

XI SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE CANAIS PELO CRITÉRIO DE CUSTO GLOBAL

*Thiago Borges Ortega*¹; *José Rodolfo Scarati Martins*².

RESUMO – Neste trabalho discute-se o dimensionamento otimizado de canais trapezoidais considerando o critério de custo global. Considera-se um modelo matemático de dimensionamento de canal, para condição de escoamento do tipo unidimensional, fluvial e permanente, em terreno natural, sendo a seção otimizada pelo critério de custo global, composto pelos custos de implantação (motorização, movimentação de terra e revestimento) e manutenção (conservação e operação, contabilizada através da perda de energia), e para verificação da sua eficácia foi feita comparação de resultados para uma situação hipotética com outro modelo de diferente base conceitual.

As variáveis analisadas foram o revestimento (custo, espessura, coeficiente de Manning), a vazão, a declividade de fundo do canal, a vida útil do empreendimento, a taxa de juros, as seções topográficas (com horizontes geotécnicos), e o resultado contempla a largura de fundo e consequentemente a altura da seção.

ABSTRACT– In this paper is discussed the optimal design of trapezoidal channels considering the criterion of overall cost. It is considered a mathematical model for designing open channels for the condition of one-dimensional and steady flow, and the section is optimized by the criterion of total cost, composed by the costs of implementation (engine, excavation, landfill, lining) and maintenance (maintenance and operation, accounted for by the loss of energy), and to assess their effectiveness was made comparison of results for a hypothetical situation with a different conceptual basis model.

The variables analyzed were the lining (cost, thickness, Manning's coefficient), flow, the channel bottom's slope, the project lifetime, interest rates, topographic sections (including geotechnical data), and the result includes the width and consequently the height of the section.

Palavras-Chave – Otimização não linear. Canais Trapezoidais. Custo Total.

INTRODUÇÃO

Canais são estruturas amplamente utilizadas pela humanidade há milhares de anos, porém o estudo de seção ótima somente pôde se desenvolver a partir da evolução da engenharia hidráulica, através do conhecimento das leis que governam o escoamento.

1 Duke Energy International – Engenharia Civil e Segurança de Barragens. Rod. Chavantes / Ribeirão Claro, km 10 – CEP 18970-000 – Chavantes, SP – Brasil. Telefone: (14) 33429057 Fax: (14) 33429095. thiago.ortega@duke-energy.com

2 Universidade de São Paulo, Escola Politécnica. Av. Prof. Almeida Prado No. 83 Edif. Engenharia Civil Depto Hidráulica - Cidade Universitária - CEP 05508-900 - Sao Paulo, SP - Brasil. Telefone: (11) 30915581 Fax: (11) 30915423. scarati@usp.br.

O estudo de otimização de canais trata da maneira mais eficiente de conduzir a água, que é um recurso natural de crescente importância e escassez e como, de maneira geral, canais apresentam vida útil elevada e operação intensa, seu dimensionamento tem recebido importantes contribuições ao longo dos últimos 50 anos.

O desenvolvimento de novas ferramentas de cálculo também influenciou o estudo de otimização, pois facilitou a exploração de modelos matemáticos, indispensáveis em casos de otimização não linear, dando agilidade à execução dos cálculos.

Como em canalizações normalmente a perda de carga pode atingir valores relevantes, um importante ajuste feito no modelo de otimização de canal proposto é a consideração da perda de energia, cujo custo é indiretamente calculado como sendo função da perda de carga.

A otimização visando mínimo custo de construção, manutenção e operação é explorada por diversos autores, sendo o estudo de Carriaga *et al* (1999) o mais abrangente sobre os elementos que incidem no valor total de um canal. Das (2008) acrescentou na análise de orçamento um estudo de probabilidade de ocorrência que é bastante útil para consideração dos riscos de falha e deve ser usado quando se deseja uma seção econômica.

Outro fator bastante relevante no projeto de seções econômicas é a altura de *freeboard* ou borda livre, que é a altura adicional acrescentada na seção transversal para diversas finalidades, dentre as quais a acomodação de ondas, recalques e até mesmo composição paisagística e segurança hidrológica. Frequentemente adota-se uma altura fixa acima da lâmina d'água, porém quando se deseja uma seção otimizada, deve-se estudar o efeito do *freeboard* tanto em função da vazão quanto em função da profundidade (Loganathan, 1999).

Carriaga (2000) também acrescentou à modelagem de seção otimizada de canal o estudo de canais com múltiplos trechos que, devido a diferenças de vazão e/ou revestimentos, devem apresentar diferenças em suas dimensões básicas. Sua importância se faz presente quando se utiliza uma rede de canais ou para um único canal que apresenta trechos com diferentes revestimentos, caracterizando distintos trechos que devem ser otimizados em separado.

Além disso, outra característica relevante e que não foi encontrada em nenhum estudo anterior, visto que a maioria dos trabalhos apresentados se destina ao dimensionamento de canais de irrigação ou drenagem, é o custo associado à perda de carga ao longo do canal.

Também ainda não é corrente o uso de modelagem matemática para escolher o tipo de revestimento a ser empregado dentre as opções disponíveis, o que implica analisar a seção ótima para cada um dos revestimentos e os custos associados a cada um deles, permitindo a melhor escolha.

O estudo de seção ótima de um canal deve considerar as limitações hidráulicas representadas pela formulação universal da resistência ao escoamento, além de atender às condições de

estabilidade, representadas pela velocidade máxima permissível do revestimento e a tensão de arraste crítica, que objetivam a estabilidade de forma do canal, ou seja, a não ocorrência de erosão e/ou assoreamento no fundo do mesmo.

MATERIAL E MÉTODOS

O modelo matemático proposto tem como objetivo dar suporte a decisão de qual a melhor configuração de seção transversal (seção ótima) de um canal, considerando parâmetros construtivos e operacionais. Isto requer a definição do problema, com todas as suas variáveis, relações e restrições. Entende-se por seção ótima, pelo critério de custo global, a seção que não somente minimize gastos com motorização, escavações e revestimento, como também seja estável e proporcione menores perdas de carga.

A determinação da seção ótima será atingida através do cálculo de custos esperados para cada uma das possibilidades de geometria envolvida. Para isso, deve ser levada em conta a elevação do topo rochoso, a(s) rugosidade(s) da superfície do canal, os custos de escavação, revestimento e manutenção, o horizonte de projeto do empreendimento, e o abatimento de talude máximo aceitável para o solo da região, ou para o revestimento empregado no canal, devendo-se atentar também para critérios de estabilidade como velocidade máxima admissível e tensão de arraste crítica.

É calculado no modelo, numericamente, para uma dada situação, o perfil de linha d'água, e a partir desta se define as dimensões do trapézio necessárias para a lâmina d'água obtida, admitindo uma folga de *freeboard*, em cada uma das seções. Em seguida, se faz a conformação deste trapézio com o terreno, calculando os custos que incorrem da implantação da estrutura na topografia.

Devido à presença de muitas variáveis e da inter-relação entre elas, o problema aqui tratado é caracterizado como uma típica aplicação da técnica de otimização não linear, resolvida através do Solver presente no Microsoft Office Excel 2010®, que busca o mínimo custo variando o valor da base da seção, restrita a valores positivos, através da modelagem de GRG (Generalized Reduced Gradient).

Por se tratar de um modelo de otimização por critério de custo global, a função objetivo, da qual o modelo deverá pesquisar o valor mínimo, é a de custo total do empreendimento. No presente modelo, o custo global do empreendimento é definido por:

$$F_{GL} = F_{MO} + F_A + F_E + F_R + F_M \quad (1)$$

sendo

F_{GL} = Função custo global

F_{MO} = Função custo de motorização

F_A = Função custo de aterro

F_E = Função custo de escavação

F_R = Função custo de revestimento

F_M = Função custo de manutenção

Os custos de implantação, escavação, revestimento e aterro podem ser agrupados como custo de construção, enquanto o custo de manutenção é definido pelas perdas que ocorrem durante a vida útil do canal.

A função custo de motorização é relacionada com vazão e com a diferença de nível d'água entre jusante e montante do canal e, portanto, depende também da perda de carga. O aterro, por sua vez, é calculado pelo volume de material depositado no terreno natural (Figura 1), logo depende da topografia. Já a escavação deve considerar, além do volume, o material a ser escavado. Materiais mais resistentes requerem maiores esforços para sua retirada, o que se reflete em maiores custos de escavação. É comum agrupar os materiais de escavação em categorias, da seguinte forma: 1ª Categoria (escavado com equipamentos comuns), 2ª Categoria (escavado com auxílio de escarificadores e de dimensões médias) e 3ª Categoria (só podem ser escavados com o uso de explosivos).

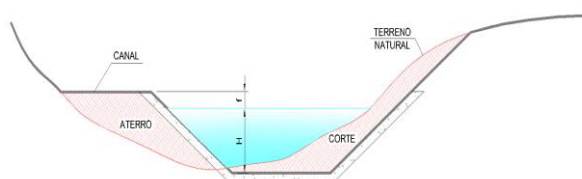


Figura 1 – Conformação Canal / Terreno

Outra consideração a ser feita sobre o custo de escavação é quanto à distância de transporte ao bota-fora. Esta parcela de custo é particular de cada empreendimento, e não foi considerada neste trabalho, mas deve ser calculada em casos onde o custo de transporte tenha valores expressivos, principalmente em canais de grande extensão ou nos casos onde o bota-fora esteja distante das obras e não seja possível aplicar o material escavado no empreendimento.

Para o revestimento, deve-se definir um tipo de proteção que mais se adapte às condições locais, não somente quanto à resistência a ação do escoamento, mas também quanto à resistência às deformações do solo de base, e que atenda às condicionantes ambientais, rugosidade resultante, facilidade de execução, além do custo final da obra (MACCAFERRI DO BRASIL).

Neste modelo existe a possibilidade de estudo de diversos materiais de revestimentos, porém foge ao escopo do trabalho uma análise da resistência, da eficiência, da durabilidade, enfim, da otimização do revestimento, restringindo-se apenas ao custo do revestimento e a sua resistência ao escoamento.

O custo de revestimento é função direta do tipo de revestimento e da área a ser protegida, e cada revestimento apresenta diferentes valores de custo unitário, espessura, e coeficiente de atrito. Desta forma, a única forma de se saber as consequências no custo global do emprego de um revestimento é calculando-se a perda de carga causada por ele, e os volumes adicionais de escavação e aterro necessários para implantá-lo. Soma-se a estes custos o valor do próprio revestimento.

Fica claro que a alteração entre diferentes revestimentos implica diretamente na eficiência econômica final atingida pelo empreendimento, e o modelo aqui desenvolvido é uma ferramenta de suporte a decisão, dentre outras coisas, de qual revestimento deve ser empregado.

A função custo de manutenção do canal é aquela que prevê as perdas financeiras que ocorrem durante a vida útil do canal. Dentre estas perdas estão os custos de conservação do revestimento (face ao desgaste natural, depredação etc.), custos de limpeza do canal e o custo associado à perda de carga, e deve-se ter o cuidado de trazer estes custos durante a vida do empreendimento a valor presente, permitindo assim a sua comparação com os demais custos de obra.

Por simplificação, pode-se admitir o custo de manutenção como sendo a verba anual fixa de manutenção, incluindo dragagem e inspeção, além de outra verba relativa à perda de carga do canal

$$F_{MA} = (F_{FI} + F_{PC})F_C \quad (2)$$

cujos coeficientes representam

F_{MA} = Função custo de manutenção,

F_{FI} = Função custo de manutenção fixo,

F_{PC} = Função custo de perda de carga,

F_C = Fator de correção.

Quanto à perda de carga, há que se considerar o uso do canal: em canais de adução, a perda de carga deve ser contabilizada pelo custo da geração que deixou de ser feita, e eventualmente pode implicar também em redução na dimensão da(s) unidade(s) geradora(s), e este caso particular deve ser calculado contabilizando-se o custo de comercialização da energia ao longo do horizonte de projeto (e a variação no custo de implantação das máquinas, quando pertinente, conforme mencionado na função custo de motorização).

Nos demais canais, a forma de se medir o custo da perda de carga é através do cálculo da perda de energia associada, uma vez que a energia possui custo de referência conhecido. A energia consumida em um determinado intervalo de tempo pela perda de carga é calculada da seguinte forma

$$\Delta E = \Delta h \cdot \Delta t \cdot Q \cdot g \cdot \rho \cdot \eta \quad (3)$$

na qual

ΔE = Energia média consumida pela perda de carga (MWh),

Δh = Perda de carga média (m),

Δt = Intervalo de tempo de estudo (h),

Q = Vazão média (m³/s),

g = Aceleração da gravidade (m/s²),

ρ = Massa específica da água (kg/m³),

η = Rendimento da bomba, turbina e/ou gerador.

Assim, a função custo da perda de carga pode ser calculada a partir da energia consumida encontrada da seguinte forma

$$F_{PC} = \Delta E C_E \quad (4)$$

sendo

F_{PC} = Função custo de perda de carga anual,

ΔE = Energia média anual consumida pela perda de carga ((3- MWh),

C_E = Custo unitário da energia (R\$/MWh).

O custo da energia elétrica é definido pela quantidade de energia elétrica consumida num dado período, multiplicada pela tarifa correspondente àquele período, que é variável e estabelecida pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), função do consumo de energia (valor acumulado pelo uso da potência elétrica disponibilizada ao consumidor durante o período de consumo) e a demanda de potência (maior potência elétrica solicitada pelo consumidor ao longo do período de consumo), como foi feito por exemplo no estudo de Furusawa (2011).

Para o cálculo da perda de carga, foram utilizadas as equações básicas de SAINT-VENANT, que atendem aos princípios de conservação da massa e conservação da quantidade de movimento. Estas equações são genéricas e englobam não só as condições de escoamento tratadas neste modelo como também as demais situações possíveis de escoamento unidimensional, como os casos de escoamento não permanentes, quer em regime fluvial ou torrencial, quando todos os parâmetros hidráulicos variam ao longo do tempo.

Para o caso de escoamento permanente (onde não há variação da vazão no tempo), desprezando-se a contribuição lateral na vazão, e simplificando-se as grandezas diferenciais por diferenças finitas, as equações de SAINT-VENANT, quando aplicada a um conjunto de n seções dá origem a um sistema de $n-1$ equações a n incógnitas em y . Como aqui é dada inicialmente uma condição de contorno na extremidade de jusante, por se tratar de regime fluvial, é possível obter a solução, na ordem de jusante para montante, para todo o conjunto de seções.

A restrição feita ao modelo, que calcula a variável largura da base na otimização, é que esta dimensão seja maior do que zero. Como o solver do EXCEL não usa o sinal de maior para configurar uma restrição, foi empregada então a restrição na base (B):

$$B \geq 0,1 \quad (5)$$

O estudo de seção ótima que é executado no modelo considera apenas a seção transversal de forma geométrica trapezoidal, por ser o mais utilizado na prática. É iterativo, ou seja, para cada um dos revestimentos disponíveis são geradas diversas configurações da seção, através da alteração dos parâmetros de declividade de fundo, talude lateral (m) e vazão, e é calculado o valor da função custo de cada uma delas, a fim de permitir a definição de qual configuração é melhor para o revestimento correspondente.

Antes da execução do modelo, devem ser fornecidas as variáveis de entrada do caso em estudo e, após os cálculos, o modelo apresentará uma série de produtos, conforme descrito a seguir.

As variáveis de entrada de um sistema são o conjunto mínimo de variáveis que representam uma determinada situação de projeto e cujo conhecimento permite determinar as soluções do sistema. Neste modelo, estas variáveis são: Seções: Topobatimetria, Progressiva e Horizontes geotécnicos (em relação à própria cota de fundo); Condições de contorno: Cota de fundo de jusante e Nível d'água de jusante; Canal: i (m/m) – Declividade de fundo do canal, Freeboard, m - Talude do canal ($1 V \times m H$); Revestimento: Manning, Espessura, Custo de base, Custo de talude, (m mínimo), (V máxima), (τ_0 máximo); Custos unitários: Escavação de 1º, 2º e 3º categorias, Aterro; Energia: Horizonte de projeto (anos), Rendimento de motorização, Taxa de energia elétrica; Vazão.

O principal produto calculado pelo modelo é o valor de base ótimo para a situação ensaiada; a partir dele é possível se ter todas as demais grandezas físicas que definem o canal. A função desenvolvida neste trabalho calcula também os valores de perda de carga, escavação de 1º, 2º e 3º categorias, volumes de revestimento de base e de talude, volume de aterro e manutenção, em valor presente, e, por conseguinte o custo total do empreendimento.

Além disso, ao final de cada simulação, são apresentados os valores de vazão máxima encontrada para respectiva configuração de canal, a velocidade máxima e o valor de τ_0 máximo, encontrados durante a simulação, para verificação pelo usuário das condições de estabilidade.

Para simulação de diversas situações de projeto, com diferentes vazões, revestimentos, declividades de canal, declividade de talude (m), foi desenvolvido um novo programa, que altera os valores na planilha e armazena os resultados em um arquivo em separado. Com os resultados deste arquivo podem ser produzidos gráficos comparativos, entre os diferentes revestimentos, que darão subsídios para o empreendedor que pretende construir um canal, escolher, dentre todas as alternativas, aquela mais interessante.

Conforme citado, este trabalho considera um caso particular de escoamento, do tipo permanente, ou seja, sem variação da vazão no canal ao longo do tempo, unidimensional (a direção e a intensidade da velocidade é constante para todos os pontos), e do tipo fluvial, onde não foram consideradas declividades altas que levassem o escoamento a romper a barreira do número de Froude crítico. Estas condições devem ser verificadas em estudos futuros e desdobramentos deste trabalho. A condição fluvial, entretanto, é largamente justificada, pois trata-se da maioria das aplicações, em canais de drenagem e irrigação. Deve-se observar também que o modelo de otimização, GRG não linear, empregado pelo Excel na otimização, pode retornar soluções mínimas locais que, eventualmente não são as mínimos globais – uma grande quantidade de rodadas ajuda a diminuir o erro.

Para verificação da validade do modelo, foi feito um estudo de caso comparando seus resultados com um modelo existente, para diversos tipos de revestimento, em diferentes vazões, alterando-se a declividade de fundo e também a inclinação de talude.

A solução analítica empregada para comparação que também leva em conta o critério de minimização de custo foi proposta por Souza, P.A. (s.d.)³, para otimização de canais de seção trapezoidal, pelo critério de custo global. Seu estudo, ainda não publicado, considerou tanto a escavação quanto revestimento na função custo, e o algoritmo de otimização aplicado foi o de Lagrange, assim como em Das (2000).

Inicialmente, a formulação universal da perda de carga no escoamento livre em canais foi escrita em função de b e y , cujo resultado deve ser nulo para atender as premissas do estudo (escoamento uniforme):

$$AR^{2/3} = \frac{(by + my^2)^{5/3}}{(b + 2y\sqrt{1 + m^2})^{2/3}} = \frac{A^{5/3}}{P^{2/3}} = \frac{Qk^{1/6}}{8\sqrt{gi}} \quad (6)$$

$$f(b, y) = AR^{2/3} - \frac{Qk^{1/6}}{8\sqrt{gi}} = 0 = \frac{A^{5/3}}{P^{2/3}} - \frac{Qk^{1/6}}{8\sqrt{gi}} \quad (7)$$

$$f(b, y) = \frac{(by + my^2)^{5/3}}{(b + 2y\sqrt{1 + m^2})^{2/3}} - \frac{Qk^{1/6}}{8\sqrt{gi}} = 0 \quad (8)$$

nas quais

A = Área (m^2),

R = Raio Hidráulico (m),

Q = Vazão (m^3/s),

³ Podalyro Amaral de Souza, graduado em Engenharia Civil pela Universidade de São Paulo (1971), mestre (1978) e doutor (1985) em Engenharia Civil pela Universidade de São Paulo é Engenheiro do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo, Professor Assistente Doutor da Universidade de São Paulo, Assessor ad-hoc da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e autor de diversos livros e artigos relativos ao estudo da hidráulica aplicada.

m = declividade do talude lateral (1 V : m H),
 g = aceleração da gravidade (m^3/s),
 i = declividade de fundo do canal (m/m),
 k = coeficiente relacionado a perda de carga do canal,
 b, y vide Figura 2.

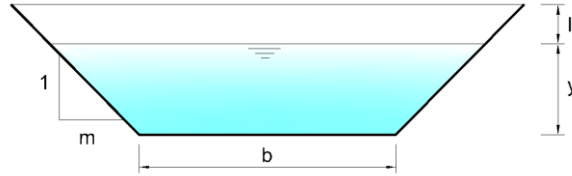


Figura 2 – Dimensões Empregadas por Souza (s.d.)

A função objetivo, por sua vez, foi definida como

$$C = C_t + C_b + C_e \quad (9)$$

sendo

C = Custo total,

C_t = Custo do revestimento do talude por unidade de comprimento,

C_b = Custo de revestimento da base por unidade de comprimento,

C_e = Custo de escavação por unidade de comprimento,

na qual

$$C_t = 2\tau(y + l)\sqrt{1 + m^2} \quad (10)$$

$$C_b = b\beta + c \quad (11)$$

$$C_e = [b(y + l) + m(y + l)^2]\varepsilon \quad (12)$$

τ = Preço do revestimento do talude por unidade de área

β = Preço do revestimento da base por unidade de área

ε = Preço de escavação por unidade de volume

c = Preço do material do canto por unidade de comprimento

A função custo é então definida como:

$$C = 2\tau(y + l)\sqrt{1 + m^2} + b\beta + c + [b(y + l) + m(y + l)^2]\varepsilon \quad (13)$$

A otimização foi alcançada empregando-se o teorema de Lagrange, para obter o valor mínimo de custo, com auxílio da ferramenta “Atingir Meta” disponível no Excel. Este modelo simplifica a condição de escoamento ao admitir regime uniforme ao longo do canal, ao invés de regime gradualmente variado, desconsidera, no volume de escavação, o volume do próprio revestimento e o custo de aterro no cálculo de custo global. Tais simplificações podem ser pouco significativas e o

modelo numérico aqui desenvolvido é capaz de verificar tal suposição. Serão descritas e apresentadas as comparações das situações simuladas.

Foram escolhidos 5 tipos de revestimento nos quais todas as vazões, taludes e declividades foram simuladas. Foram escolhidos revestimentos de relativa popularidade e de comportamento bastante diferente em relação ao custo de implantação e a eficiência hidráulica, para se ter uma boa sensibilidade da eficiência do modelo, principalmente na comparação que envolve o custo da perda de carga. Os revestimentos são: 1) Gabião Caixa, 2) Gabião Colchão (Reno), 3) Concreto Projetado, 4) Combinação Geomanta com Geotextil, 5) Solo natural. Foi ensaiada declividade de fundo igual a 0,0001 m/mm, e vazões que variaram de 50 m³/s a 350 m³/s, com passos de 50 m³/s. Quanto ao talude lateral, foram adotados valores de m iguais a 0,5, 1,0 e 2,0.

Os custos unitários de cada um dos revestimentos, além dos custos de movimentação de terra, foram obtidos da TPU (tabela de preços unitários) do DER mais recente (06/2011), disponível em <<http://www.der.sp.gov.br>>. Já os valores de Manning foram arbitrados em função de valores conhecidos no meio técnico.

Tabela 1 Preços Unitários (Data De Referência: 30/06/2011 – Fonte: DER)

Revestimento	Código TPU	Valor Unitário	Esp.	n
Gabião tipo caixa largura 50 cm tela galvanizada	24.09.04	341,60 R\$/m ³	50 cm	0,025
Gabião tipo colchão espessura 23 cm tela galvanizada	24.09.06.01	111,64 R\$/m ²	23 cm	0,025
Concreto projetado	25.09.10	1.118,48 R\$/m ³	10 cm	0,015
Geocomposto drenante (geomanta + geotêxtil) 10 mm	24.23.05	28,58 R\$/m ²	10 mm	0,013
Espalhamento, regularização e compactação de material	22.02.09	2,0 R\$/m ³		0,022
Escavação e carga de material de 1/2ª categoria	22.02.01	4,0 R\$/m ³		
Escavação e carga de material de 3ª categoria	22.02.04	27,29 R\$/m ³		
Aterro solo com 3% de cimento c/ Pulverização	25.01.03	42,52 R\$/m ³		

Não foi computado o custo de motorização devido à complexidade de pesquisa desta parcela no custo total (as variações de nível d'água calculadas não sugerem alterações tão expressivas entre as diferentes alternativas estudadas para este equipamento).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para fazer uma comparação equivalente, foi adotado para cada um dos casos simulados o nível d'água de jusante igual ao resultante do modelo elaborado por Souza (s.d.), e, da mesma forma, foi ajustada para cada simulação a elevação do terreno equivalente, plano e de elevação igual ao nível d'água acrescido de borda livre (escavação apenas no trapézio do canal e sem ocorrência de aterro). Os valores de y/B, para cada uma das vazões estudadas, são apresentados a seguir.

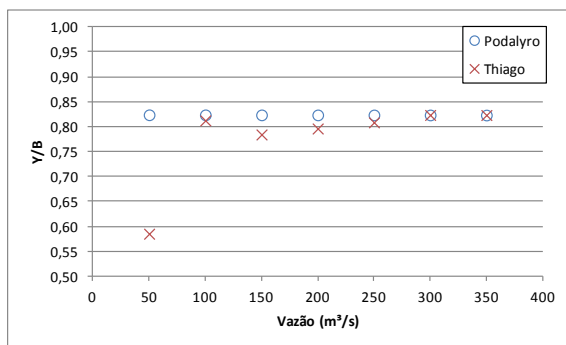


Figura 3 - Resultados para m = 0,5 e revestimento em gabião tipo caixa

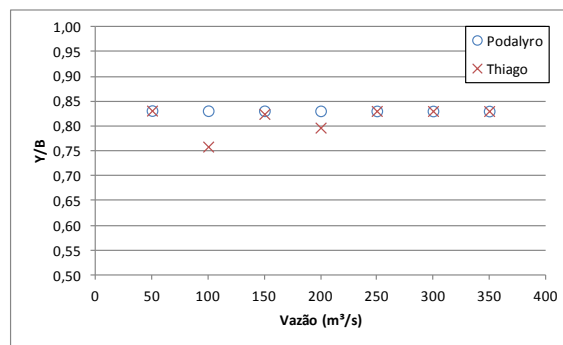


Figura 4 - Resultados para m = 0,5 e revestimento em gabião tipo colchão

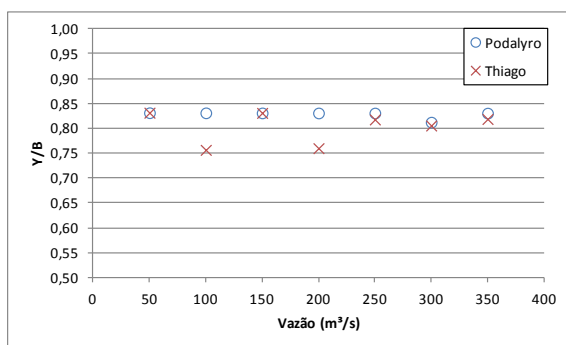


Figura 5 - Resultados para m = 0,5 e revestimento em concreto projetado

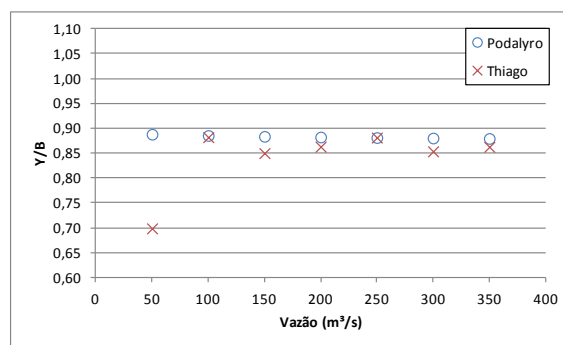


Figura 6 - Resultados para m = 0,5 e revestimento com geocomposto

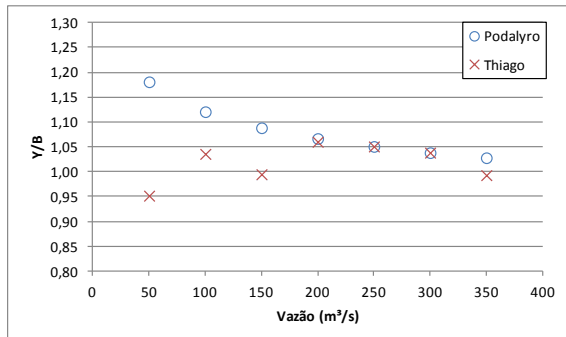


Figura 7 - Resultados para m = 0,5 em terreno natural

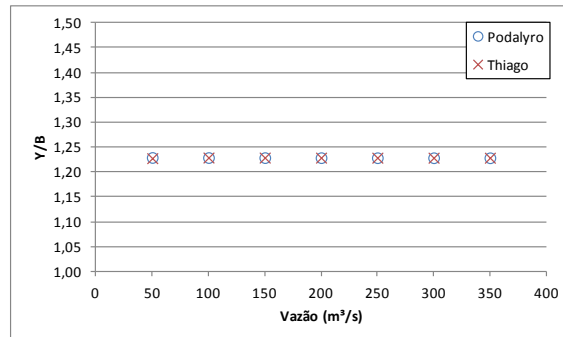


Figura 8 - Resultados para m = 1,0 e revestimento em gabião tipo caixa

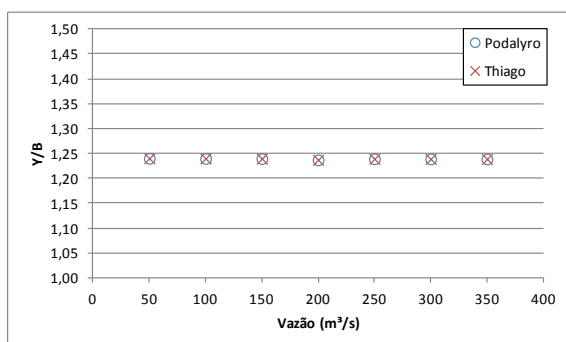


Figura 9 - Resultados para m = 1,0 e revestimento em gabião tipo colchão

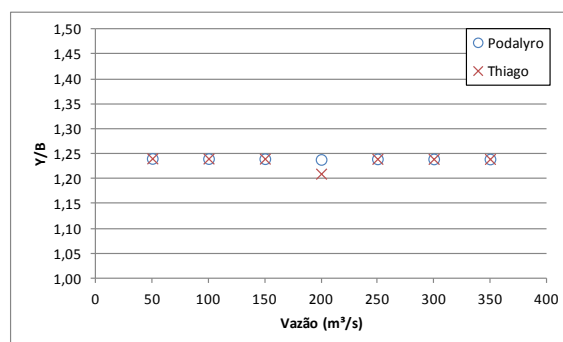


Figura 10 - Resultados para m = 1,0 e revestimento em concreto projetado

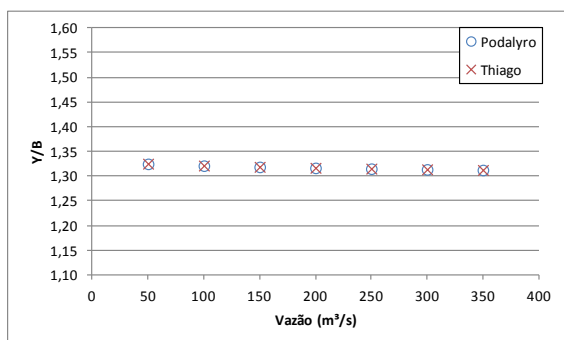


Figura 11 - Resultados para $m = 1,0$ e revestimento com geocomposto

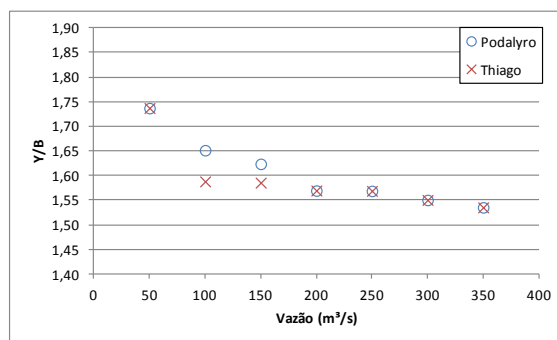


Figura 12 - Resultados para $m = 1,0$ em terreno natural

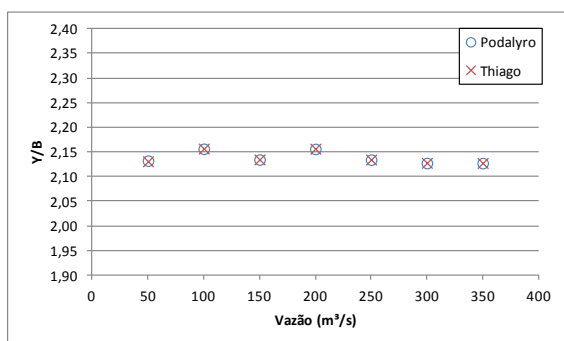


Figura 13 - Resultados para $m = 2,0$ e revestimento em gabião tipo caixa

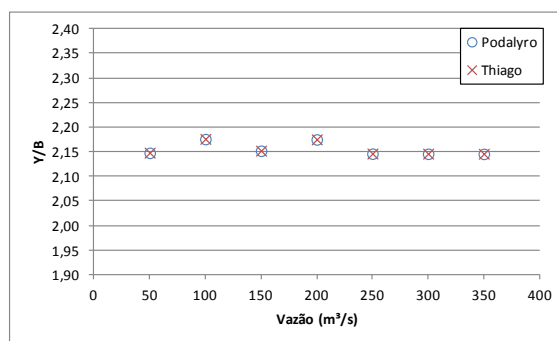


Figura 14 - Resultados para $m = 2,0$ e revestimento em gabião tipo colchão

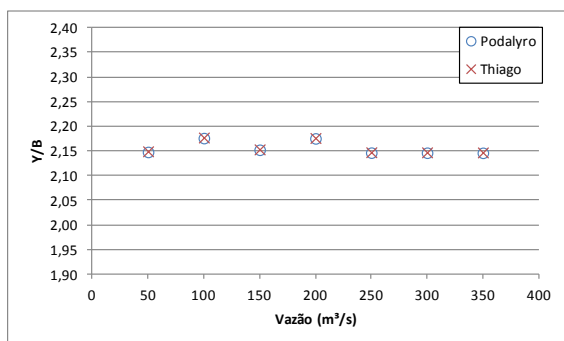


Figura 15 - Resultados para $m = 2,0$ e revestimento em concreto projetado

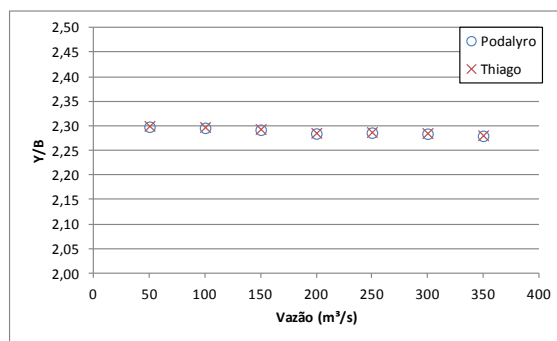


Figura 16 - Resultados para $m = 2,0$ e revestimento com geocomposto

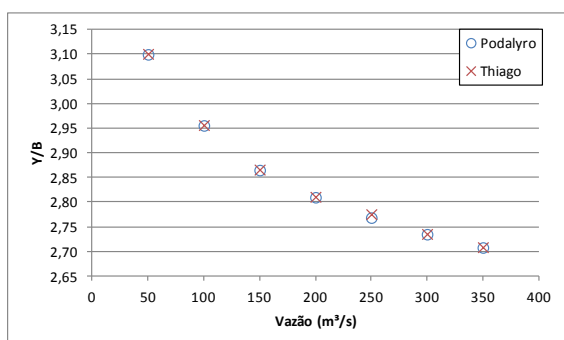


Figura 17 - Resultados para $m = 2,0$ em terreno natural

Os resultados mostram que o modelo teórico analítico, desenvolvido por Souza (s.d.), e o modelo numérico proposto apresentam valores muito próximos na relação entre a lâmina d'água e largura de base otimizados. Tal verificação confirma que as simplificações propostas por Souza (s.d.) de regime uniforme ao invés de gradualmente variado, desconsideração de espessura de revestimento no custo da escavação, para os casos ensaiados, são perfeitamente aceitáveis.

CONCLUSÕES

A metodologia de dimensionamento proposta empregou as equações de SAINT-VENANT (conservação de massa e quantidade de movimento) simplificadas para o caso específico de ausência de contribuição lateral e em regime permanente, que são perfeitamente cabíveis para as situações de projeto idealizadas para aplicação do modelo, de escoamento unidimensional e leito de fundo fixo.

Os resultados encontrados durante o estudo de caso foram coerentes com o esperado, sendo verificado aumento da perda de carga e do consumo de energia elétrica para maiores vazões, maiores volumes de escavação para revestimentos mais espessos, revestimentos de menor Manning apresentam menor perda de carga, etc. Observou-se também a importância da movimentação de terra na implantação de canais, o que justifica o porquê de os estudos de traçado em planta de canais atraírem maiores recursos na elaboração de projeto em relação ao estudo de seção. Isso não tira a importância do estudo de seção, pelo contrário: um estudo de seção rápido e confiável colabora e muito no estudo de traçados, podendo-se avaliar as diferenças entre diversos traçados com precisão.

A metodologia adotada para comparação foi àquela proposta por Souza (s.d.), devido ao fato de ser uma solução conceitualmente diferente do que se propõe neste trabalho, visto que a abordagem analítica de Souza simplifica diversos detalhes de implantação e desconsidera os efeitos da operação, ao contrário da solução numérica que procura computar todos os custos envolvidos na construção e manutenção do canal. Além disso, o modelo analítico proposto não envolve a complexidade da otimização não linear, o que torna sua aplicação mais fácil e precisa, tendo em vista as limitações do otimizador GRG não linear disponível no aplicativo EXCEL.

Tamánhas diferenças despertaram o interesse do autor no resultado da comparação, pois independentemente da metodologia, a solução ótima é única, e os resultados corroboraram a expectativa, pois na maioria absoluta das simulações os resultados encontrados no Modelo estavam praticamente idênticos àqueles calculados por Souza, podendo-se atribuir aos poucos casos de divergência a influência das simplificações adotadas no modelo analítico.

Observa-se, portanto, que o Modelo desenvolvido, agregou ao cálculo de otimização de seção uma maior precisão no custo global por considerar elementos de custo não vistos em outras publicações, como por exemplo, a perda de carga e a espessura de revestimento no volume de

escavação total, além da consideração de implantação do canal em terrenos naturais, admitindo inclusive horizontes geotécnicos para diferenciar os materiais de escavação.

Outra vantagem da metodologia proposta foi a facilidade de cálculo para diversos revestimentos, algo que também não havia sido explorado em outros trabalhos, mas que, em casos práticos de estudo de otimização, é de bastante interesse do empreendedor.

BIBLIOGRAFIA

a) Livro

CHOW, V.T. **Open Channel Hydraulics**. New York: McGraw-Hill, 1959. 680p.

CUENCA, R.H., *Irrigation system design: an engineering approach*, Prentice Hall, 1989, 552p.

LENCASTRE, A. **Manual de hidráulica geral**. São Paulo: Edgard Blücher, 1972. 411 p.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 4. ed. São Paulo: Rettec Gráfica E Editora, 2006. v. 2500. 529 p.

SOUZA ET AL. **Métodos Computacionais para Engenharia Hidráulica**. São Paulo: Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, 1991. V. 1. 75 p.

b) Artigo em periódico

ABDULRAHMAN, A. Best Hydraulic Section of a Composite Channel. **Journal of Hydraulic Engineering** - ASCE, v. 133(6), p. 695-697, 2007.

BHATTACHARJYA, R. B., SATISH M. G. Optimal Design of a Stable Trapezoidal Channel Section Using Hybrid Optimization Techniques. **J. Irrig. and Drain. Eng.** – ASCE, v. 133(4), p. 323-329, 2007.

DAS, A. Optimal channel cross section with composite roughness. **J. Irrig. Drain. Eng.** - ASCE v. 126(1), p. 68–72, 2000.

DAS, A. Chance constrained optimal design of trapezoidal channels. **Journal of Water Resources Planning And Management** - ASCE, v. 134(3), p. 310-313, 2008.

FLYNN, L. E., MARIÑO, M. A. Canal design: Optimal cross sections. **J. Irrig. Drain. Eng.**, v. 113(3), p. 335–355, 1987.

LOGANATHAN, G. V. Optimal design of parabolic canals. **J. Irrig. Drain. Eng.**, v. 117(5), p. 716–735, 1991.

c) Artigo em anais de congresso ou simpósio

CARRIAGA, C. C., MAYS, L. W. Optimization Approach To Stable Channel Design. **Proceedings ASCE 26th Annual Water Resources Planning and Management Conference**, Tempe, Arizona, 1999.

CARRIAGA, C. C., TUNCOK, I. K., MAYS L. W. Optimization Modeling Approach in the Design of Stable Channel System, **Proceedings of Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management**, Minneapolis, 2000.

LANE, E. W. The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering. **Proceedings**, American Society of Civil Engineers, nº 745, Jul 1955.

d) Site

AES ELETROPAULO (2010). **Tarifas de energia**, AES Eletropaulo. Disponível em <<http://www.aeseletropaulo.com.br>>. Acesso em 15 dez. 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL (2005). **Tarifas de fornecimento de energia elétrica, Cadernos temáticos ANEEL nº 4**, Brasília, 30p. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/caderno4capa.pdf>>. Acesso em 30 nov. 2011.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM – DER (2011), **Tabela de Preços Unitários (Data de Referência 30/06/2011)**, Disponível em <http://www.der.sp.gov.br/documentos/tabelas/tabela_precos.aspx>. Acesso em 09 ago. 2011.

e) Dissertação de Mestrado

FURUSAWA, R. T. **Contribuição ao dimensionamento de rede de distribuição de água por critério de custo global**. 2011. 207 f. Dissertação (Mestrado em hidráulica) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

f) Manuais

MACCAFERRI DO BRASIL. **Defesas de margens e obras transversais: necessidades e soluções**. Jundiaí: Maccaferri do Brasil, 2009. 100 p.

MME, Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacia Hidrográfica, 2007.