensional dado pela razão entre a altura da queda e a profundidade crítica, as variáveis do início do escoamento, a profundidade relativa, o coeficiente de atrito, a profundidade representativa, a energia residual e avalia o risco de cavitação. As referências geométricas dos parâmetros calculados são exibidos no *SisCCoH* na aba *Visualização*.

Na Figura 4.7 estão esboçados os tipos de escadas utilizadas nos experimentos de Ohtsu *et al.* (2004). Além disso, estão indicados alguns parâmetros geométricos como a altura do escoamento não uniforme (H_e), altura da descida em degraus (H_{dam}), altura do degrau (S) e inclinação da escada (θ) a serem considerados no dimensionamento hidráulico.

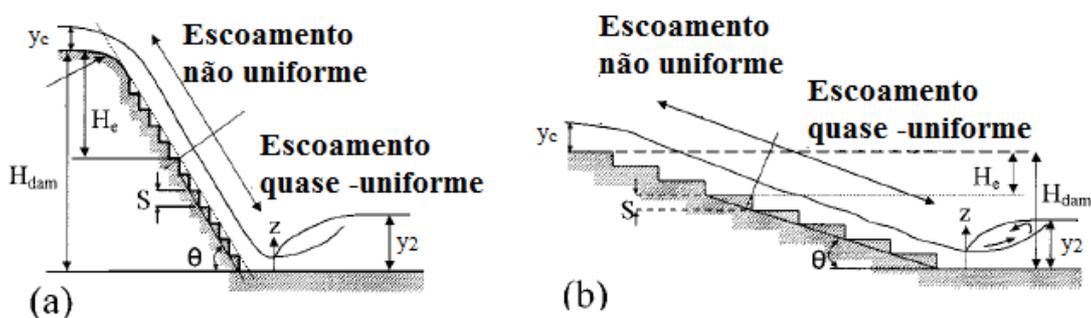


Figura 4.7 - Esquema de escadas utilizadas. Em (a) descida em degraus utilizada para $\theta=19, 23, 30$ e 55° e em (b) utilizada para $\theta=5,7, 8,5$ e $11,3^\circ$.

Pela Figura 4.7 é possível verificar duas regiões de escoamento, uma não uniforme e outra aproximadamente uniforme (ou quase-uniforme). Mais especificamente, na parte (a) mostra um exemplo de escoamento em degraus para valores de θ maiores que 19° , em que a escada foi iniciada com um perfil de transição

vertical suave para garantir que não haja o descolamento da veia líquida do escoamento do fundo do canal.

A avaliação do ressalto hidráulico formado imediatamente a jusante do canal em degraus, por meio da profundidade conjugada a jusante (y_2), foi utilizada para estimar a região do escoamento aproximadamente uniforme, dada a dificuldade de mensurar as mudanças na profundidade no escoamento aerado.

Dessa forma, o limite entre as regiões de escoamento não uniforme e aproximadamente uniforme, foi definido empiricamente para determinados valores de θ e S/y_c , para os quais a relação y_2/y_c permaneceu constante. A altura relativa da escada (H_e/y_c) requerida para formar o regime aproximadamente uniforme é calculada pela equação (4.33).

$$\frac{H_e}{y_c} = (-1.21 * 10^{-5} \theta^3 + 1.6 * 10^{-3} \theta^2 - 7.13 * 10^{-2} \theta + 1.3)^{-1} \quad (4.33)$$

$$* \left(5.7 + 6.7 e^{-6.5 \frac{S}{y_c}} \right)$$

Em que: H_e : Altura do ponto inicial da queda ao início do escoamento aproximadamente uniforme.

Se $H_{dam}/y_c \geq H_e/y_c$, o escoamento possui uma região de escoamento aproximadamente uniforme, e calcula-se o fator de atrito e a profundidade representativa e em seguida, calcula-se a concentração média de ar. Senão, ele possui apenas uma região de escoamento não uniforme e no seu dimensionamento calcula-se a energia residual relativa (E_r/y_c).

O coeficiente de atrito (f) para $H_{dam}/y_c \geq H_e/y_c$ (regime aproximadamente uniforme) e $0,1 \leq S/y_c \leq 0,5$ é calculado pelas equações (4.34) e (4.35)

$$f = f_{m\acute{a}x} - A \left(0,5 - \frac{S}{y_c} \right), \text{ para } 0,1^\circ \leq \frac{S}{y_c} \leq 0,5 \quad (4.34)$$

$$f = f_{m\acute{a}x}, \text{ para } 0,5^\circ \leq \frac{S}{y_c} \leq \left(\frac{S}{y_c} \right)_s \quad (4.35)$$

Em que: Para $5,7^\circ \leq \theta \leq 19^\circ$:

$$A = 1,7 * 10^3 \theta^2 + 6,4 * 10^2 \theta - 1,5 * 10^{-1} \quad (4.36)$$

$$f_{\text{máx}} = -4,2 * 10^{-4}\theta^2 + 1,6 * 10^{-2} * \theta + 3,2 * 10^{-2} \quad (4.37)$$

Para $19^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$:

$$A = 0,452 \quad (4.38)$$

$$f_{\text{máx}} = 2,32 * 10^{-5}\theta^2 - 2,75 * 10^{-3}\theta + 2,31 * 10^{-1} \quad (4.39)$$

A profundidade representativa (d_w) da superfície de água é calculada no *software* pela equação (4.40), obtida por uma estimativa indireta que considera a energia residual do *Skimming Flow* equivalente a energia E_1 no ponto anterior ao ressalto hidráulico (imediatamente a jusante do canal em degraus), segundo Yasuda e Ohtsu (1999) *apud* Ohtsu *et al.* (2004, p. 863).

$$d_w = \left(\frac{f}{8 * \text{sen}\theta} \right)^{\frac{1}{3}} * y_c \quad (4.40)$$

Em que: d_w : Profundidade representativa do escoamento (m).

Para a região de escoamento aproximadamente uniforme a energia residual do escoamento é calculada pelas equações (4.41) e (4.42) para o *Skimming Flow* classificado como tipo A, e tipo B, respectivamente:

$$E_{\text{ru,tipo A}} = y_c * \left[\left(\frac{d_w}{y_c} \right) * \cos \theta + 0,5 * \left(\frac{y_c}{d_w} \right)^2 \right] \quad (4.41)$$

$$E_{\text{ru,tipo B}} = y_c * \left[\left(\frac{d_w}{y_c} \right) + 0,5 * \left(\frac{y_c}{d_w} \right)^2 \right] \quad (4.42)$$

Em que: $E_{\text{ru,tipo A}}$ é a energia residual do regime aproximadamente uniforme do escoamento *Skimming Flow* tipo A.

$E_{\text{ru,tipo B}}$ é a energia residual do regime aproximadamente uniforme do escoamento *Skimming Flow* tipo B.

Para a região não uniforme ($H_{\text{dam}}/y_c < H_e/y_c$) calcula-se para ambos os tipos a energia residual (E_r) pela equação 4.43, em que E_{ru} é obtido pelas equações (4.41) e (4.42).

$$E_r = y_c * \left\{ 1.5 + (E_{ru} - 1.5) * \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{H_{dam}}{H_e} \right)^m \right] \right\} \right\} \quad (4.43)$$

$$m = \frac{-\theta}{25} + 4 \quad (4.44)$$

Em que: E_r é a energia residual de região não-uniforme (m)

Para a região de escoamento aproximadamente uniforme, a concentração média de ar (C_{med}) é calculada por (Ohtsu *et al.* 2004):

$$C_{med} = d - 0.3 * e^{\left(-5 * \frac{s}{yc} - 4 * \frac{s}{yc}\right)} \quad (4.45)$$

Em que: $d = 0,3$, para $5,7^\circ \leq \theta < 19^\circ$:

$$d = -2 * 10^{-4} * \theta^2 + 2.14 * 10^{-2} * \theta - 3.57 * 10^{-2}, \text{ para } 19^\circ \leq \theta \leq 55^\circ \quad (4.46)$$

Em seguida $y_{0,9}$ (correspondente a profundidade normal quando a concentração de ar é igual a 0,9) é calculado por (Ohtsu *et al.* 2004):

$$Y_{0,9} = \frac{d}{1 - C_{med}} \quad (4.47)$$

Em que: $Y_{0,9}$, profundidade normal referente a $C = 0,9$.

E a altura do muro da escada (H_w) é calculada por:

$$H_w = 1.4 * Y_{0,9} \quad (4.48)$$

Em que: $Y_{0,9}$, profundidade normal referente a $C = 0,9$.

O *SisCCoH* calcula o número de Froude rugoso (f') pela equação (4.49) considerando uma rugosidade na superfície da calha (k) dada pela equação (4.50) em concordância ao recomendado por Keller e Rastogui (1977), conforme citado por Gomes (2006, p. 21).

$$f' = \frac{Q/B}{\sqrt{9,81 * k^3 * (\sin \theta)}} \quad (4.49)$$

$$k = s * \cos \theta \quad (4.50)$$

Em que: f' é o número de Froude rugoso

k é rugosidade na superfície da calha

A posição do início de aeração (L_a) é determinada pela equação (4.51) e a respectiva profundidade (Y_a) é dada pela equação (4.52), segundo Chanson (2002) *apud* Gomes (2006, p. 22).

$$L_a = 9,719 * (\sin\theta)^{0,0796} * f^{0,713} * k \quad (4.51)$$

$$Y_a = \frac{0,4034 * f^{0,592} * k}{(\sin\theta)^{0,04}} \quad (4.52)$$

Em que: L_a é a posição de início da aeração

Y_a é a profundidade de início da aeração

A velocidade do escoamento aerado é obtida em seguida, aplicando-se a equação da continuidade. A velocidade crítica de cavitação no início da aeração (V_{cra}) é calculada por:

$$V_{cra} = 16,29 + \frac{9,91}{1 + e^{(0.4) * \left(\frac{1}{0,23}\right)}} \quad (4.53)$$

Em que: V_{cra} é a velocidade mínima de cavitação

Após o cálculo dessas velocidades o programa notifica o usuário com as seguintes expressões: " $V_a < V_{cra}$: *Sem risco de cavitação*", no caso da velocidade no ponto inicial da aeração for menor que a crítica de cavitação e " $V_a \geq V_{cra}$: *Risco de cavitação. Tente outros valores.*", no caso de velocidade inicial superior. A metodologia para cálculo do risco de cavitação é baseada na metodologia descrita por Gomes (2006) e possui as seguintes condições de contorno:

- $0,35 \leq x/L_a \leq 1,2$;
- $y_c/S \leq 4,09$;
- $48^\circ \leq \theta \leq 58$;
- $S = 0,30\text{m}; 0,60\text{m}; 0,90\text{m} 1,20\text{m}$;
- Vertedouro com muros verticais orientados no sentido do escoamento (não divergentes não convergentes);
- Vertedouro sem qualquer elemento sobre a calha (pilares, manipuladores, turbulência);
- Tensão relativa de vapor a 20°C ;
- Ao nível do mar a $-10,09 \text{ mH}_2\text{O}$.

Exemplo 4.3: Cálculo do escoamento em degraus em regime Skimming Flow.

Dado um escoamento em degraus com vazão igual a 10 m³/s, largura do canal igual a 2,5 m, altura de cada degrau igual a 0,5 m, comprimento do degrau igual a 1 m e desnível do trecho igual a 50 m, identifique o regime de escoamento existente e apresente os parâmetros hidráulicos e dados para dimensionamento.

Na aba *Dados*, apresentada à esquerda da Figura 4.8, digita-se os parâmetros geométricos solicitados. Caso o usuário tenha previamente caracterizado o regime de escoamento no módulo anterior, esses dados são automaticamente carregados, bastando apenas definir o desnível do trecho. Em seguida, na aba *Resultados* são apresentados os parâmetros hidráulicos indicados e os dados para dimensionamento.

The image shows two side-by-side windows of the SisCCoH 1.1 software. The left window is the 'Dados' (Data) tab, and the right window is the 'Resultados' (Results) tab. Both windows have a menu bar with 'Dados', 'Resultados', 'Visualização', 'Início do Escoamento', 'Risco de Cavitação', and 'Relatório'.

Dados (Left Window):

Informação
A metodologia adotada para a formulação dos cálculos foi fundamentada em "Flow Characteristics of Skimming Flows in Stepped Channels", de Ohtsu, Yasuda e Takahashi, publicado no Journal of Hydraulic Engineering - ASCE em Setembro de 2004; Páginas 860 - 869.

Dados necessários:

Vazão (m ³ /s)	10
Largura do Canal (m)	2,5
Altura do Degrau (m)	0,5
Comprimento do Patamar do Degrau (m)	1
Desnível do Trecho (m)	50

Comandos

Buttons: Calcular, Cancelar, Ok

Resultados (Right Window):

Parâmetros Hidráulicos:

Ângulo com a Horizontal (graus)	26,565
Vazão (m ³ /s.m)	4
Profundidade Crítica (m)	1,177
Concentração Média de Ar	0,369
Coefficiente de Atrito	0,172

Dados para dimensionamento:

Profundidade Aerada do Escoamento (m)	0,678
Velocidade do Escoamento Aerado (m/s)	5,9
Profundidade Final do Escoamento (m)	0,428
Velocidade Final do Escoamento (m/s)	9,35
Energia Residual (m)	4,838
Altura de Referência da Parede (m)	0,95

Comandos

Buttons: Visualizar, Relatório, Início Escoamento, Terminar

Figura 4.8 - Dados e Resultados do regime Skimming Flow

Na aba *Visualização* e *Início de Escoamento* são exibidos dois esquemas mostrando as posições e características geométricas relevantes, conforme indicado na Figura 4.9.

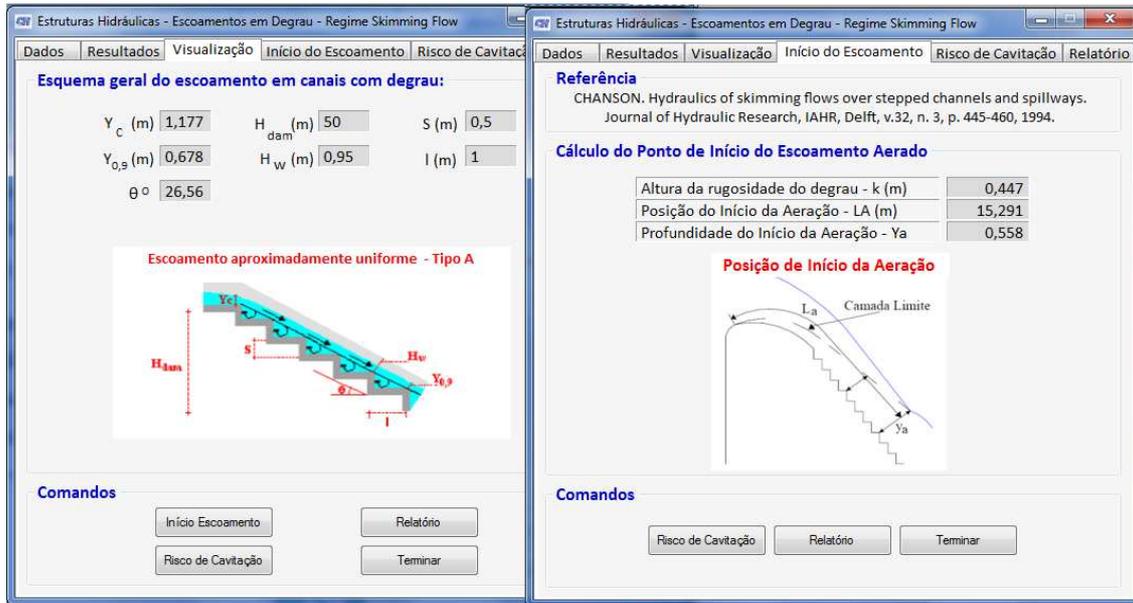


Figura 4.9 - Visualização e Início do Escoamento do regime Skimming Flow

Alternando-se entre as abas para *Risco de Cavitação*, verifica-se o seguinte aviso, exibido na Figura 4.10.

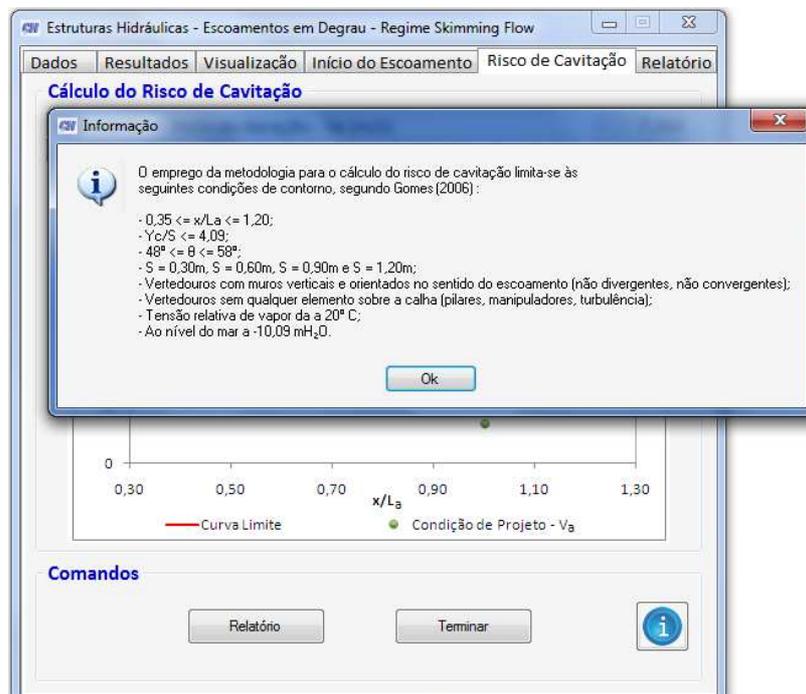


Figura 4.10 - Notificação das condições de contorno consideradas

Na aba *Risco de Cavitação* (Figura 4.11), propriamente dita, é apresentado um gráfico que compara a velocidade no início da aeração e a velocidade crítica, definindo

uma curva limite para diferentes valores de x/L_a , em que x é a posição do escoamento e L_a é o ponto inicial do escoamento aerado. Se abaixo da curva, o risco de cavitação é baixo, caso contrário alto e, dessa forma, deve-se testar outros valores.

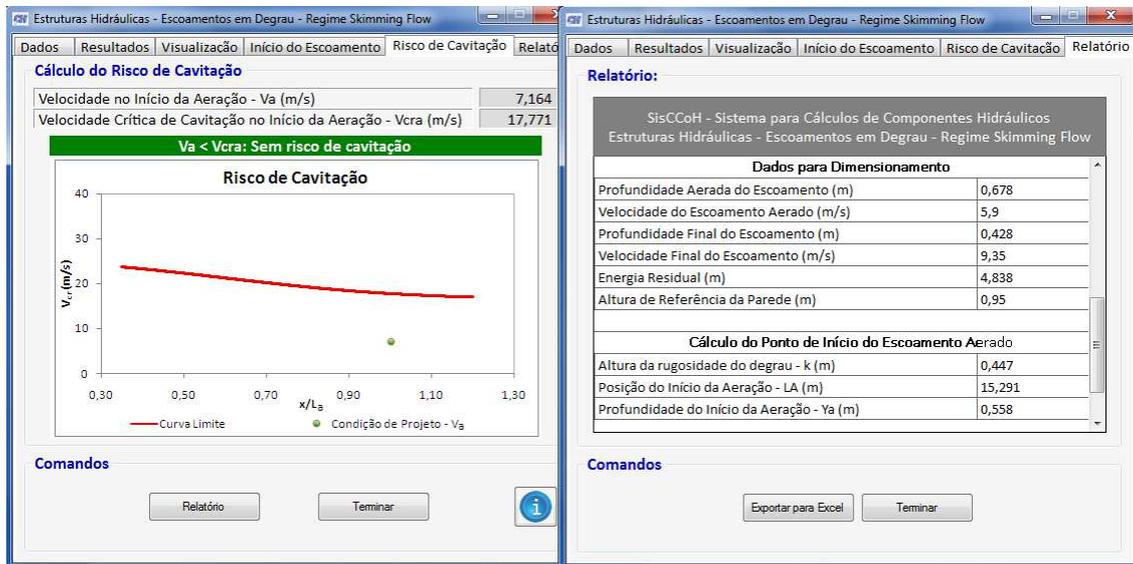


Figura 4.11 - *Risco de Cavitação e Relatório* do regime Skimming Flow

E, por fim, assim como em outros módulos é permitido ao usuário exportar os dados para Excel ao final da tela de Relatório, conforme indicado à direita na Figura 4.11.

As notificações desse módulo são as seguintes:

- "Os cálculos são válidos para o intervalo $0.1 \leq (S/Y_c) < (S/Y_c)s$ ". Identificando que a relação S/y_c pode ter ficado fora do intervalo válido apresentado no subitem anterior;
- "O cálculo é válido para a faixa de inclinações com ângulos entre $5,7^\circ$ e 55° ", tal como foi estudado por Ohtsu *et. al.* (2004);
- "Não ha raízes reais positivas", ao calcular o valor de d_w e da Energia residual;
- "Os resultados obtidos estão fora do intervalo estabelecido para o cálculo. Tente outros dados.";
- GOMES, J.F 2006. *Campo de pressões: condições de incipiência à cavitação em vertedouros em degraus com declividade IV: 0,75H.* 2006.

161 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.". Indicando a referência bibliográfica utilizada para a avaliação do risco de cavitação.

4.2.4 Canais em Trechos Distintos

Em *Canais em Trechos Distintos* são desenvolvidos cálculos que se limitam aos canais retangulares com trechos em degraus ou com trechos que intercalem fundo em calha lisa para um número máximo de 17 trechos. A energia residual e a profundidade final devem ser informadas pelo usuário e podem ser calculadas nos módulos anteriores de escoamento em degraus. Neste módulo podem ser obtidas a energia total e a perda de carga por trecho. A energia total pode ser obtida pelas equações (4.54) e (4.55):

$$E_{tot} = H_{dam} + 1,5 * y_c \quad (4.54)$$

$$E_{tot} = E_{res} + \Delta E \quad (4.55)$$

Em que: E_{tot} é a energia total (m).

E_{res} é a energia residual (m).

ΔE é a energia dissipada.

Exemplo 4.4: Cálculo de Canais em Trechos Distintos.

Obtenha a energia total e a perda de carga do escoamento ao longo de um canal composto por três trechos em degraus com as características apresentadas na Tabela 4.1:

Tabela 4.1 - Exemplo de canal com trechos distintos

Trechos	Prof. inicial (m)	Vazão (m ³ /s)	Largura (m)	Altura (m)	En. Residual (m)	Prof. final (m)
Trecho 01	0,77	8	2	13,3	3,04	0,57
Trecho 02	-	8	2	27,78	3,6	0,51
Trecho 03	-	8	2	38,46	4,16	0,47

Os dados de entrada são preenchidos pela janela que pode ser acessada pelo seguinte caminho: *Estruturas hidráulicas, Escoamento em Degraus e Canais com*

Trechos Distintos. A Figura 4.12 ilustra os dados preenchidos. Inicialmente, são digitados o número de trechos, a profundidade inicial e a largura final do canal a ser dimensionado. O usuário precisa clicar *Montar Tabela* para a lista de trechos ser exibida no lado direito da janela no campo *Tabela de Valores*. Em seguida, o usuário deve informar os dados de cada um dos trechos e clicar em confirmar. Ao confirmar, os dados são registrados na tabela e repetir esse processo para cada um dos trechos. Ao terminar de digitar os dados de entrada, a opção *Calcular* estará habilitada. Se algum item não for preenchido, o *SisCCoH* apresenta a mensagem “*Dados incompatíveis para a resolução do problema*”.

The screenshot shows the 'Estruturas Hidráulicas - escoamentos em Degraus - Canais com Trechos Distintos' window. It has three tabs: 'Dados de Entrada', 'Resultados', and 'Relatório'. The 'Dados de Entrada' tab is active and contains the following sections:

- Informação:** A metodologia utilizada para o desenvolvimento dos cálculos limita-se à canais retangulares com trechos em degraus ou com trechos que intercalem fundo em calha lisa e em degraus.
- Número de Trechos:**
 - Número de Trechos: 3
 - Prof. Entrada do Canal - $y_{início}$ (m): 0,77
 - Largura Final do Canal - B_{final} (m): 2
- Dados de Entrada:**
 - Número do Trecho: 3 (dropdown)
 - Vazão - Q (m^3/s): 8
 - Largura Inicial do Canal - B (m): 2
 - Altura do Trecho - H (m): 38,46
 - Energia Residual do Trecho - E_{res} (m): 4,16
 - Profundidade Final do Trecho - y_F (m): 0,47

Buttons include 'Montar Tabela', 'Limpar Tabela', 'Terminar', 'Confirmar', 'Calcular', and 'Ok'.

The **Tabela de Valores** section on the right displays the following table:

Trechos	Q (m ³ /s)	B (m)	H (m)	Eres. (m)	yF (m)
Trecho 01	8	2	13,3	3,04	0,57
Trecho 02	8	2	27,78	3,6	0,51
Trecho 03	8	2	38,46	4,16	0,47

Figura 4.12 - *Dados em canais distintos em escoamento em degraus ou calha lisa.*

A aba *Resultados* (Figura 4.13) apresenta os dados de saída do módulo. A energia total e a perda de carga são exibidas por trecho do canal. Em termos totais do canal são obtidos: a energia total, residual, profundidade final, velocidade final e o número de Froude.

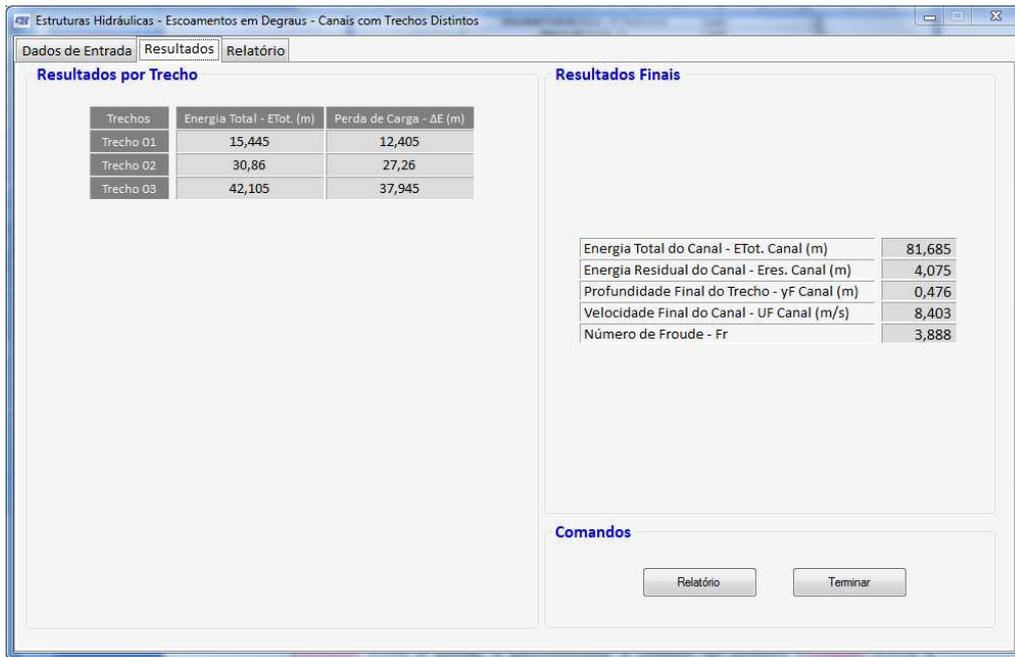


Figura 4.13 - *Resultados* de canais com trechos distintos

Em *Relatórios* (Figura 4.14) é permitida a visualização dos dados de entrada e saída, possibilitando ao usuário exportar os dados para o Excel, assim como nos outros módulos.

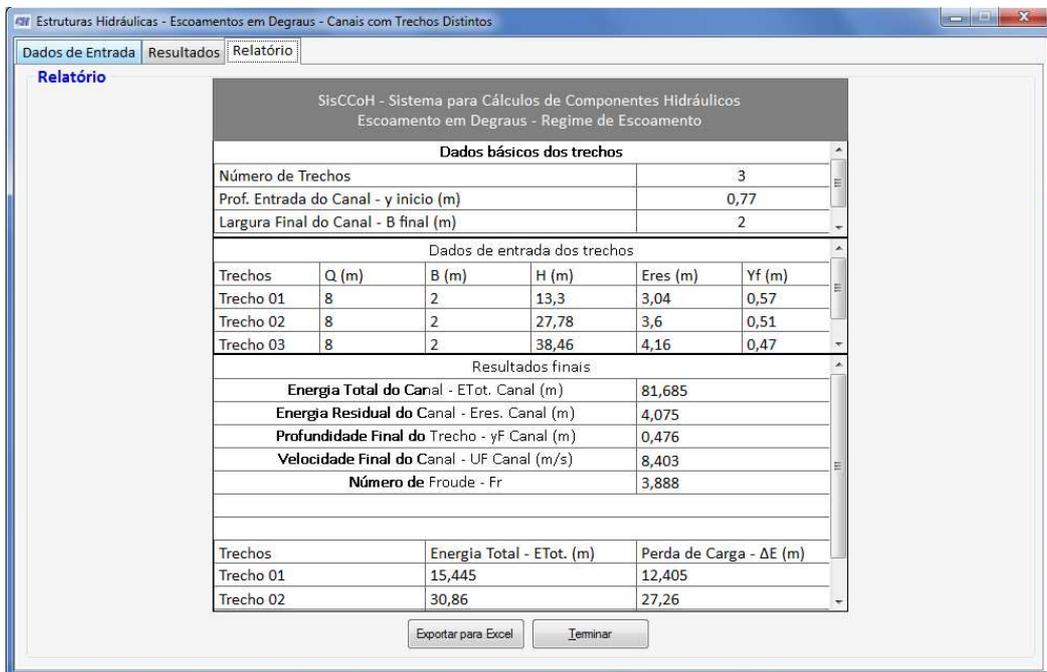


Figura 4.14 - *Relatório* em Canais com Trechos Distintos

4.2.5 Quedas Singulares

O módulo *Quedas Singulares* permite calcular o número de queda (4.23) o comprimento da queda (4.24), a profundidade anterior e posterior à queda, a profundidade a jusante do ressalto, a profundidade crítica (3.5) e o comprimento do ressalto (3.13). A profundidade anterior foi calculada pela equação (4.56):

$$y_a = S * D_N^{0,22} \quad (4.56)$$

Em que: y_a é a profundidade anterior a queda (m)

Este módulo permite avaliar apenas um degrau, contrapondo-se ao escoamento em degraus nas descidas d'água apresentados anteriormente.

Exemplo 4.5: Dimensionamento de uma queda singular.

Dada uma queda singular com vazão de $4\text{m}^3/\text{s}$, largura de 2,5 m, altura do degrau de 1,50 m e profundidade a montante de 0,85 m, obtenha o número de queda, o comprimento da queda, a profundidade anterior e posterior à queda, a profundidade crítica e o comprimento do ressalto.

A Figura 4.15 exhibe o preenchimento dos dados a esquerda e os parâmetros hidráulicos calculados pelo *SisCCoH*. Clicando no botão Visualizar é possível acessar a aba *Visualização* e *Relatório* exibidos na Figura 4.16.

Parâmetros Hidráulicos	
Número de Queda	0,077
Comprimento de Queda (m)	3,23
Prof. anterior à queda (m)	0,85
Prof. posterior à queda (m)	0,27
Prof. a jusante do ressalto (m)	1,25
Prof. crítica (m)	0,64
Comprimento do ressalto (m)	6,72

Figura 4.15 - *Dados e Resultados* de Quedas Singulares

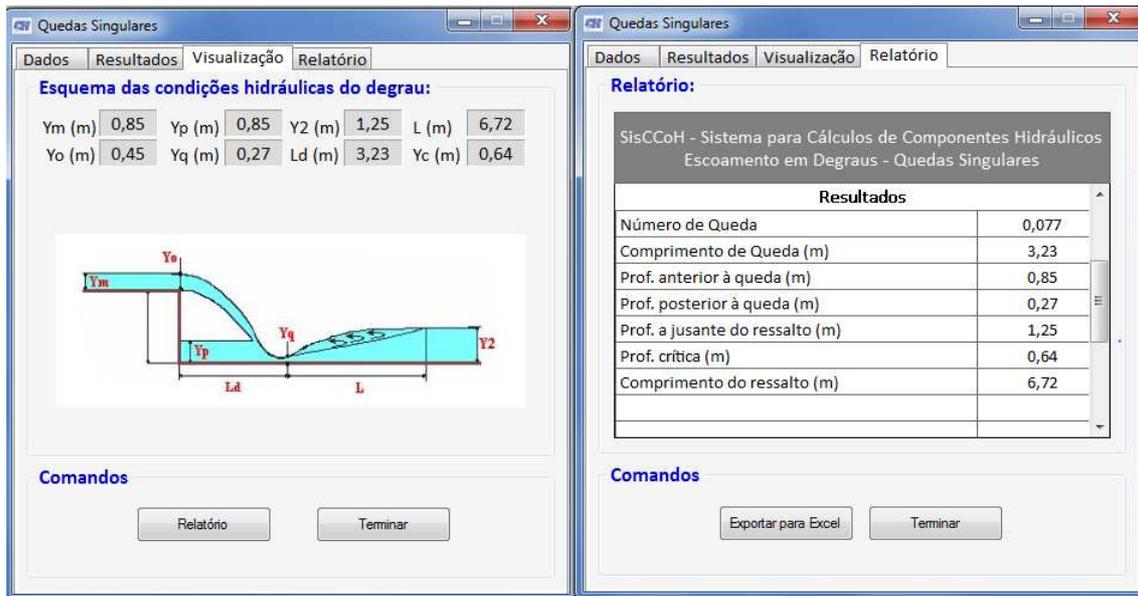


Figura 4.16 - Visualização e Relatório de Quedas Singulares.

Na aba *Visualização* é possível perceber as profundidades ao longo do perfil da linha d'água no degrau e comprimentos calculados do ressalto hidráulico.

4.3 Bacias de dissipação por Ressalto Hidráulico

O módulo *Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico* utilizou a metodologia da entidade norte-americano U.S. Bureau of Reclamation (Peterka, 1984), que propõe alguns tipos de bacias padronizadas. Nessas estruturas, ocorre a dissipação de energia por meio do Ressalto Hidráulico, com a mudança de um regime supercrítico para um subcrítico.

Inicialmente, o usuário informa a vazão, a largura e a profundidade a montante. O primeiro cálculo efetuado é o da velocidade, utilizando a equação da continuidade. E, em seguida, o número de Froude é calculado. Se os dados iniciais não estiverem preenchidos ou se apresentarem como nulos, o *SisCCoH* notifica o usuário com a seguinte informação: "Dados incompatíveis para a resolução do problema!". Se o número de Froude for menor que 1,2, o programa apresenta a seguinte notificação: "Os resultados obtidos estão fora do intervalo estabelecido para o cálculo. Tente outros dados."

A bacia é classificada como **USBR tipo I** se o Froude a montante for maior que 1,2 e menor que 2,5. A profundidade conjugada do ressalto a jusante é

aproximadamente o dobro da montante e o comprimento da bacia deve ser quatro vezes a profundidade a jusante. O cálculo da profundidade conjugada jusante (D_2) é indicado pela equação (4.57), o comprimento da bacia de dissipação (L) é indicado pela equação (4.58), a energia dissipada (ΔE) é calculada pela equação(4.59), a velocidade de saída ($U_{saída}$) é indicada pela equação (4.60), a borda livre é calculada pela equação (4.61) e a altura da parede (H_{parede}) é indicada pela equação (4.62).

$$D_2 = 2 * D_1 \quad (4.57)$$

$$L_I = 4 * D_2 \quad (4.58)$$

$$\Delta E = \frac{(D_2 - D_1)^3}{4 * D_1 * D_2} \quad (4.59)$$

$$U_{saída} = \frac{Q}{L * D_2} \quad (4.60)$$

$$borda_{livre} = 0,1 * (U_1 + D_2) \quad (4.61)$$

$$H_{parede} = borda_{livre} + D_2 \quad (4.62)$$

Em que: L_I é o comprimento da bacia de dissipação (m)

$U_{saída}$ é a velocidade de saída

H_{parede} é a altura da parede lateral.

No caso da **Bacia tipo II**, o Froude é maior que 4,5 e a velocidade próxima a 20 m/s. O valor D_1 é igual a profundidade do escoamento na entrada, o valor de D_2 é a profundidade conjugada a jusante e a profundidade de saída é 5% superior a D_2 . O comprimento L_{II} é aproximadamente 4,3 vezes D_2 .

Na **Bacia tipo III** é também utilizada para o número de Froude igual ou maior que 4,5, mas para velocidades a montante menores que 20 m/s. Por sua vez, possui comprimento (L_{III}) (adotado igual a $2,7 * D_2$) com dimensões do bloco dissipador dados por w_1 e h_1 . A Figura 4.17 mostra a bacia de dissipação tipo III, com sua configuração geométrica.

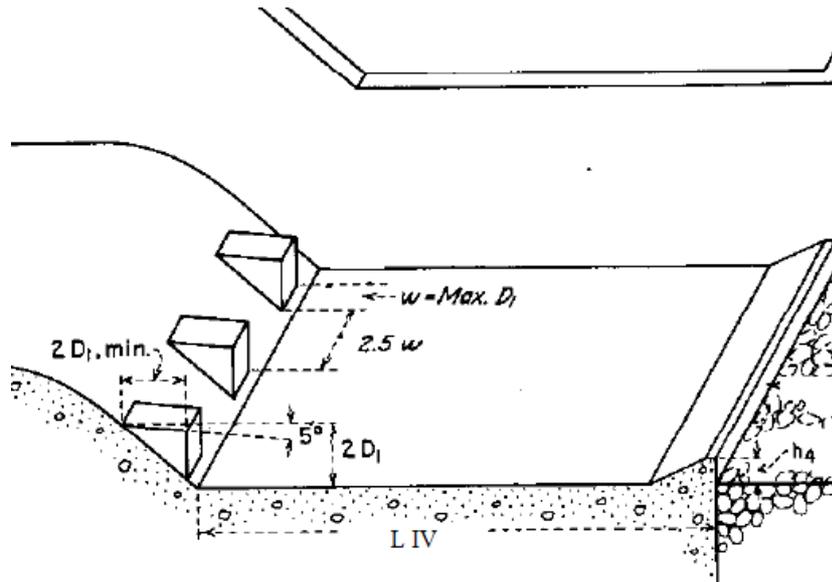


Figura 4.18 - Bacia de dissipação IV

O comprimento foi calculado pela equação (4.65) .

$$\frac{L_{IV}}{D_2} = 2,0543 \ln Fr_1 + 2,8865 \quad (4.65)$$

Em que: L_{IV} é o comprimento da bacia de dissipação (m)

D_2 é a profundidade da linha d'água na saída (m)

A seguir é exemplificada uma bacia de dissipação.

Exemplo 4.6: Dimensionamento de uma Bacia de Dissipação por Ressalto Hidráulico

Dimensione uma baia de dissipação para uma vazão de $10 \text{ m}^3/\text{s}$, com largura e profundidade a montante de, respectivamente, $2,5\text{m}$ e $0,215\text{m}$.

A Figura 4.19 ilustra a aba *Dados e Resultados* com os dados de entrada solicitados. Na aba *Resultados* verifica-se uma classificação do tipo III, com $Fr=12,81$, velocidade de entrada de $18,6 \text{ m/s}$, dentre outros valores calculados.

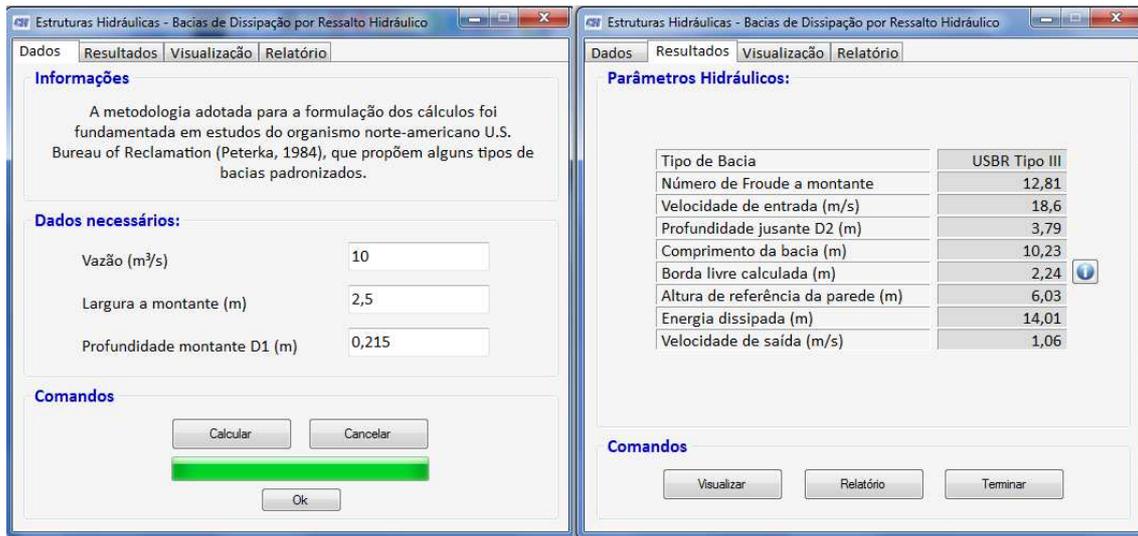


Figura 4.19 - *Dados e Resultados* de Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico

Já a Figura 4.20 exibe uma visualização em conformidade com o tipo de bacia calculado e os parâmetros para dimensionamento da bacia de dissipação.

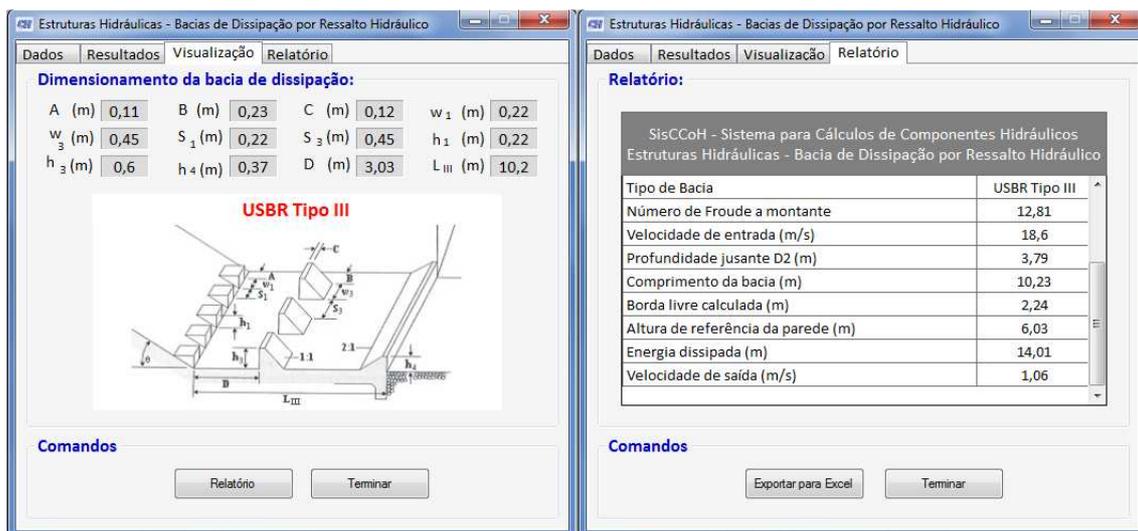


Figura 4.20 - *Visualização* de Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico

É possível visualizar o tipo de bacia calculado, bem como as principais variáveis de dimensionamento, na aba *Visualização*. Neste exemplo, a bacia foi identificada como **USBR Tipo III**.

4.4 Bacias de dissipação em enrocamento

O módulo *Bacias de Dissipação em Enrocamento* foi baseado na metodologia proposta por FHWA (2006). Esse dimensionamento baseia-se nas seguintes hipóteses:

(a) enrocamento possui pelo menos a dimensão de $2D_{50}$ ou $1,5D_{\text{máx}}$, em que $D_{\text{máx}}$ é o diâmetro máximo das pedras; (b) a relação entre profundidade da linha d'água (h_s) e o D_{50} deve ser maior que 2; (c). o comprimento da bacia de dissipação (L_s) deve ser $10h_s$ e maior ou igual a $3W_o$, sendo W_o a largura do *riprap*; (d) e o comprimento da aproximação (L_A) para o canal de saída da bacia deve ser igual a $15 h_s$ e maior ou igual a $4W_o$. Os valores de $D_{\text{máx}}$ e $D_{\text{mín}}$ foram adotados os considerados por Taylor (1973), apresentados nas equações (4.66) e (4.67):

$$D_{\text{máx}} = D_{100} = D_{50} \cdot \sqrt[3]{4}. \quad (4.66)$$

$$D_{\text{mín}} = D_0 = D_{50} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{4}}. \quad (4.67)$$

Em que: D_0 : Diâmetro mínimo ($D_{\text{mín}}$) dos grãos (m)

$D_{\text{máx}}$: Diâmetro máximo dos grãos (m)

D_{50} : Diâmetro médio dos grãos (m)

Além disso, considerou-se o comportamento similar entre grãos com formatos angulosos e arredondados. Em particular, no caso do canal a montante da bacia ter seção retangular e escoamento supercrítico, y_e será igual a profundidade de escoamento ao final do canal. Nas demais situações, a metodologia de cálculo para a profundidade a montante utilizada no programa pode ser consultada em FHWA (2006).

Para este dimensionamento são requeridos alguns dados e decisões do usuário. O usuário inicialmente deve escolher a opção *Best curve* se o regime de escoamento a jusante da bacia for supercrítico. Essa opção é recomendada, também, nos casos em que os danos causados pela falha do funcionamento da bacia forem facilmente corrigidos por meio de manutenções periódicas. Por outro lado, se o regime de escoamento a jusante da bacia for subcrítico ou as consequências de falha da estrutura forem mais severas, o usuário deve selecionar a opção *Envelope curve*. O usuário deve informar, ainda, a largura e profundidade a montante, D_{50} , a profundidade a jusante e a velocidade a montante.

Nos cálculos do *SisCCoH* determina-se o parâmetro de tailwater (C_o), obtém-se a relação h_s/y_e e verifica-se se a relação $h_s/D_{50} \geq 2$ e $D_{50}/y_e \geq 0,1$ foram atendidas. Caso os dados de entrada estiverem fora dos limites estabelecidos, escolhe-se outro valor de D_{50} .

Os valores para C_o dependem do escoamento a jusante da bacia de dissipação (*tailwater* – T_w) e os seus e respectivos cálculos podem ser examinados em (FHWA, 2006).

Calcula-se o comprimento da bacia de dissipação, o comprimento total e a espessura do revestimento. A profundidade na saída e a velocidade são determinadas comparando-se com a velocidade permitida no canal de saída. A profundidade crítica pode ser calculada iterando-se a equação (4.68):

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{[y_3(W_B + zy_3)]^3}{(W_B + 2zy_3)} \quad (4.68)$$

Em que: z : Declividade lateral (m/m)
 y_3 Profundidade na saída da bacia(m)
 W_B Espessura na saída da bacia (m)

Este módulo baseou-se na metodologia HEC 14, que por sua vez foi obtida através de estudos empíricos. Logo, as relações dispostas anteriormente são válidas para casos específicos em que sejam verificadas as seguintes expressões: $0,1 \leq D_{50}/y_e \leq 0,7$ e $h_s/D_{50} < 2$. Dessa forma, caso uma delas não seja observada, as seguintes notificações são exibidas para o usuário: "Os dados inseridos estão fora das condições de cálculo. $D_{50}/y_e < 0,1$. Tente outro D_{50} !"; "Os dados inseridos estão fora das condições de cálculo. $D_{50}/y_e > 0,7$. Tente outro D_{50} !"; e, "Os dados inseridos estão fora das condições de cálculo. $h_s/D_{50} < 2$. Tente outro D_{50} !".

Exemplo 4.7: Dimensionamento de Bacia de Dissipação em Enrocamento

Determine uma bacia de enrocamento utilizando o ajuste de curva para a condição de jusante do tipo *Envelope Curve*. Sabe-se que a largura a montante é 2,44 m, profundidade a montante igual 1,22 m, o diâmetro médio do enrocamento (D_{50}) é 0,55m, o nível de água a jusante (T_w) é igual a 0,85 m e a velocidade a montante é igual a 7,63 m/s.

A Figura 4.21 apresenta os dados preenchidos na janela *Estruturas hidráulicas – Bacias de Dissipação*. Neste módulo são apresentadas algumas mensagens ao usuário referente à bibliografia utilizada, às particularidades da aplicação das curvas de ajuste e à premissa adotada quando o regime é supercrítico. Depois de preenchidos os dados de

entrada e selecionando o botão calcular, caso tenha sido satisfeitas as relações D_{50}/y_e e h_s/D_{50} , o *SisCCoH* abre a aba *Resultados*, indicada Figura 4.22.

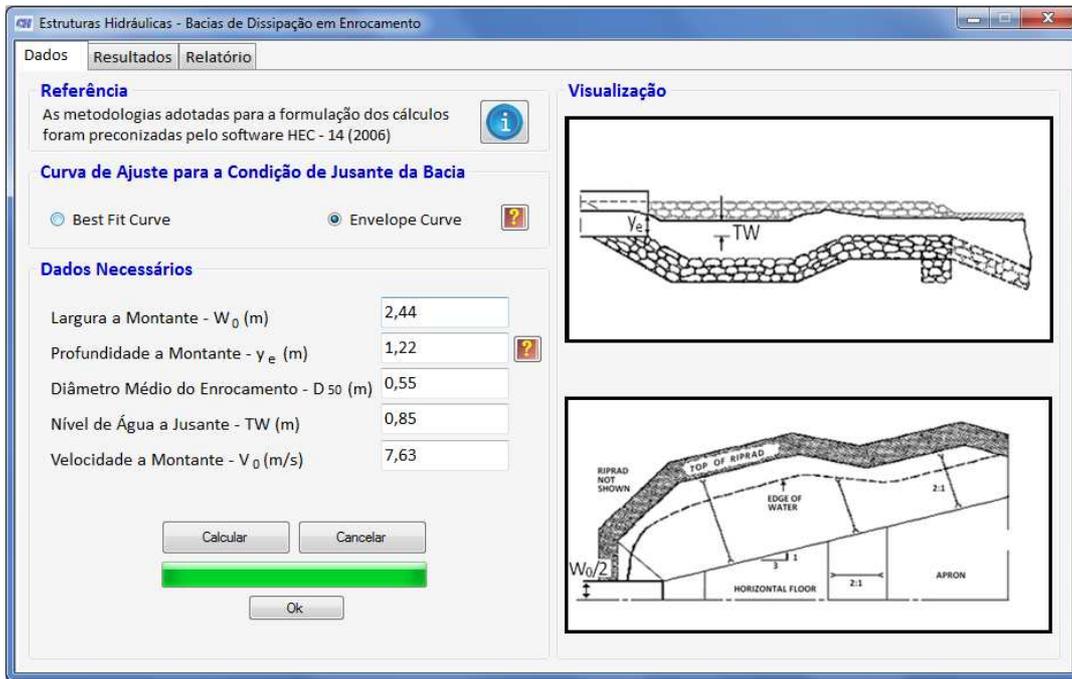


Figura 4.21 - *Dados* do módulo Bacias de dissipação em Enrocamento.

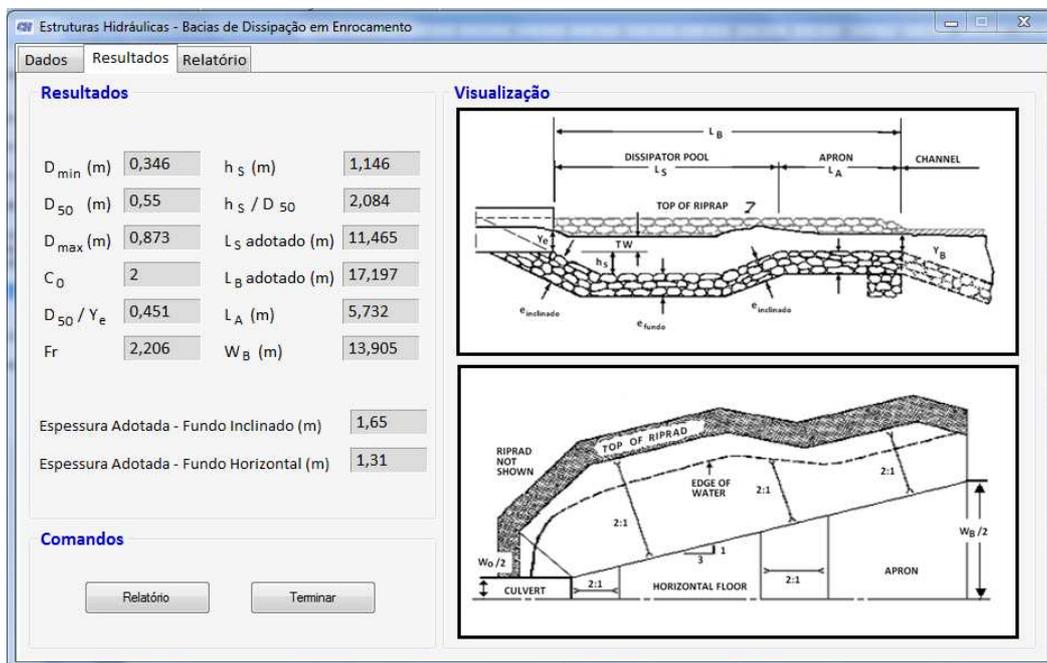


Figura 4.22 - *Resultados* do módulo Bacias de dissipação em Enrocamento

Na Figura 4.22 são apresentados, à esquerda, os parâmetros do dimensionamento da bacia de dissipação e à direita um modelo esquemático apresentando o posicionamento de cada uma das dimensões na estrutura.

5 SINGULARIDADES

5.1 Confluência de Canais

Neste módulo é calculado o perfil da linha d'água nos canais em confluência. São calculados, ainda, a largura máxima da zona de separação (b_s), a largura interna da confluência (b_c) e o coeficiente de contração ($\mu = b_c/B_3$). A Figura 5.1 indica os principais parâmetros de uma confluência de canais.

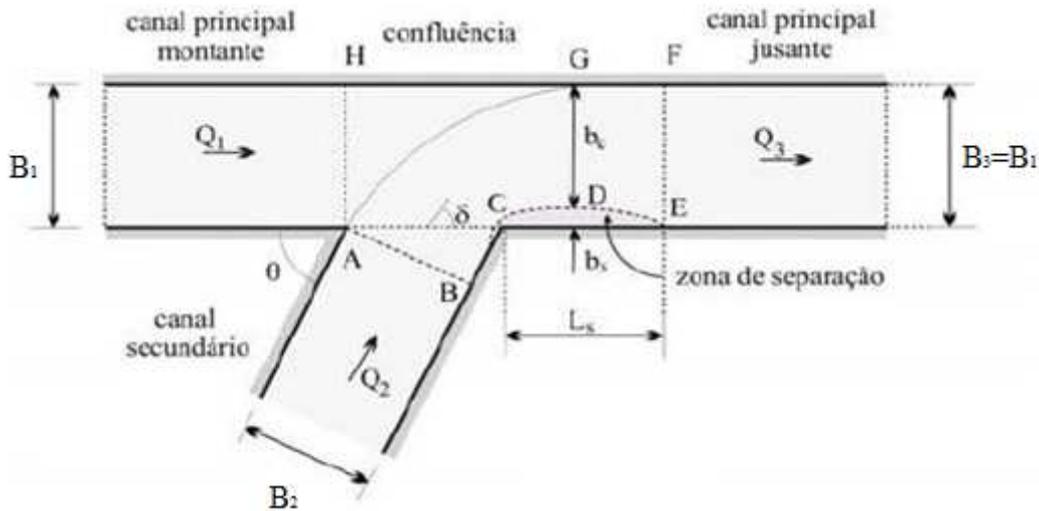


Figura 5.1 - Esquema da Dinâmica do Escoamento nas Confluência

Para as confluências com escoamento fluvial, o *SisCCoH* utiliza o cálculo da relação $y_1/y_3 = y_2/y_3 = N_y$ pelas metodologias de Taylor (1944), Gurrum (1997), Hsu *et al.* (1998) e Coelho (2003), respectivamente apresentadas nas equações (5.1) a (5.4). Estas equações possibilitam verificar o aumento da profundidade a montante da junção da confluência e os índices 1, 2 e 3 correspondem aos trechos do canal principal e secundário a montante e ao canal de jusante, respectivamente.

$$N_y^3 - (1 + 2 Fr_3^2) N_y + 2 Fr_3^2 [N_q^2 (1 + \cos \theta) - 2 N_q + 1] = 0 \quad (5.1)$$

$$N_y^3 - (1 + 2 Fr_3^2) N_y + 2 Fr_3^2 [(1 - N_q)^2 + N_q \cos \delta] = 0 \quad (5.2)$$

$$N_y^3 - \left(1 + 2 \frac{\beta_3}{\alpha_3} Fr_3^2\right) N_y + 2 \frac{\beta_3}{\alpha_3} Fr_3^2 (1 - N_q)^2 + N_q^2 \cos \theta = 0 \quad (5.3)$$

$$\left[1 + \frac{B_2}{B_3} \cos \delta (1 - f^2)\right] N_y^3 + (1 - 2 \beta_3 Fr_3^2) N_y^2 + 2 \beta_1 Fr_3^2 (1 - N_q)^2 + 2 \beta_2 Fr_3^2 \frac{B_3}{B_2} N_q^2 \cos \delta = 0 \quad (5.4)$$

Em que: N_q é a razão entre Q_2 e Q_3
 N_y é a razão entre y_1 e y_2
 Q_1 vazão no canal principal antes da confluência (m^3/s)
 Q_2 vazão no canal secundário antes da confluência (m^3/s)
 Q_3 vazão no canal após a confluência (m^3/s)
 θ é o ângulo formado entre o canal primário e o secundário ($^\circ$)
 δ , é o ângulo médio entre as linhas do escoamento secundário e principal, igual a $0,85 \theta$ (Gurram, 1997).
 α é o coeficiente de *Coriolis*
 β é o coeficiente de *Boussinesq*
 f é um coeficiente adimensional proposto por Coelho (2003).

Para uma confluência com escoamento fluvial a jusante, Coelho (2003) verifica quatro casos que definem os valores do coeficiente f : (1) quando o escoamento é fluvial a montante e a jusante ($f = 0,92$); (2) quando o escoamento é supercrítico apenas no canal secundário a montante ($f=1,02$); (3) quando é supercrítico apenas no canal a montante principal ($f = 0,95$); ou (4) quando o escoamento é torrencial em todos os trechos a montante da confluência ($f = 1,01$).

A formulação utilizada para o cálculo dos coeficientes de *Boussinesq* foi baseado na Tabela 5.1, (Coelho, 2003):

Tabela 5.1 - Cálculo dos coeficientes de *Boussinesq*

β	$Fr < 1$	$1 < Fr < 1,5$	$Fr > 1,5$
β_1	$0,38 (1 - N_q) + 0,13 Fr_1 + 0,98$	$3,82 - 1,92 Fr_1$	1,00
β_2	$0,38 (N_q) + 0,13 Fr_2 + 0,98$	$3,82 - 1,92 Fr_2$	1,00
β_3	$1,36 + 0,13 Fr_3$	$3,82 - 1,92 Fr_3$	1,00

Caso ocorra uma transição de regime, N_y é calculado seguindo as metodologias de Ramamurthy *et al.* (1988), Hager (1989) e Kumar (1993).

As equações (5.5) a (5.7) foram propostas por Ramamurthy *et al.* (1988).

$$\alpha_3 = 1,25 + 0,5N_q \quad , \text{para } 0,23 \leq N_q \leq 0,6 \quad (5.5)$$

$$\frac{\beta_3}{\alpha_3} = 1 - 0,24N_q \quad , \text{para } 0,23 \leq N_q \leq 0,6 \quad (5.6)$$

$$N_y^3 + (0,48N_q - 3)N_y + \frac{1 - N_q}{0,63 + 0,25N_q} = 0 \quad (5.7)$$

Alternativamente, o programa também apresenta os resultados de N_y conforme formulação de Hager (1989) que são calculadas no programa pelas equações (5.8) e (5.9).

$$N_y = 1 + 0,92 \left\{ (0,1 + N_q) \left[(1 - N_q) + N_q \left[\text{sen} \left(\frac{\theta}{2} \right) \right]^{\frac{3}{2}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5.8)$$

Em que:

$$N_y = \frac{y_{cr1}}{y_{cr2}} = \frac{y_{cr2}}{y_{cr3}} \quad (5.9)$$

Além dos resultados de N_y , obtidos nessas equações, o programa também obtém N_y conforme estudos de Kumar (1993), pela equação (5.10):

$$N_y^3 - 3N_y + 2[(1 - N_q)^2 + N_q^2 \cos \theta] \quad (5.10)$$

No caso do regime de transição é verificado pelas equações (5.11) a (5.13), formulada por Christodoulou (1993), a formação de ressalto hidráulico na junção.

$$\left(1 + \frac{Q_2}{Q_1} \right)^{\frac{4}{3}} - a_2 \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^{\frac{4}{3}} \geq a_1 \quad (5.11)$$

Em que:

$$a_1 = \frac{(1 + 2Fr_1^2)\mu^{\frac{1}{3}}}{Fr_1^{\frac{4}{3}}(3 + f \cos \theta \frac{b_2}{b_1})} \quad (5.12)$$

$$a_2 = \frac{2 \left(Fr_2^2 \frac{b_1}{b_2} \right)^{\frac{1}{3}} \mu^{\frac{1}{3}} \left(1 + \frac{f}{2Fr_2^2} \right) \cos\theta}{\left(3 + f \cos\theta \frac{b_2}{b_1} \right)} \quad (5.13)$$

Já em confluências com escoamentos torrenciais os cálculos foram baseados em Schwalt e Hager (1995). A Figura 5.2 apresenta um esboço da confluência de dois canais em regimes torrenciais.

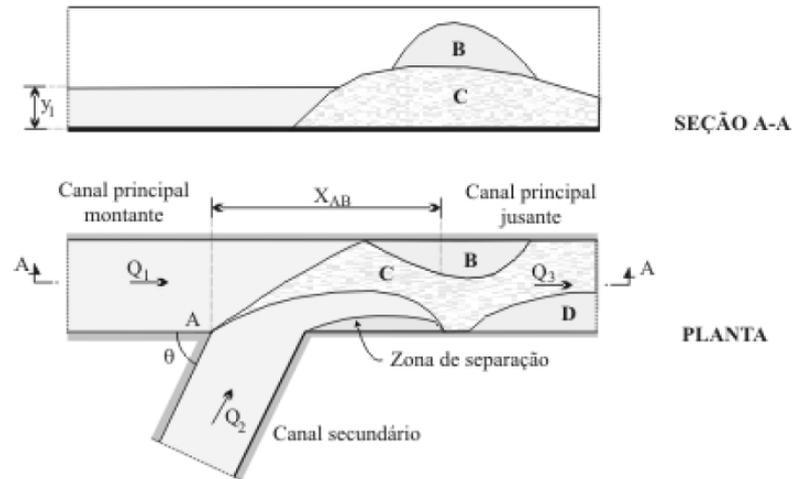


Figura 5.2 - Esquema da junção de dois escoamentos torrenciais

Na metodologia adotada pelo *SisCCoH* é considerada a razão (Y) entre as alturas das lâminas d'água do canal principal (y_1) e secundário (y_2). A profundidade máxima $y_{\text{máx}}$ é calculada pela equação (5.14), e a distância do ponto A, do encontro dos canais, ao ponto final da zona de separação X_{AB} , é calculada pela equação (5.15), segundo Schwalt e Hager (1995).

$$y_{\text{máx}} = \sqrt{y_1 y_2} \left[2 + 1,08 \left(\frac{Fr_1 Fr_2}{Fr_1 + Fr_2} \right)^2 \right] \quad (5.14)$$

$$X_{AB} = \frac{1,65 b_1}{0,55 + 0,05\theta} \left(\frac{Fr_1}{Fr_2^{1/3}} \right) Y^{\frac{2}{3}} \quad (5.15)$$

As condições da interrupção do regime torrencial estão apresentadas nas seguintes relações:

$\theta < 15^\circ \Rightarrow A=0$; $\theta > 15^\circ \Rightarrow A=2$; $\theta < 38^\circ \Rightarrow B=0$; $\theta > 38^\circ \Rightarrow B=1$; $15^\circ < \theta < 38^\circ$ e $b_1=b_2 \Rightarrow Fr_p=3$. Quando Fr_1 e Fr_2 forem superiores a Fr_p (número de Froude após o estreitamento) o escoamento é rigorosamente torrencial.

Exemplo 5.1: Dimensionamento de uma Confluência de Canais

Dimensione uma confluência de canais em que as larguras dos canais de montante e jusante são iguais a 6m, a declividade dos canais é igual a 0,005 m/m, ângulo de junção é de 45° , o coeficiente de rugosidade é igual a 0,02, a vazão do canal principal a montante (Q_1) é igual a $60 \text{ m}^3/\text{s}$ e a vazão no canal secundário a montante (Q_2) é igual a $40 \text{ m}^3/\text{s}$.

A Figura 5.3 exemplifica a entrada de dados neste módulo, na região *Dados Necessários*. Na região a direita *Tabela de Valores* é possível visualizar os valores digitados.

Dados necessários:

Especificação do Canal: Principal Jusante

Vazão - Q_3 (m^3/s): 100

Largura do Canal - b_3 (m): 6

Declividade - I_3 (m/m): 0,005

Coefficiente de Rugosidade λ : 0,02

Tabela de Valores

	Canal 1	Canal 2	Canal 3
Q (m^3/s)	60	40	100
b (m)	6	6	6
I (m/m)	0,005	0,005	0,005
Coef. Rugos	0,02	0,02	0,02

Figura 5.3 - *Dados* da Confluência em Canais Retangulares

Após digitar os dados para cada canal é necessário confirmar os valores digitados e, após preenchidos todos os dados, basta clicar em calcular. A região *Imagem*

mostra uma ilustração com os detalhes da geometria em planta e em uma seção AA na confluência do canal.

Após clicar em calcular, o *SisCCoH* calcula a profundidade em cada um dos trechos pela equação de Manning, o número de Froude e então, utiliza as equações apresentadas anteriormente para o cálculo do N_y para determinar a profundidade a jusante da junção.

A Figura 5.4, a seguir, apresenta os resultados calculados pelo programa, permite ao usuário escolher a relação N_y , calcula a profundidade na confluência e calcula o perfil da linha d'água.

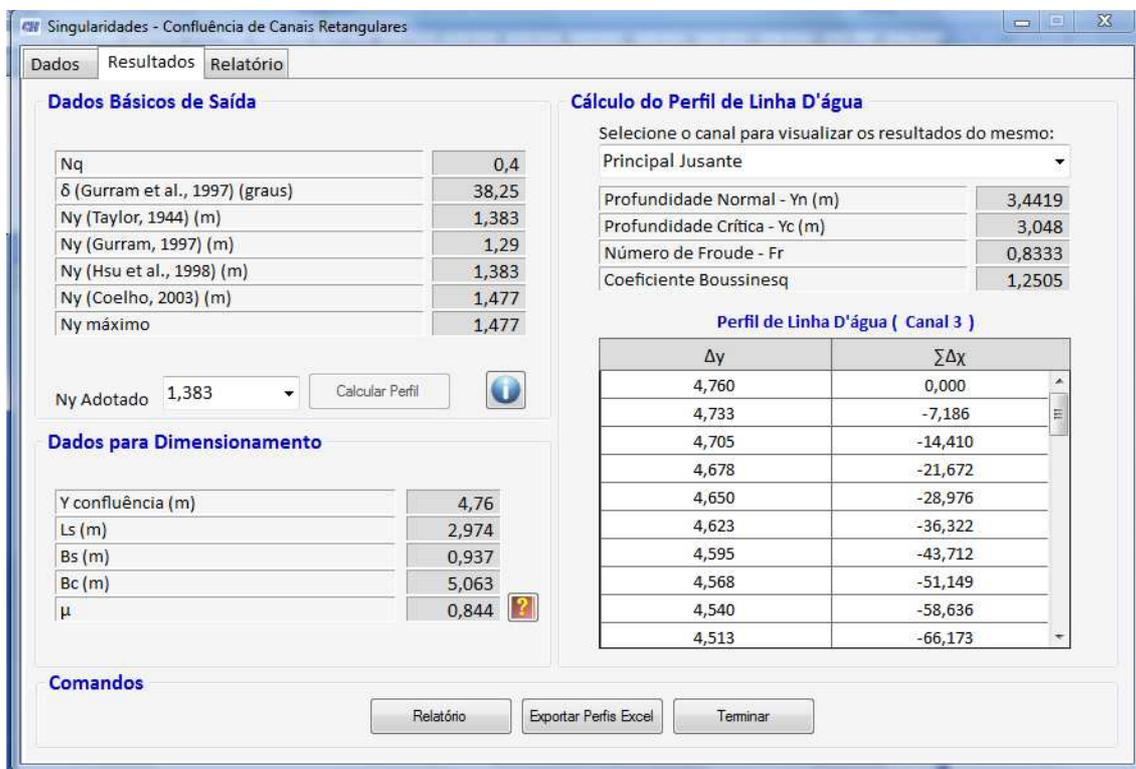


Figura 5.4 - Resultados da Confluência em Canais Retangulares

Por fim, a aba *Resultados* também permite o acesso ao Relatório, a exportação para o Excel ou finalizar o módulo de Confluência, retornando ao menu principal.

5.2 Curvas em Canais

No cálculo do escoamento em curvas de canais, é calculada a altura da superelevação para o escoamento subcrítico e supercrítico para canais retangulares e trapezoidais, baseado nas formulações de Los Angeles Country Flood Control District

(1982), este em especial para cálculos da sobrelevação em canais trapezoidais e em estudos de Chow (1959) para cálculo de pontos da sobrelevação, em particular, para o regime supercrítico ($Fr > 1$).

As principais equações utilizadas para o cálculo do regime subcrítico e supercrítico de canais retangulares estão apresentadas nas equações (5.16), desenvolvida por Los Angeles Country Flood Control District (1982), e (5.17), de Chow (1959).

$$\Delta y_{sub,ret.} = \frac{U^2 * B}{2 * g * r_c} \quad (5.16)$$

$$\Delta y_{super,ret.} = \frac{U^2 * B}{g * r_c} \quad (5.17)$$

Em que: $\Delta y_{sub,ret.}$ é a sobrelevação máxima, caso regime a montante seja subcrítico para canais retangulares (m).

$\Delta y_{super,ret.}$ é a sobrelevação máxima, caso regime a montante seja subcrítico para canais retangulares (m).

U é a velocidade do fluxo em (m/s)

B é a largura no topo do canal (m)

g é a aceleração da gravidade (m/s²)

r_c é o raio no eixo central da curva (m)

Já para canais trapezoidais, é utilizado um fator de segurança adicional de 1,15 para escoamento fluvial ou 1,30 para torrencial e o cálculo foi baseado nas equações (5.18) e (5.19) (Los Angeles Country Flood Control District, 1982).

$$\Delta y_{sub,trap.} = 1,15 \frac{U^2 * B}{2 * g * r_c} \quad (5.18)$$

$$\Delta y_{super,trap.} = 1,30 \frac{U^2 * B}{g * r_c} \quad (5.19)$$

Em que: $\Delta y_{sub,trap.}$ é a sobrelevação máxima, caso regime a montante seja subcrítico para canais trapezoidais (m).

$\Delta y_{super,trap.}$ é a sobrelevação máxima, caso regime a montante seja subcrítico para canais trapezoidais (m).

A profundidade final foi calculada pela soma da profundidade normal e a sobrelevação. Para determinar as regiões prováveis com perturbações no escoamento associadas à curva no canal, foi adotada a metodologia sugerida por Los Angeles

Country Flood Control District (1982) que é apresentada na Figura 5.5. Essa figura mostra um trecho de comprimento $2L'$, seguido pelo comprimento do trecho circular, e por fim por um trecho retilíneo tangente.

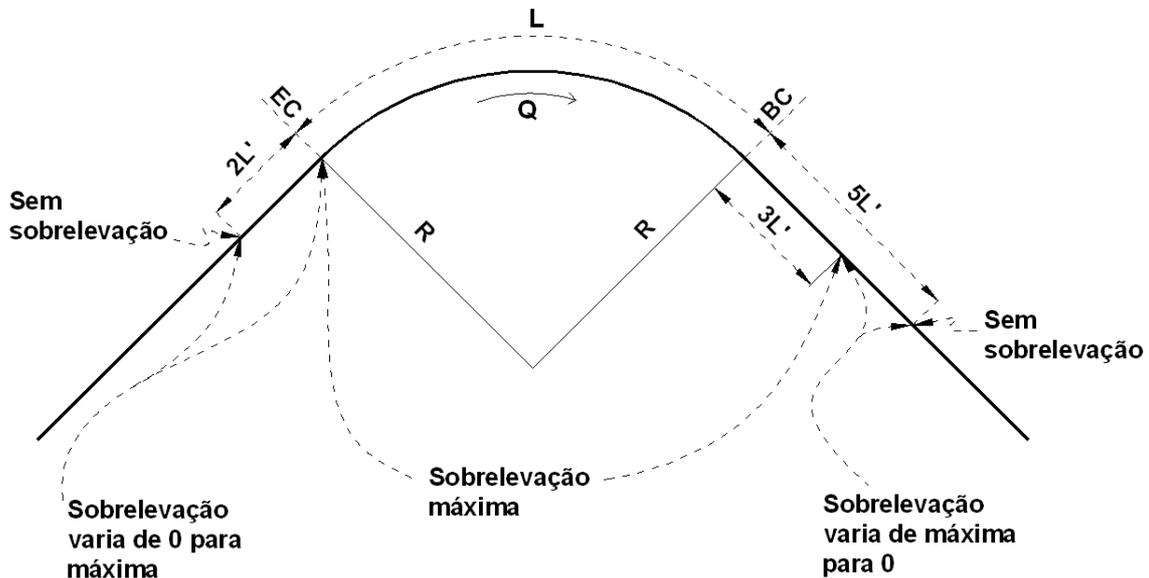


Figura 5.5 - Comprimento de trecho com sobrelevação.

O segmento iniciado em BC, com comprimento igual a $5L'$, finaliza o trecho da sobrelevação. O comprimento L' depende do ângulo de onda β , que por sua vez, depende do número de Froude a montante da curva, e podem ser calculados pelas equações (5.20) e (5.21).

$$L' = B/\text{TAN}(\beta) \quad (5.20)$$

$$\beta = \text{sen}^{-1}(Fr) \quad (5.21)$$

Em que: L' semitreacho linear a montante (m).

β ângulo de onda ($^{\circ}$)

Após o cálculo da altura da sobrelevação, caso o regime seja supercrítico e o canal retangular, o *SisCCoH* caracteriza o fenômeno da formação de ondas oblíquas ao longo do canal com um trecho em curva. Conforme apresentado por Chow (1959) é utilizada a equação (5.22) para a obtenção do ângulo interno da curva (θ) que determina arcos formados entre os pontos da sobrelevação máxima e da profundidade mínima do fluxo no canal.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2B}{(2 * r_c + B) * \tan \beta} \quad (5.22)$$

Em que: θ é o ângulo interno que delimita os pontos máximos e mínimos da onda (°)

β ângulo de onda (°)

A Figura 5.6 ilustra os pontos que demarcam os trechos com profundidades máximas e mínimas das ondas ao longo do trecho em curva.

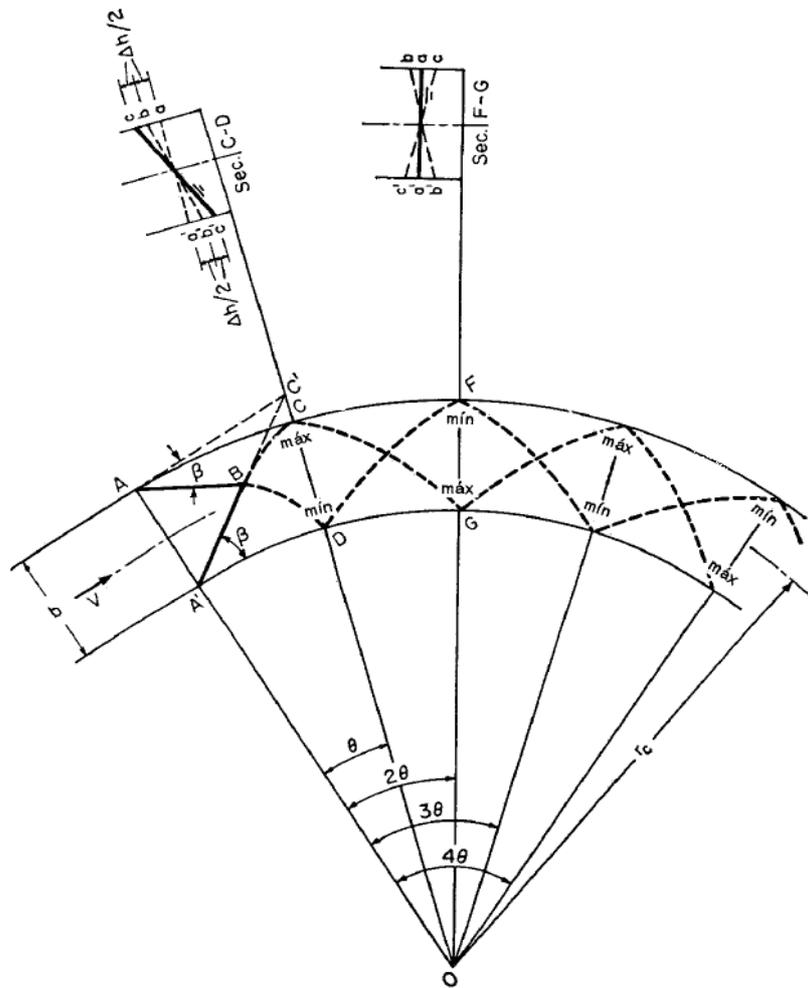


Figura 5.6 - Ondas oblíquas em um trecho de canal em curva

Esse resultado é apresentado no *SisCCoH* na aba *Pontos da Elevação* para canais retangulares. A seguir, será apresentada uma aplicação do *SisCCoH* no dimensionamento de canais em curva.

Exemplo 5.2: Dimensionamento de um trecho de canal em curva

Dimensione um canal retangular em curva de largura igual a 25m, com profundidade de escoamento no início da curva de 0,56m, com velocidade inicial de 7,10 m/s, com número de Froude a montante de 3,02 e raio de curvatura do eixo do canal igual a 50m.

A Figura 5.7 exhibe a janela entrada de dados, à esquerda e a altura da sobrelevação do canal em curva, à direita.

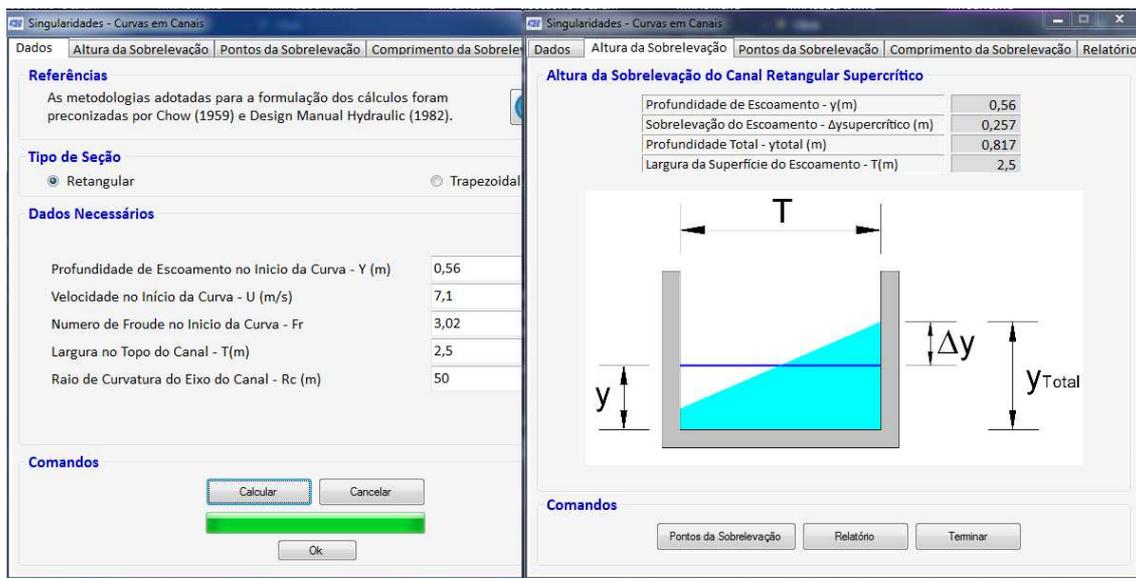


Figura 5.7 - *Dados e Altura da Sobrelevação de Curvas em Canais*

Como o número de Froude é maior que 1, os pontos da sobrelevação são calculados e mostrados na Figura 5.8.

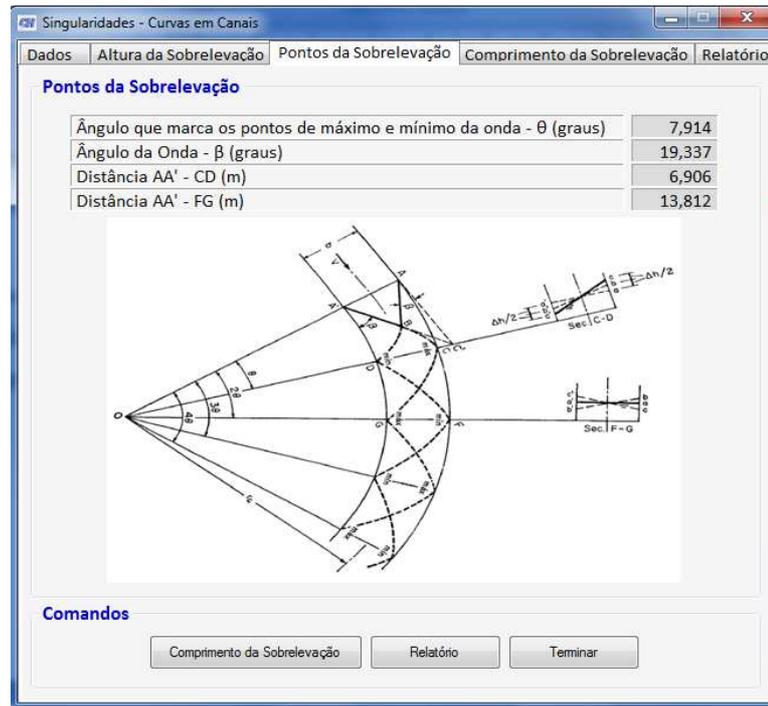


Figura 5.8 - *Pontos de sobrelevação* de Curvas em Canais

Na Figura 5.9 são mostrados os resultados do SisCCoH, sendo que à esquerda apresenta-se o posicionamento do ângulo que delimita os pontos de máximo e mínimo da onda e, à direita, o cálculo do comprimento da sobrelevação

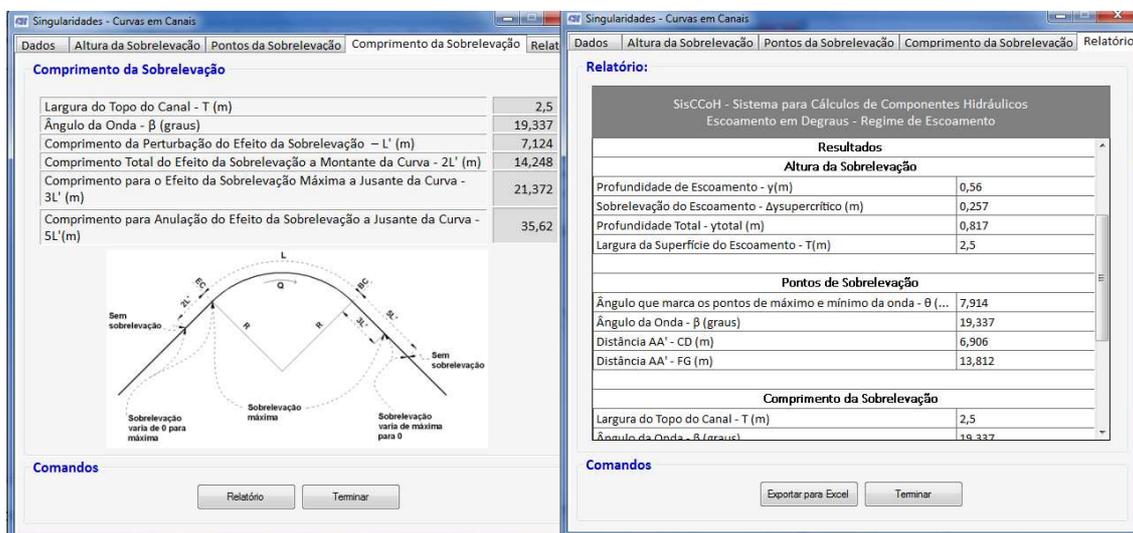


Figura 5.9 - *Comprimento da Sobrelevação e Resultados* de Curvas em Canais

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABT, S. R.; THORNTON C. I; GALLEGOS, H. A; ULLMANN, C. M. Round-Shaped Riprap Stabilization in Overtopping Flow. *Journal Hydraulic Engineering*, v. 134(8), p. 1035-1041, 2008.
- ABT, S. R.; WITTLER, R. J.; RUFF, J. D.; LAGRONE, D. L.; KHATTAK, M. S.; NELSON, J. D.; HINKLE, N. E.; LEE, D. W. Development of riprap design criteria by riprap testing in flumes: Phase I. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C-NUREG/CR-4651, v. 1, 1987a.
- ABT, S. R.; WITTLER, R. J.; RUFF, J. D.; LAGRONE, D. L.; KHATTAK, M. S.; NELSON, J. D.; HINKLE, N. E.; LEE, D. W. Development of riprap design criteria by riprap testing in flumes: Phase II. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C-NUREG/CR-4651, v. 2, 1987b.
- ABT, S. R.; JOHNSON, T. L. Riprap design for overtopping flow. *Journal Hydraulic Engineering*, v. 117(8), p. 959-972, 1991.
- BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P. *Fundamentos de Engenharia Hidráulica – 3a. d.rev. e ampl. – Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010. 473 p.*
- CHANSON, H. State of the art of the hydraulic design of stepped chute spillways. *Hydropower and Dams Journal*. P. 33-42, 1994.
- CHOW, V. T. *Open-Channel Hydraulics*. McGraw – Hill Book, 1959. 680 p.
- CHAUDHRY, Hanif. *Open-Channel Flow*. 2a edição. - Editora: Spriner, 2008. P.279-283.
- CHRISTODOULOU, G. C. Incipient hydraulic jump at channel junctions. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE. v. 119, n. 3, p.409-421, mar. 1993.
- COELHO, M. M. L. P. *Comportamento hidráulico em confluência de canais: uma abordagem conceitual e experimental*. Tese, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, 271p, 2003.

- Design Manual Hydraulic. Los Angeles Country Flood Control District. 1982.144 p
- FHWA. Federal Highway Administration. US Department of Transportation. HEC-14 (Hydraulic Engineering Circular nº 14). Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels. 3ª edition, 2006.
- GOMES, J.F 2006. Campo de pressões: condições de incipiência à cavitação em vertedouros em degraus com declividade IV: 0,75H. 2006. 161 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre."
- GREATER, C. A. Supercritical flow through a junction. La Houille Blanche. 8, p. 693-695. 1968.
- GURRAM, K. S., KARKI, K. S., HAGER, W. H. Subcritical junction flow. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. v. 123, n. 5, p. 447-455, mai., 1997.
- HAGER, W. H. Discussion: Separation zone at open-channel junctions. Proc. ASCE Journal of Hydraulic Engineering. v. 113, HY4, p. 539-543, 1987.
- HAGER, W. H. Transitional flow in channel junctions. Proc. ASCE Journal of Hydraulic Engineering. v.115, n. 2, p. 243-259, fev 1989.
- HAGER, W. H. Supercritical flow in channel junctions. Proc. ASCE Journal of Hydraulic Engineering. v.115, n. 5, p. 595-616, mai, 1989.
- HSU, C., WU, F., LEE, W. Flow at 90o equal-width open-channel junction. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. v. 124, n. 2, p. 186-191. 1998.
- HSU, C., LEE, W., CHANG, C. Subcritical open-channel junction flow. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. v. 124. n. 8, p. 847-855, 1998.
- KHATSURIA, R. M. Hydraulics of spillways and energy dissipators. Marcel Dekker, New York, 95 – 124, 2005.
- KUMAR, S.G. Transitional flow in channel junctions. Journal of Hydraulics Research, ASCE. v. 31, n. 5, p. 601-604, 1993.

- OHTSU, I.; YASUDA, Y.; TAKAHASHI, M. Flow characteristics of skimming flow in stepped channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 130, p. 880-869, 2004.
- PETERKA, A. J. *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators*. 8ª reimpressão. Denver: Bureau of Reclamation, 1984. 225 p.
- PINHEIRO, A. N. *Estruturas Hidráulicas - Obras de Dissipação de Energia*. Instituto Superior Técnico: Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura - Seção de Hidráulica e Recursos Hídricos e Ambientais, 2006. 28 p. Disponível em: <https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/133426/1/obras%20de%20dissipacao%20de%20energia_EH_2006.pdf>.
- RAMAMURTHY, A. S., CARBALLADA, L. B. & TRAN, D. M. Combining open channel flow at right angled junctions. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE. v. 114, n. 12, p.1449-1460, dez. 1988.
- SCHWALT, M., HAGER, W. H. Experiments to supercritical junction flow. *Experiments in fluids*. n. 18, p. 425-437, 1995.
- TAYLOR, E. H. Flow characteristics at rectangular open-channel junctions. *Transactions ASCE*. v. 109. p. 893-912, 1944.
- TAYLOR, K. *Slope Protection on Earth and Rockfill Dams*. 11º Congresso das Grandes Barragens. Madrid.
- YASUDA, Y.; TAKAHASHI, M.; OHTSU, I. Energy dissipation of skimming flows on stepped –channel chutes. 29th IAHR Congress, Beijing, 2001.

ÍNDICE REMISSIVO

- A**
 área molhada, 24, 3, 5
- B**
 Bacias de dissipação, 44, 49, 51, 52
 Bueiros, 18
- C**
 Condutos Forçados, 9, 14
 confluência de canais, 10, 14, 16, 53, 57, 65
 Confluência de Canais, 14, 53, 57
 Coriolis, 6, 8, 12, 54
 crítica, 3, 4, 6, 3, 4, 6, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 18, 19, 23, 24, 27, 31, 35, 36, 38, 43
 Crítico, 3, 4
 curvas, 16, 6, 11, 51, 58
 Curvas em Canais, 14, 58
- D**
 declividade crítica, 6
 degraus, 4, 9, 10, 14, 9, 22, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 31, 32, 33, 36, 39, 40, 41, 43, 65
 Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, 2, 9
- E**
 energia dissipada, 27, 28, 40, 45
 energia específica, 5
 enrocamento, 10, 14, 16, 15, 16, 17, 49, 50
 escoamento bruscamente variado, 9, 8
 escoamento crítico, 3
 escoamento em degrau, 16, 40
 escoamento gradualmente variado, 9, 5, 7
 escoamento uniforme, 9, 14, 23
 Escoamentos Livres, 14, 23, 7, 9
 Estruturas hidráulicas, 14, 41, 51
- L**
 linha d'água, 5, 6, 7, 8, 13, 31, 44, 46, 49, 53, 58
- M**
 Manning, 21, 23, 24, 25, 6, 7, 15, 16, 17, 58
 máxima eficiência, 16, 21, 22
 método de Newton-Raphson, 6
- N**
 Nappe Flow, 14, 16, 22, 23, 24, 25, 27, 28, 29, 30, 31
 número de Froude, 24, 25, 5, 9, 10, 12, 14, 27, 35, 41, 44, 45, 58, 60, 62
- P**
 perda de carga, 3, 17, 18, 19, 20, 9, 10, 14, 20, 40, 41
 Pimenta de Ávila Consultoria, 15
 profundidade conjugada, 9, 10, 12, 13, 32, 45
 profundidade hidráulica, 24
- R**
 Ressonância, 14, 9, 44, 45, 47, 48
 ressalto hidráulico, 16, 8, 10, 11, 13, 14, 15, 24, 28, 31, 32, 33, 44, 55
riprap, 49, 64
- S**
 seção circular, 22, 12
 seção retangular, 21, 25, 2, 9, 10, 12, 49
 seção trapezoidal, 12, 17
 Seções Regulares, 14, 23, 7, 9
 Singularidades, 14
SisCCoH, 1, 9, 10, 12, 14, 15, 16, 17, 19, 21, 22, 24, 25, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 16, 18, 19, 22, 23, 31, 35, 41, 43, 44, 51, 53, 56, 58, 60, 61, 63
 Skimming Flow, 3, 5, 14, 16, 22, 23, 24, 25, 26, 31, 33, 34, 36, 37, 39, 40
software, 9, 10, 6, 9, 12, 16, 33
- T**
 transição, 14, 8, 14, 22, 23, 24, 55
- U**
 Uniforme, 23
- V**
 Vazão admissível, 4, 5, 18, 19, 20
 velocidade, 17, 19, 24, 25, 3, 5, 9, 10, 12, 17, 18, 19, 27, 35, 36, 38, 41, 44, 45, 47, 50, 59, 62
 Velocidade, 5, 14, 17, 18, 19, 18, 19, 20