

# **Dimensionamento Hidrológico e Hidráulico de Passagens Hidráulicas Assistido por Computador**

Francisco Paulos Martins  
Eng. Civil, Assistente do 1º Triénio  
Dep. de Engenharia Civil, ESTV  
3500 Viseu, Portugal

António Nascimento Pinheiro  
Eng. Civil, Professor Auxiliar  
Dep. de Engenharia Civil, IST  
1096 Lisboa Codex, Portugal

José Antunes Carmo  
Eng. Civil, Professor Auxiliar  
Dep. de Engenharia Civil, FCTUC  
3049 Coimbra Codex, Portugal

## **Resumo**

Apresenta-se um programa de cálculo automático desenvolvido com o objectivo de dimensionar passagens hidráulicas e estimar o respectivo custo (programa HIDROPAS).

Referem-se os critérios de determinação de caudais de cheia implementados no programa, salientando os mais divulgados em Portugal no domínio das passagens hidráulicas rodoviárias. Relativamente ao dimensionamento hidráulico da conduta, descrevem-se os tipos de escoamento no aqueduto, referindo os critérios utilizados pelo programa. Apresentam-se as três soluções para dissipação de energia a jusante consideradas pelo programa: enrocamentos de protecção e bacias de dissipação por ressalto dos tipos PWD e WES. Finalmente, apresenta-se o módulo de estimativa de custo.

Incluem-se organigramas do programa e dos módulos de determinação do caudal de cheia, de dimensionamento hidráulico e de estimativa de custo.

**Palavras Chave:** Passagem Hidráulica, Caudal de Ponta de Cheia, Aqueduto, Dissipação de Energia.

## **1. Introdução**

O elevado número de vias de comunicação construídas nos últimos anos implicou a construção de grande número de atravessamentos de linhas de água, sendo muitos deles passagens hidráulicas sob aterros.

Tem-se constatado que entre as causas mais frequentes de rupturas e deteriorações em vias de comunicação, se contam as devidas a problemas com passagens hidráulicas. Esta lacuna decorre quer da deficiente determinação do caudal de dimensionamento, quer ainda do inadequado dimensionamento hidráulico da passagem, com ênfase para a obra de dissipação de energia a jusante.

No âmbito da elaboração da dissertação de mestrado do primeiro autor, com orientação do outros dois autores, foi efectuada uma revisão bibliográfica e uma análise de projectos de passagens hidráulicas que permitiu, por um lado, constatar a diversidade de critérios utilizados, principalmente no que se refere à determinação do caudal de dimensionamento, e identificar os critérios de dimensionamento mais utilizados em Portugal e em alguns países estrangeiros. Estes critérios foram incluídos no programa de cálculo automático de dimensionamento hidrológico e hidráulico de passagens hidráulicas (programa HIDROPAS).

Uma passagem hidráulica é essencialmente constituída por estrutura de entrada, conduta, frequentemente designada por aqueduto, estrutura de saída e, eventualmente, estrutura de dissipação de energia. O programa HIDROPAS integra critérios de dimensionamento para cada uma destas componentes das passagens hidráulicas.

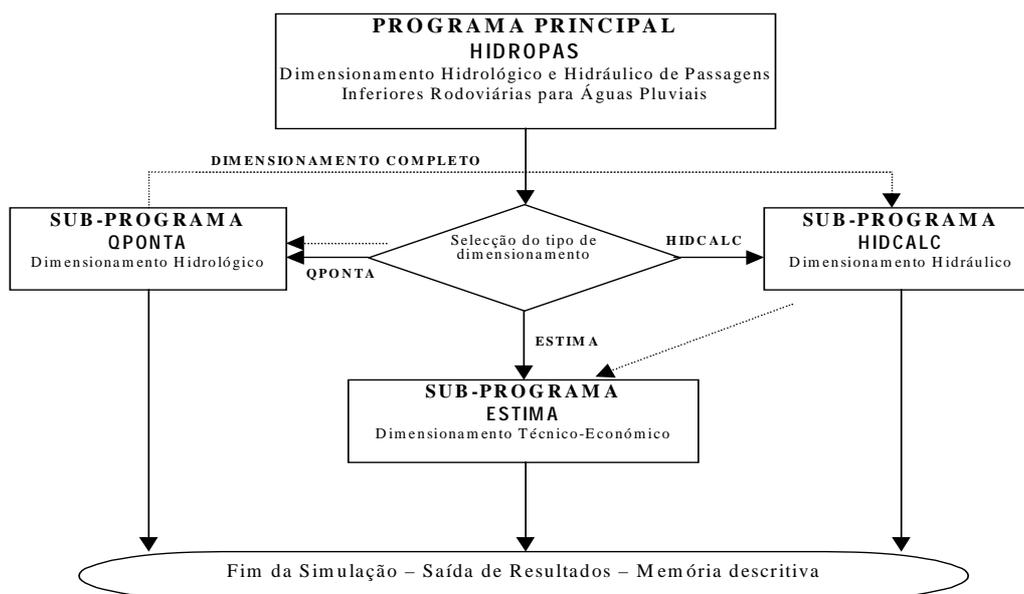
Na alínea seguinte apresenta-se o programa HIDROPAS, desenvolvendo-se nas alíneas subsequentes a apresentação sumária dos módulos de determinação do caudal de ponta de cheia (QPONTA), de dimensionamento hidráulico do aqueduto (HIDCALC) e de estimativa de custo da passagem hidráulica (ESTIMA). Para cada um destes, referem-se os critérios utilizados no programa.

No final apresentam-se considerações sobre o dimensionamento das passagens hidráulicas e a forma como a utilização do programa poderá facilitar e melhorar tal dimensionamento.

## **2. Programa HIDROPAS**

### **2.1 Módulo principal**

Na Figura 1 apresenta-se o fluxograma sumário do programa HIDROPAS, desenvolvido em FORTRAN para ambiente Windows.



**Figura 1 – Programa de cálculo automático HIDROPAS. Fluxograma sumário.**

O programa integra três módulos principais, referidos na Introdução, permitindo a leitura interactiva dos dados de entrada e saída de resultados.

## 2.2 Determinação do caudal de ponta de cheia. Módulo QPONTA

### 2.2.1 Considerações gerais

No caso das passagens hidráulicas, o estudo hidrológico para definição do caudal de dimensionamento limita-se, na generalidade dos casos, ao cálculo de caudais de ponta de cheia, na medida em que não existe amortecimento da cheia a montante das mesmas e não é, portanto, necessário determinar a forma dos hidrogramas.

O objectivo do módulo QPONTA é a determinação do caudal de ponta de cheia em bacias hidrográficas de pequena dimensão, como o são as bacias das passagens hidráulicas. Este módulo, para além de permitir o cálculo do caudal de ponta de cheia pelo método que o utilizador considere mais conveniente, permite efectuar uma análise comparativa entre os valores obtidos com os diferentes métodos implementados no programa.

Os critérios de dimensionamento utilizados são os que, de acordo com a análise bibliográfica, mostraram ser mais habituais em projectos de passagens hidráulicas rodoviárias, bem como outros que se considerou serem adequados para efeitos comparativos, quer para análise de projectos já efectuados, quer a nível de novos estudos a desenvolver no âmbito da dissertação de mestrado que se encontra em elaboração.

### 2.2.2 Caudais de ponta de cheia

A determinação dos caudais de ponta de cheia pode ser efectuada por métodos empíricos, cinemáticos e estatísticos. No caso de passagens hidráulicas, raramente se dispõe





- $h_0$  - parâmetro que depende da altura de água a jusante (m);
- $L$  - comprimento do aqueduto (m);
- $S_0$  - inclinação da soleira de aqueduto.

Se a altura de água à saída estiver acima do bordo superior do aqueduto,  $T_w \geq D$ , deverá considerar-se  $h_0 = T_w$ . Caso contrário deve considerar-se o maior dos valores  $h_0 = T_w$  ou  $h_0 = (h_c + D)/2$ , em que  $h_c$  é a altura crítica do escoamento no aqueduto.

De acordo com as alturas de água a montante e a jusante e as características geométricas das passagens hidráulicas, consideram-se seis tipos diferentes de escoamentos através de aquedutos, cujas principais características se apresentam na Tabela 1.

**Tabela 1 – Escoamentos em aquedutos. Tipos e características.**

Referência do escoamento	Tipo de escoamento	Controle do escoamento	$H_w / D$	$T_w / D$	$T_w / h_c$
<b>I</b>	Superfície livre	Montante	$< 1,5$	$\leq 1,0$	$< 1,0$
<b>II</b>	Superfície livre	Jusante	$< 1,5$	$\leq 1,0$	$< 1,0$
<b>III</b>	Superfície livre	Jusante	$< 1,5$	$\leq 1,0$	$> 1,0$
<b>IV</b>	Sob pressão	Jusante	$> 1,0$	$> 1,0$	-
<b>V</b>	Superfície livre	Montante	$\geq 1,5$	$\leq 1,0$	-
<b>VI</b>	Sob pressão	Jusante	$\geq 1,5$	$\leq 1,0$	-

### 2.3.2 Dimensionamento hidráulico dos aquedutos

O método mais divulgado para dimensionamento hidráulico de aquedutos é o proposto pelo U. S. Bureau of Public Roads (Herr e Bossey, 1965). Este método tem sido preconizado pelos Serviços Técnicos da BRISA e da JAE, sendo também aconselhado pela AASHTO (??????????? POR EXTENSO) e SETRA (??????????? POR EXTENSO).

Determina-se  $H_w$  considerando o controle quer a montante quer a jusante. O maior dos valores determina a secção de controle do escoamento. Estão publicados ábacos para as duas situações de dimensionamento.

Não sendo viável a utilização de ábacos no programa HIDROPAS, o método de dimensionamento hidráulico implementado baseia-se no cálculo dos escoamentos com superfície livre e dos escoamentos sob pressão, em conformidade com o exposto na Tabela 1. Nos escoamentos com superfície livre, considera-se o escoamento gradualmente variado e recorre-se à integração do teorema de Bernoulli por diferenças finitas, considerando a fórmula de Manning–Strickler para cálculo das perdas de carga. Nos escoamentos em pressão determinam-se as perdas de carga, recorrendo à fórmula de Colebrook-White para determinação da perda de carga contínua.

O módulo *HIDCALC*, que permite considerar aquedutos de secção circular ou rectangular, tem o fluxograma que consta da Figura 4.

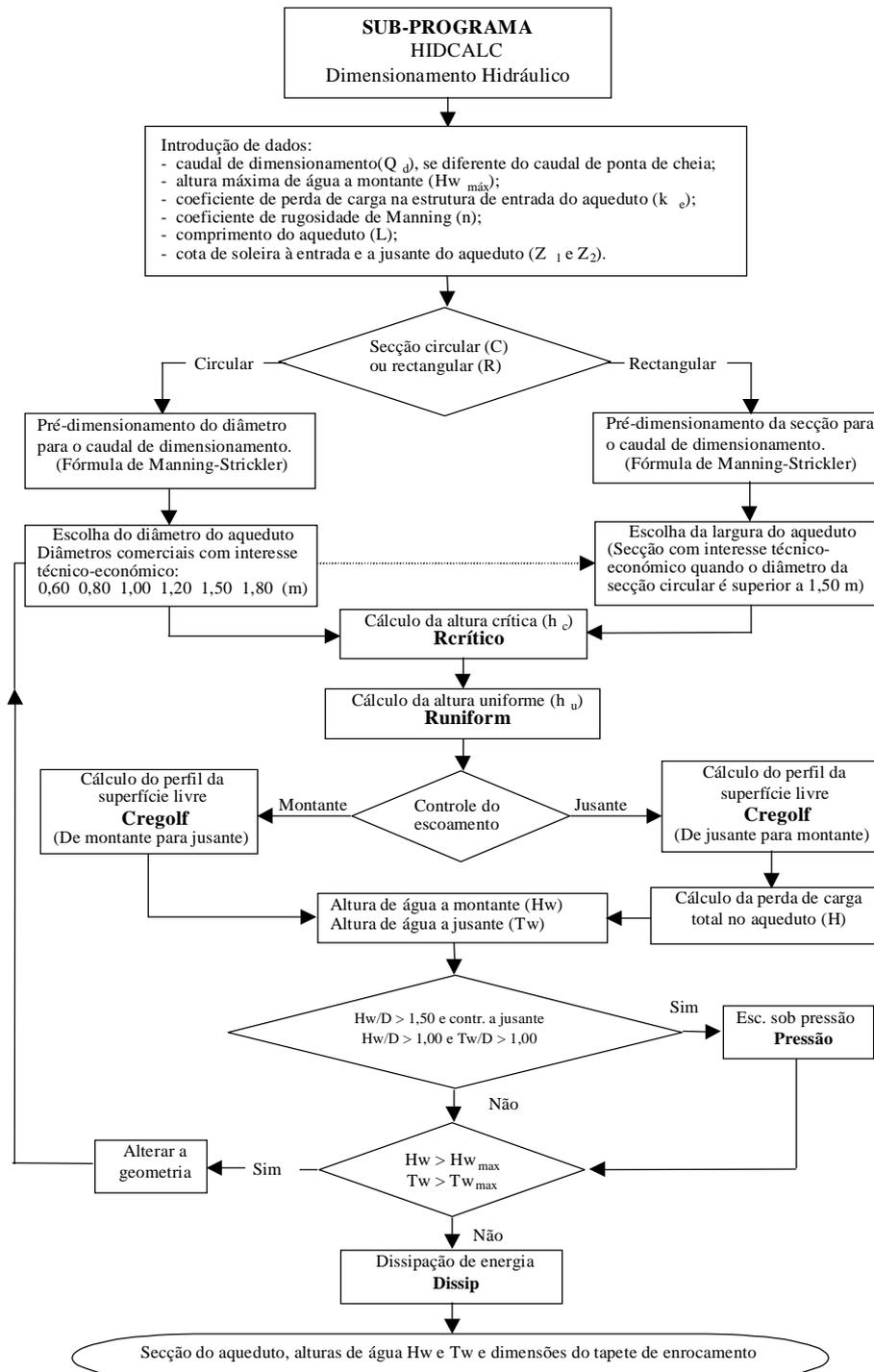


Figura 4 – Módulo HIDCALC. Fluxograma.

### 2.3.3 Dissipação de energia

#### 2.3.3.1 Considerações prévias

O módulo HIDCALC inclui o dimensionamento hidráulico da estrutura de dissipação de energia a jusante, sempre que a velocidade de escoamento e as condições locais assim o aconselhem. Presentemente, o programa considera três possibilidades para dissipação de energia: enrocamento de protecção e bacias de dissipação de energia por ressalto dos tipos PWD e WES. Prevê-se a inclusão a breve prazo de outras estruturas de dissipação de energia.

#### 2.3.3.2 Enrocamentos de protecção

Para velocidades inferiores a 4,5 m/s, para evitar a ocorrência de erosões a jusante da estrutura de saída de aquedutos, poderá utilizar-se um enrocamento de protecção, cuja extensão é função da velocidade do escoamento. O programa HIDROPAS efectua o dimensionamento do enrocamento de protecção de acordo com os critérios apresentados e analisados em (Samora, 1993):

- O diâmetro da pedra a colocar no tapete de enrocamento, para escoamentos com elevada intensidade de macroturbulência pode ser calculado por

$$D_{50} = \frac{V^2}{24} \quad (2.2)$$

em que  $D_{50}$  (m), é diâmetro do enrocamento correspondente a 50% sobre a curva granulométrica e  $V$ , a velocidade do escoamento à saída do aqueduto (m/s).

- No que respeita às relações entre  $D_{50}$  e os diâmetros mínimo e máximo ( $D_0$  e  $D_{100}$ ), adoptou-se o critério proposto por (Taylor, 1973), segundo o qual o bloco máximo e o bloco mínimo deverão pesar, respectivamente, o quádruplo e um quarto do peso do bloco mediano. Admitindo que o peso dos blocos é proporcional ao cubo do diâmetro, obtém-se:

$$\frac{D_{100}}{D_{50}} = \sqrt[3]{4} \cong 1,58 \quad (2.3)$$

$$\frac{D_0}{D_{50}} = \sqrt[3]{\frac{1}{4}} \cong 0,63 \quad (2.3a)$$

- A espessura do tapete de enrocamento é  $1,5D_{100}$ .

#### 2.3.3.3 – Bacias de dissipação de energia

Para velocidades de escoamento à saída dos aquedutos superiores a cerca de 4,5 m/s, não é aconselhável a utilização de enrocamentos de protecção, devido às dimensões do enrocamento a utilizar, devendo utilizar-se estruturas de dissipação de energia em betão, tais

como bacias de dissipação por ressalto hidráulico, por impacto, estruturas com degraus e estruturas em gabiões.

O programa HIDROPAS permite o dimensionamento de duas bacias dissipação de energia por ressalto bastante utilizadas em passagens hidráulicas: bacia tipo PWD, desenvolvida pelo Public Works Department da Austrália (Argue, 1961), e bacia tipo WES, desenvolvida pelo United States Corps of Engineers (Fletcher e Grace, 1972).

## 2.4 Estimativa de custo. Módulo ESTIMA

### 2.4.1 Considerações gerais

O módulo ESTIMA permite efectuar uma estimativa de custo de uma passagem hidráulica, incluindo as estruturas de entrada, saída e obra de dissipação de energia. Na Figura 5 apresenta-se um fluxograma resumo do modelo ESTIMA.

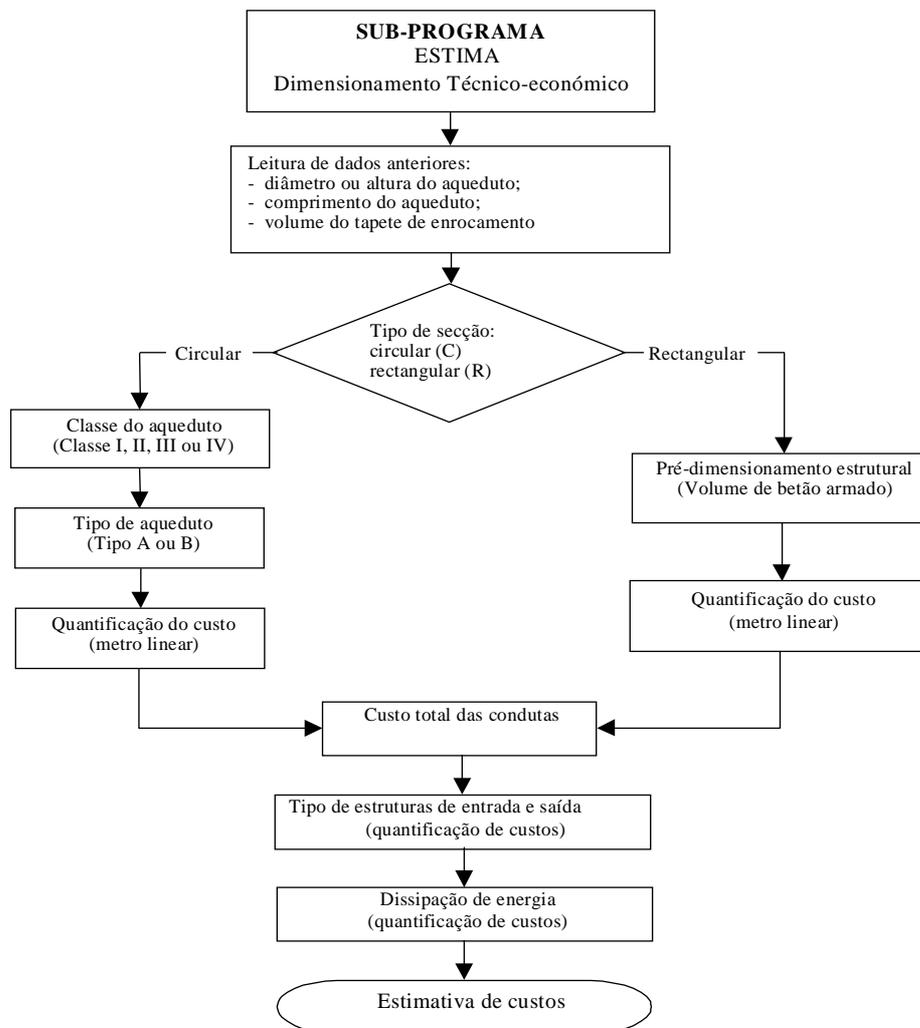


Figura 5 –Módulo ESTIMA. Fluxograma.

### **2.4.2 Estimativa de custo**

Para elaborar a estimativa de custo de uma passagem hidráulica, são avaliadas as quantidades de trabalhos mais significativas e, posteriormente, multiplicadas pelos preços unitários considerados.

As quantidades de trabalho são avaliadas com base nas características da secção transversal, no comprimento, condições de implantação, estrutura de entrada e de saída e estrutura de dissipação de energia a jusante.

Para a estimativa de custo de passagens hidráulicas, consideram-se as seguintes quantidades de trabalho:

- comprimentos de condutas de betão para cada classe e diferentes diâmetros comerciais;
- volume de betão armado (B25, A400 NR), a utilizar na execução de aquedutos de secção rectangular, em estruturas de entrada e saída e em estruturas de dissipação de energia;
- volume de betão (B20) a utilizar no assentamento de aquedutos do tipo B;
- volume do tapete de enrocamento a jusante a estrutura de saída;
- volume de escavação para implantação da passagem hidráulica.

Os preços unitários utilizados baseiam-se em valores praticados recentemente em obras similares.

### **3. Considerações Finais**

1. A análise bibliográfica mostrou serem de aplicação corrente em Portugal diversos métodos de determinação de caudais de ponta de cheia em bacias hidrográficas de passagens hidráulicas, referidos na alínea 2. O de maior divulgação deverá ser o baseado na fórmula racional.
2. Os resultados dos diferentes métodos nem sempre são similares, pelo que, em casos de aplicação, uma análise comparativa de diversos métodos se julga necessária.
3. Neste contexto, a automatização dos procedimentos de cálculo de diversos métodos torna-se aconselhável face ao elevado número de passagens hidráulicas a que o traçado das vias de comunicação obriga.
4. Os diferentes tipos de escoamento apresentados na alínea 2.3 poderão obrigar a cálculos trabalhosos, pelo que também neste domínio se justifica a elaboração de um programa de cálculo automático que permita analisar diversas soluções.
5. Consideração idêntica se justifica para as obras de dissipação de energia que, frequentemente, são requeridas a jusante dos aquedutos.

6. O programa de cálculo automático HIDROPAS, elaborado no âmbito da dissertação de mestrado que o 1º autor se encontra a elaborar sob orientação dos restantes autores, permite dar resposta ao exposto nas considerações anteriores. Permite ainda, elaborar para cada uma das soluções consideradas a respectiva estimativa de custo.
7. O programa HIDROPAS constitui assim um instrumento simultaneamente potente e expedito de dimensionamento técnico-económico de passagens hidráulicas, sendo também passível de utilização extensiva de modo a obter resultados gerais aplicáveis em fases de pré-dimensionamento. Esses resultados, que serão apresentados na dissertação de mestrado do 1º autor, deverão permitir, entre outros aspectos, uma análise prévia expedita dos custos de diferentes soluções de passagens hidráulicas.

### **Bibliografia**

Argue, O. R. (1961), Stilling Basins and Energy Dissipation, Proc. Am. Soc. Civil Engineers symposium. Series 5, June, p.19-33.

Bodhaine, G. L. (1976), Measurement of Peak Discharge at Culvert by Indirect Methods., Techniques of water Resources Investigations of United States Geological Survey, Book 3, Chapter A3, U.S. Geological Survey.

BRISA (1974), Normas Gerais de Projecto para as Auto-Estradas Portuguesas, Tomo V, Norma 7-Drenagem, Auto-Estradas de Portugal.

David, J. M. S. (1976), Drenagem de Estradas, Caminhos de Ferro e Aeródromos, Estudos Hidrológicos, LNEC.

Fletcher, O. P. e Grace, O. L. (1972), Pratical Guidance for Estimating and Controlling Erosion at Culvert Outlets, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Miscellaneous Paper H-72-5, Vicksburg.

Kirpich, Z. P. (1940), Time of Concentration of small Agricultural Watersheds, Civ. Eng., vol. 10, no. 6, p. 362.

Lencastre, A e Franco, F. M. (1992), Lições de hidrologia, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia.

Samora, M. M. (1993), Utilização de Enrocamentos como Protecção contra a Erosão de Canais, Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Hidráulica e recursos Hídricos. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.

Soil Conservation Service (1973), A Method for Estimating Volume and Rate of Runoff in Small Watersheds, U. S. Department of Agriculture, Washington.

Taylor, K. (1973), Slope Protection on Earth and Rockfill Dams, 11° Congreso das Grandes Barragens, Madrid.

U. S. Department of Transportation (1997), Hydraulics Manual, Environmental and Engineering Service Center, Federal Highway Administration, Washington D. C.