



Anais do XXXIV COBENGE. Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, Setembro de 2006.
ISBN 85-7515-371-4

PLANILHA ELETRÔNICA PARA AGILIZAR O DIMENSIONAMENTO DE BANCADA DIDÁTICA DE ORIFÍCIOS E BOCAIS - RESULTADO DE ESTÁGIO INTERNO NA ESCOLA DE ENGENHARIA MAUÁ

André Luiz de Lima Reda – andrereda@maua.br

Everton Rincon – everton.lsrincon@ceun.maua.br

Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, Escola de Engenharia Mauá
Campus São Caetano do Sul - Praça Mauá, 1
CEP 09580 900 - São Caetano do Sul - SP - Brasil

Resumo: *O trabalho oferece uma contribuição prática para docentes e engenheiros interessados em projetar bancada didática para a experimentação do escoamento em orifícios e bocais, dentro da disciplina Hidráulica. É concebida e publicada uma planilha eletrônica que efetua todos os cálculos necessários para definir, testando hipóteses alternativas, as dimensões dos componentes da bancada, bem como estimar os valores resultantes para as variáveis de estado de natureza hidráulica que caracterizam seu funcionamento. Apesar de os conceitos e a metodologia para os cálculos inerentes a tal dimensionamento serem básicos, de domínio comum na Hidráulica, o processo completo de criação e dimensionamento, envolvendo tentativa e erro, pode ser trabalhoso e consumir tempo relevante. Ademais, restrições tais como área disponível, pé direito no laboratório e potência limitada para a instalação elétrica, bem como um eventual interesse em empregar certo componente disponível em estoque (ou, talvez, oferecido por preço reduzido – por exemplo, a bomba centrífuga para promover circulação da água), podem requerer que o projetista teste diversas alternativas de dimensionamento, submetendo cada uma a cálculo completo até acomodá-la convenientemente a tais restrições. Neste ponto, a planilha aparece como ferramenta para agilizar a execução da maior parte dos cálculos. Ela é aqui elaborada para certa bancada experimental básica concebida por um professor e um estagiário graduando (os autores do artigo, respectivamente), mas muitas de suas características são comuns em bancadas deste tipo e outras podem ser mudadas, aprimoradas ou enriquecidas pelo projetista usuário da planilha, atendendo a interesses específicos.*

Palavras-chave: *Laboratório de Hidráulica, Orifícios e bocais, Agilização de projeto, Planilha eletrônica, Projeto de bancada*

1. INTRODUÇÃO

O laboratório físico no ensino de engenharia é ferramenta essencial para “incentivar o trabalho de pesquisa e investigação científica” – necessidade enfatizada pela atual política

nacional para o ensino do terceiro grau (BRASIL, 1996). No caso específico do ensino de Hidráulica no País, tal ferramenta é usual nas instituições mais tradicionais.

O presente artigo tem por objetivo tornar pública importante experiência desenvolvida, na Escola de Engenharia Mauá, durante o projeto de uma bancada didática para experimentos com o escoamento através de orifícios e bocais. Tal experiência constitui-se de uma ferramenta matemática que foi desenvolvida na fase de cálculo da bancada, a qual se mostrou eficiente para criar um sistema físico coerente sob os aspectos didático e hidráulico. Nesse projeto, buscou-se também criar uma bancada segura durante seu uso didático, reduzindo-se a probabilidade de mau funcionamento ou extravasamento para o ambiente de aula. Ao preencher tal objetivo, os autores pretendem tornar esta parte importante de sua experiência disponível para o leitor interessado – que poderá empregá-la e aperfeiçoá-la se necessitar projetar equipamento semelhante.

Em grandes laboratórios de Hidráulica, dedicados a atender clientes que necessitam de modelos físicos para projetos de engenharia requerendo grandes vazões de circulação, podem eventualmente existir laboratórios didáticos que sirvam a cursos de graduação em engenharia. Tal é o caso do Centro Tecnológico de Hidráulica-CTH, na Universidade de São Paulo, onde existe uma bancada didática de orifícios e bocais (ver PIMENTA, 1970) com uma disposição típica, tradicional – tal como a adotada no projeto para o qual se preparou a planilha eletrônica aqui apresentada.

Um laboratório didático desse tipo, inserido num sistema maior, conta com todas as facilidades inerentes a este – tais como uma vazão de alimentação disponível maior que a necessária aos experimentos didáticos (bastando um registro para ajuste da vazão circulante ao valor desejado) e uma capacidade de extravasamento também em folga. Porém, não é sempre que uma bancada didática para experimentos hidráulicos está inserida num laboratório comercial. Pelo contrário, em várias universidades o laboratório de Hidráulica pode funcionar ou isoladamente ou apenas em conjunto com laboratórios didáticos de Mecânica dos Fluidos ou de Física – geralmente, num esquema de revezamento de horários para economia de espaço. Nesses casos, não é viável um excesso de capacidade ou de potência como forma de garantir a circulação eficiente de vazões em excesso à necessária para os experimentos desejados. Tampouco será possível, em tais casos, contar com uma grande capacidade de extravasamento desse excesso, como ocorre nos grandes laboratórios comerciais – o qual seria então encaminhado para recirculação – pois tal sistema deve ser dimensionado apenas nas proporções necessárias para o laboratório didático, por motivos econômicos.

Em projetos tradicionais de bancadas hidráulicas didáticas, a água recircula entre um reservatório alto e um reservatório baixo, efetuando o percurso de descida por gravidade e o retorno, na subida, pelo recalque promovido por bomba(s). Ambos os reservatórios devem funcionar entre níveis mínimo e máximo operacionais. Isto implica algumas restrições que um sistema assim fechado deve satisfazer, a saber:

- a) A bomba deverá ter suficiente potência útil para promover a vazão requerida quando o nível do reservatório inferior estiver no mínimo operacional e o do reservatório superior no máximo operacional – ou seja, quando a altura geométrica de recalque apresentar seu máximo valor operacional.
- b) A tubulação destinada a extravasar o excesso (vazão não participante do fluxo principal, objeto do experimento) deve ter capacidade para conduzi-lo ao reservatório baixo mesmo quando for obturado o fluxo principal do experimento (neste caso, quando fechados os orifícios ou bocais) – protegendo assim o ambiente contra vazamentos do reservatório alto. Em outras palavras, o reservatório alto deve ser provido de um “ladrão” eficiente.
- c) No caso da bancada de orifícios e bocais, cujos jatos vertem livremente no ambiente e devem ser colhidos pelo reservatório inferior, este deve ter comprimento suficiente para recebê-los, com folga e borda livre para evitar respingos no ambiente.

Pela experiência dos autores no início do projeto, a solução do problema sujeito a todas essas restrições logo se demonstrou trabalhosa e demorada. Portanto, ainda no início do processo de criação, optou-se por desenvolver uma planilha eletrônica que automatizasse as operações de cálculo de forma a agilizar a tarefa então proposta e, posteriormente, permitir seu emprego na solução de problemas congêneres por usuários interessados.

Tal planilha foi baseada no software Excel[®], da MICROSOFT (1997), que permite a criação de rotinas de cálculo totalmente abertas ao usuário – permitindo inclusive que partes dela possam ser adaptadas para projetos de bancadas para outras finalidades (experimentos diversos do de orifícios e bocais) ou disposições físicas diversas.

A próxima seção é dedicada a uma descrição sucinta do tipo de bancada para o qual se preparou a planilha de cálculo. A seção que a segue explica o uso da planilha eletrônica. Como a finalidade precípua do artigo é lançar uma idéia para uso geral, com a liberdade de ser aperfeiçoada ou adaptada pelo usuário, não se considerou necessário descrever o projeto final de bancada, que no caso da Escola de Engenharia Mauá também foi detalhado pelo estagiário (segundo autor). Portanto, a seção “Considerações Finais” é mais dedicada a uma discussão das vantagens trazidas pela planilha pela agilização dos cálculos – o que permite ao projetista dedicar mais atenção a outras partes do processo de criação.

2. DESCRIÇÃO DO TIPO DE BANCADA A SER PROJETADA

Com o apoio das figuras 1 e 2, pode-se descrever em linhas gerais o tipo de bancada que se escolheu projetar. Ela guarda muitas características comuns à maioria das bancadas dedicadas aos experimentos de escoamento através de orifícios ou bocais instalados em paredes verticais de reservatórios de grandes dimensões.

A Figura 1 – uma perspectiva da bancada em funcionamento – descreve uma situação em que quatro orifícios ou bocais (dispositivos hidráulicos descritos em ALFONSI e ORSI, 1984; GHETTI, 1995; LENCASTRE, 1996; AZEVEDO NETTO *et al.*, 2003), denominados aqui simplesmente “aberturas”, vertem água simultaneamente na forma de jatos de forma balística. Essa figura com quatro jatos é apenas uma visão demonstrativa, neste caso, pois pela planilha de cálculo apresentada aqui é sempre admitido que apenas uma abertura superior e uma inferior estarão funcionando ao mesmo tempo (adaptações podem ser feitas à planilha, se desejadas, para capacitá-la a representar mais aberturas vertendo simultaneamente). Em cada local de abertura indicado, poderá ser adaptado qualquer tipo de dispositivo (dentre os vários que serão construídos, a saber: orifícios de formas diversas, bocal interno, bocal externo e outros).

Ainda na Figura 1, vê-se o reservatório alto com a base da parede de jusante conectada à parede de uma das extremidades do reservatório baixo (este bem longo, para permitir a recepção dos jatos). O retorno da água do reservatório baixo para o alto se dá por recalque (bomba não visível no desenho), para dentro de uma câmara de tranquilização estreita, que fica entre a parede de montante do reservatório alto (ao fundo da perspectiva) e uma parede porosa (uma “gaiola” de 13cm de espessura atravessando transversalmente o reservatório alto) vertical que atravessa aquele reservatório de lado a lado, transversalmente à figura. Isto impede que correntes de circulação interna e excesso de turbulência atrapalhem uma aproximação tranqüila dos filetes líquidos que alimentam o escoamento através das várias aberturas na parede frontal do reservatório alto.

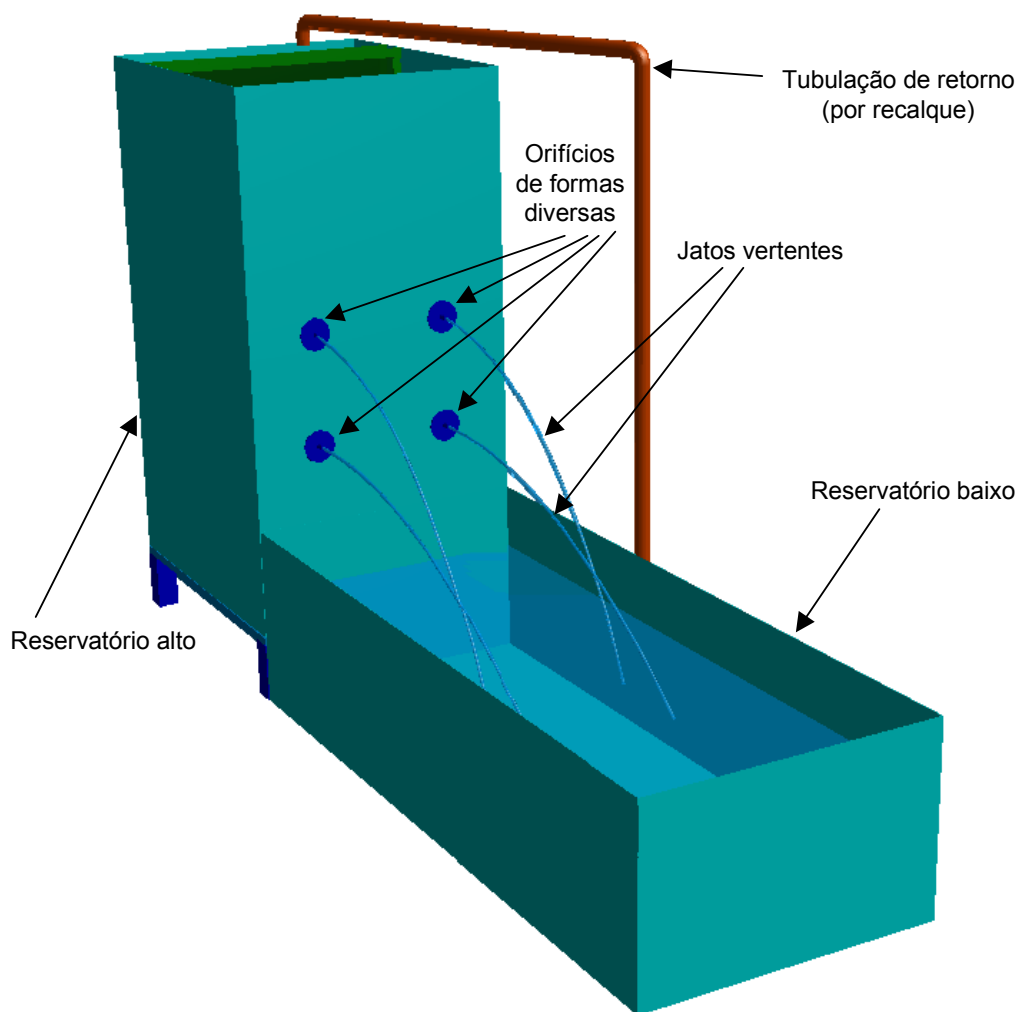


Figura 1 – Visão artística da bancada em funcionamento com os quatro jatos vertendo
(Nota: na situação do presente projeto, calculado pelas planilhas das figuras 2 e 3, apenas um jato superior e um inferior podem verter simultaneamente).

A Figura 2, uma vista lateral dos reservatórios e dos jatos vertentes, mostra algumas dimensões principais que caracterizam geometricamente a bancada e os valores de algumas variáveis do estado do fluxo hidráulico – basicamente, níveis de água, desníveis geométricos e dimensões dos jatos. Tais parâmetros e variáveis de estado são definidos na próxima seção, onde se estabelecerá sua correspondência com os respectivos valores desta figura.

As dimensões em planta do reservatório alto não são abordadas aqui, pois podem permanecer a critério do projetista. Devem, porém obedecer a:

- a) Critérios construtivos, para permitir o espaço interno para os equipamentos, tais como o tubo extravasor vertical deslizante (permitindo-se à sua cota de topo variar conforme se desejar uma carga hidráulica maior ou menor sobre as aberturas) e para a “gaiola” tranquilizadora.

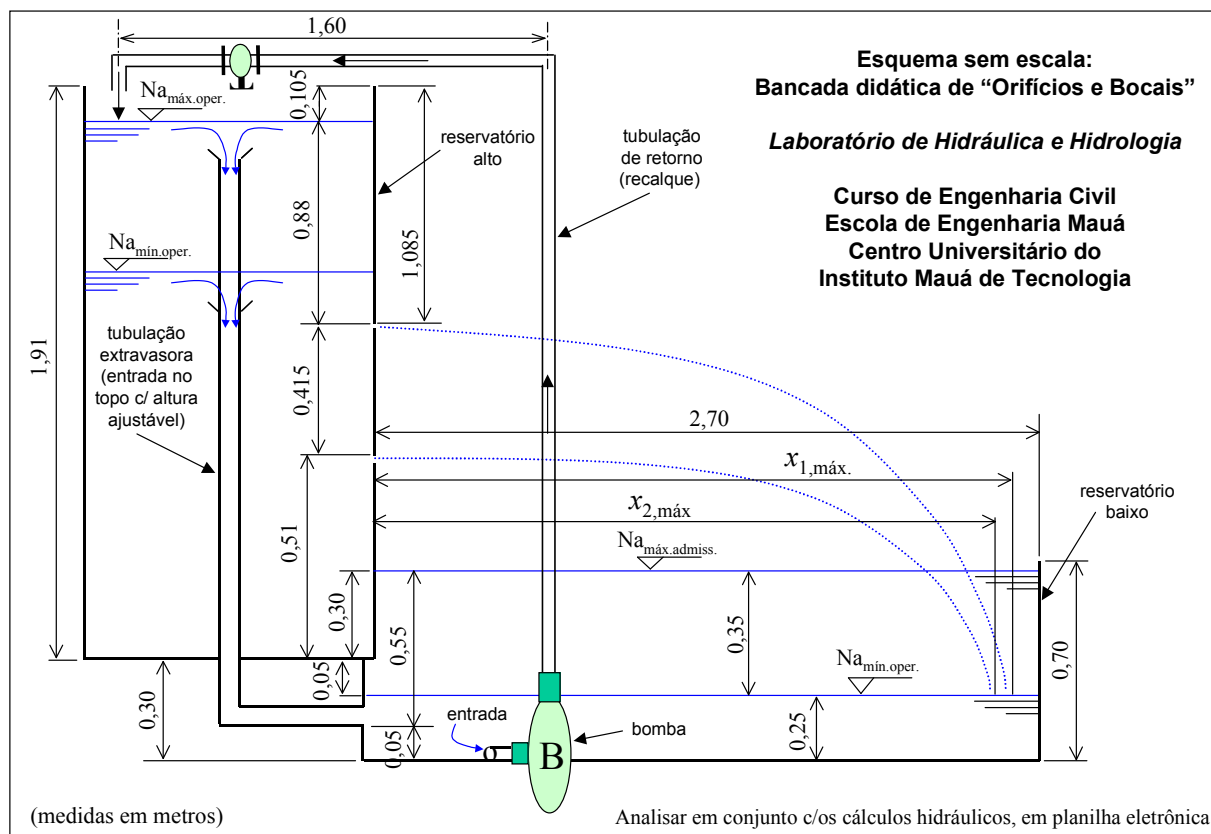


Figura 2 – Vista lateral esquemática dos reservatórios, jatos vertentes dos orifícios 1 (alto) e 2 (baixo), com bomba, níveis de água operacionais e medidas características.

- b) Critérios de bom funcionamento hidráulico, como por exemplo uma distância mínima entre cada abertura e as paredes laterais, de forma a permitir uma aproximação dos filetes líquidos, com a natural concentração, quase simétrica.
- c) Uma coerência entre os valores do volume entre o nível d'água (NA) mínimo e o máximo operacionais do reservatório alto e o volume entre o NA mínimo e o NA máximo operacionais do reservatório baixo – em outras palavras, no caso de a água do volume assim descrito no reservatório alto descer toda para o reservatório baixo, ela deve caber no volume entre os NNAA extremos operacionais deste; caso contrário, extravasará para o ambiente externo à bancada. Portanto, o projetista precisará definir para o reservatório baixo uma área em planta suficiente para abrigar aquele volume – restrita, também, a apresentar um comprimento maior que o maior alcance de jato em condições operacionais (como será abordado mais adiante, na descrição dos cálculos).

Vários tipos de aberturas (orifícios ou bocais) serão disponibilizados para ajuste na bancada, podendo qualquer um deles ser acoplado em qualquer uma das quatro posições mostradas na Figura 2.

As dimensões laterais da bancada (na direção perpendicular ao plano da Figura 2), bem como o comprimento da base do reservatório alto (dimensão horizontal no plano da Figura 2), não são abordados pelo cálculo em planilha.

Na próxima seção, são definidos e denominados os parâmetros e variáveis principais.

3. CÁLCULOS PARA DIMENSIONAMENTO

3.1 Descrição dos parâmetros e das variáveis de estado adotados no cálculo

Os parâmetros relativos à bancada e as variáveis hidráulicas e geométricas características do estado do fluxo empregados nos cálculos (“variáveis de estado”) são:

- . Diâmetro e tipo da abertura (orifício ou bocal) superior, D_1 : neste cálculo, por segurança, para que se obtivesse o alcance mais longo possível para o jato, dentre os tipos de abertura que serão disponibilizados foi considerado aquele que produz a maior velocidade horizontal à saída: o orifício circular de borda delgada. O diâmetro adotado é $D_1 = 0,028\text{m}$.
- . Distância atingida pelo jato balístico ao descer dado desnível desde sua saída pela abertura: x_1 . É função da velocidade do jato à saída (pela abertura), do desnível sofrido (y_1 , definido mais adiante) e da aceleração da gravidade local. Na planilha de cálculo da Figura 3, é mostrada essa relação, que se usa nos cálculos ali efetuados.
- . Carga hidráulica sobre a abertura superior, H_1 : é o desnível entre o NA no reservatório alto (NA_1) e o eixo (horizontal) da abertura. Na situação extrema para dimensionamento longitudinal do reservatório baixo, foi calculada considerando o NA_1 na posição máxima operacional (0,105m abaixo da borda do reservatório alto), de forma tal que o jato produzido atinja a distância horizontal máxima possível, $x_{1,máx}$. Com o topo do tubo extravasor ajustado em sua posição mais alta possível, H_1 resulta 0,88 neste exemplo (Figura 2).
- . Desnível entre os eixos das aberturas superior e inferior, o qual foi adotado com o valor 0,415 nos cálculos deste exemplo (não se atribui um símbolo para denominar esta grandeza).
- . Desnível sofrido pelo jato balístico desde a abertura superior até o ponto em que toca o NA mínimo operacional do reservatório inferior (tendo então percorrido a distância horizontal $x_{1,máx}$ desde a abertura), denominado $y_{1,máx}$. Foi adotado como $0,415 + 0,51 + 0,05 = 0,975\text{m}$, neste exemplo de cálculo (ver Figura 2).
- . Coeficiente de vazão (ou de descarga) da abertura, adimensional, C_Q : valor característico da abertura, que serve para estimar a vazão vertente, sendo função de seu formato e podendo ser conhecido por informações empíricas. É o produto do coeficiente de velocidade (C_v , adimensional definido abaixo) pelo coeficiente de contração da seção do jato após sair pela abertura, C_c (quociente entre a seção transversal do jato contraído, pouco após sair da abertura, e a área geométrica da abertura – também adimensional). Todos estes coeficientes são objeto de apresentação e discussão mais detalhada em PIMENTA (1980) e PORTO (1999). Neste exemplo de cálculo de dimensionamento em condição crítica, em que ambas as aberturas (superior e inferior) foram consideradas orifícios circulares de borda delgada, os valores destes coeficientes foram pesquisados na literatura (PIMENTA, 1980) como função do nº de Reynolds (vide definição mais adiante) de cada orifício e do estado do fluxo nele.

SITUAÇÕES CRÍTICAS PARA DIMENSIONAMENTO

Analisar em conjunto com o esquema mostrado na Figura 1

1ª) Orifício superior (orifício 1)

<p>Variáveis e parâmetros em valores extremos:</p> <p>H_1: no máximo = 0,880 m (decisão)</p> <p>D_1: no máximo = 0,028 m (decisão)</p> <p>C_Q: no máximo = 0,610 (Pimenta,1980-3.11)</p> <p>($g = 9,78 \text{ m/s}^2$)</p> <p>Cálculos:</p> <p>$V_{r,1} = C_v(2gH_1)^{1/2} = 4,107 \text{ m/s}$</p> <p>$S_{c,1} = C_c \pi D_1^2 / 4 = 0,000379 \text{ m}^2$</p> <p style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">$Q_1 = V_{r,1} S_{c,1} = 0,001558 \text{ m}^3/\text{s}$</p> <p>Cálculo balístico:</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px auto;"> $x_{1,m\acute{a}x} = \frac{V_{1,m\acute{a}x} \sqrt{2y_{1,m\acute{a}x}}}{\sqrt{g}}$ </div> <p>$y_{1,m\acute{a}x} = 0,415\text{m} + 0,51\text{m} - 0,05\text{m} = 0,875 \text{ m}$</p> <p style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 5px auto;">Dos dados: $H_1 = 0,880 \text{ m} \implies x_{1,m\acute{a}x} = 1,737 \text{ m}$</p> <p style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 5px auto;">$L_{\text{Res.Infer.}} = x_{1,m\acute{a}x} + 0,50\text{m (segurança)} = 2,237 \text{ m}$</p>	<p>Valores que serão assim determinados:</p> <p>$x_{1,m\acute{a}x}$</p> <p>$L_{\text{Res.Infer.}}$</p> <p>$Q_{1,m\acute{a}x}$ (que será parte de $Q_{\text{m\acute{a}x.,Bomba}$)</p> <p>Variáv. e parâm. estimados a favor da segurança:</p> <p>$C_{v,1}$: no máximo = 0,990</p> <p>Verificando o N° de Reynolds = $V_{r,1} D_1 / \nu$:</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 5px auto;">$R_1 = 1,2E+05$</div> <p>($\nu_{\text{água}} = 1E-06 \text{ m}^2/\text{s}$)</p> <p>Conclusão: Confere com a literatura (Pimenta, 1980 - 3.11)</p>
---	--

2ª) Orifício inferior (orifício 2)

<p>Variáveis e parâmetros em valores extremos:</p> <p>H_2: no máximo = 1,295 m (decisão)</p> <p>D_2: no máximo = 0,028 m (decisão)</p> <p>C_Q: no máximo = 0,610 (Pimenta, 3.11)</p> <p>($g = 9,78 \text{ m/s}^2$)</p> <p>Cálculos:</p> <p>$V_{r,2} = C_v(2gH_2)^{1/2} = 4,983 \text{ m/s}$</p> <p>$S_{c,2} = C_c \pi D_2^2 / 4 = 0,000379 \text{ m}^2$</p> <p style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">$Q_2 = V_{r,2} S_{c,2} = 0,001890 \text{ m}^3/\text{s}$</p> <p>Cálculo balístico:</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px auto;"> $x_{2,m\acute{a}x} = \frac{V_{2,m\acute{a}x} \sqrt{2y_{2,m\acute{a}x}}}{\sqrt{g}}$ </div> <p>$y_{2,m\acute{a}x} = 0,51\text{m} - 0,05\text{m} = 0,46 \text{ m}$</p> <p style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 5px auto;">Dos dados: $H_2 = 1,295 \text{ m} \implies x_{2,m\acute{a}x} = 1,528 \text{ m}$</p> <p style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 5px auto;">$L_{\text{Res.,Infer.}} = x_{2,m\acute{a}x} + 0,50\text{m (segurança)} = 2,03 \text{ m}$</p>	<p>Valores que serão assim determinados:</p> <p>$x_{2,m\acute{a}x}$</p> <p>$L_{\text{Res.Infer.}}$</p> <p>$Q_{2,m\acute{a}x}$ (que será parte de $Q_{\text{m\acute{a}x.,Bomba}$)</p> <p>Variáv. e parâm. estimados a favor da segurança:</p> <p>$C_{v,2}$: no máximo = 0,990</p> <p>Verificando o N° de Reynolds = $V_{r,2} D_2 / \nu$:</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 5px auto;">$R_2 = 1,4E+05$</div> <p>($\nu_{\text{água}} = 1E-06 \text{ m}^2/\text{s}$)</p> <p>Conclusão: Confere com a literatura (Pimenta, 1980 - 3.11)</p>
--	--

Figura 3 – Planilha eletrônica (no ambiente Microsoft Excel®) para cálculo automatizado das distâncias horizontais dos jatos dos orifícios 1 (superior) e 2 (inferior), permitindo dimensionar longitudinalmente o reservatório inferior.

. Velocidade média real (na seção transversal do jato) do escoamento na abertura superior, $V_{r,1}$, a qual pode ser estimada assim:

$$V_{r,1} = C_{v,1} (2 g H_1)^{1/2} \quad (1)$$

onde g : é a aceleração da gravidade e

$C_{v,1}$: é o coeficiente de velocidade do orifício superior (estimado empiricamente), que é um fator que produz uma redução na velocidade – levando em conta, assim, a perda de carga singular na passagem pela abertura.

. Vazão do jato vertente pela abertura superior, Q_1 (também considerada a “vazão real” do jato), a qual pode ser estimada assim:

$$Q_1 = V_{r,1} S_{c,1} \quad (2)$$

onde $S_{c,1}$ é a seção contraída do jato vertente pela abertura superior.

. Comprimento do reservatório baixo (ou inferior), representado por $L_{Res.Infer.}$. Deve ser maior que as distâncias percorridas longitudinalmente pelos jatos balísticos de ambas as aberturas, por segurança. Resulta da planilha de cálculo, após as estimativas das distâncias percorridas por ambos os jatos, sendo a elas adicionada uma parcela de 0,5m, por segurança.

. Número de Reynolds de um jato, R , adimensional: definido na Mecânica dos Fluidos para a avaliação do nível de turbulência. É função da viscosidade cinemática do fluido, ν (que, no caso da água, vale $10^{-6}m^2/s$), do diâmetro e da velocidade real do jato na abertura superior. Para a abertura superior, por exemplo, é calculado como

$$R_1 = V_{r,1} D_1 / \nu \quad (3)$$

O nº de Reynolds serve como diretriz para a estimativa empírica dos valores dos coeficientes de velocidade, de contração e de vazão do jato (PIMENTA, 1980).

. Parâmetro D_2 , que representa o diâmetro da abertura inferior, definido de forma análoga ao correspondente diâmetro da abertura superior. Neste exemplo de cálculo, adotou-se para a abertura inferior, por segurança, o mesmo tipo de orifício circular de borda delgada que na abertura superior, com o mesmo diâmetro.

. Variáveis de estado $V_{r,2}$, Q_2 , $x_{2,máx}$, $y_{2,máx}$ e H_2 , as quais podem ser definidas para a abertura inferior analogamente às respectivas definições enunciadas para a abertura superior. Ressalte-se que a carga hidráulica sobre a abertura inferior, H_2 , é a soma de H_1 com o desnível entre os eixos das duas aberturas. Com o tubo extravasor deslizante ajustado na posição mais alta possível, H_2 resulta $0,88+0,415= 1,295m$ no caso mostrado na Figura 2.

. Comprimento da tubulação vertical de extravasamento (ou extravasor) do excesso de água que é bombeada mas não verte pela(s) abertura(s) em funcionamento – $L_{tub.ex.}$, adotada no exemplo da Figura 2 como 2,7m, guardando certa folga.

3ª) Extravasor : Estimativa da sua capacidade de vazão com o NA do reservatório 0,03m abaixo da borda

Dados da tubulação de extravasamento:

$D_{\text{tub.ex.}} = 0,100 \text{ m}$
 $L_{\text{tub.ex.}} = 2,700 \text{ m}$
 $C_{\text{tub.ex.}} = 130 \text{ (PVC)}$
 $S_{\text{tub.ex.}} = 0,007854 \text{ m}^2 \text{ (calculada)}$

$$\Delta H = \frac{10,643 \cdot Q^{1,85} \cdot L}{C^{1,85} \cdot D^{4,87}}$$

(Hazen Williams, fórmula utilizada)

Adota-se um valor para
 $Q_{\text{máx.}} \text{ estimada: } Q = 0,02522 \text{ m}^3/\text{s}$,
estimando ΔH pela a fórmula acima e
considerando $H_{\text{geom}} = 1,855 \text{ m}$ (c/ Reserv.inferer.cheio,
e $L = L_{\text{Tot}} = 12,40 \text{ m}$. p/ segurança)

Lista de singularidades (peça)	L _{equival.} respectivos	
	(Nº de D)	(m)
Entrada de tubulação	17	1,7
Saída de tubulação	35	3,5
Cotovelo 90°	45	4,5
TOTAL =		9,7

Recalcula-se H_{geom} lembrando que, para haver
equilíbrio deve valer: $H_{\text{geom}} = \frac{Q^2}{2gS^2} + \Delta H$

Na convergência p/ o valor de H_{geom} acima,
resulta $H_{\text{geom}} = 1,855 \text{ m}$
 (em que a componente de perda de carga é 1,328 m)

$L_{\text{Tot.}} = L_{\text{tub.ex.}} + \Sigma L_{\text{equival.}} = 12,40 \text{ m}$

Conclusão de segurança: A vazão do extravasor é cerca de 7,31 vezes a vazão máxima que poderá circular pela bancada.

4ª) Sistema Motor-Bomba

Dados da tubulação do retorno:

$D_{\text{tub.ret.}} = 0,075 \text{ m}$
 $L_{\text{tub.ret.}} = 3,900 \text{ m}$ (ver. Tab. à direita)
 $C_{\text{tub.ret.}} = 130 \text{ (PVC)}$
 $S_{\text{tub.ret.}} = 0,004418 \text{ m}^2 \text{ (calculada)}$

Trechos (m)	L _{trch} (m)
Subida após a bomba	2,10
Horizontal até reserv. super.	1,60
Outros	0,20
TOTAL =	3,90

$$\Delta H = \frac{10,643 \cdot Q^{1,85} \cdot L}{C^{1,85} \cdot D^{4,87}}$$

(Hazen Williams, fórmula utilizada)

Lista de singularidades (peça)	L _{equival.} respectivos	
	(Nº de D)	(m)
Entrada de tubulação	17	1,275
Redução grad. de diâm.	6	0,45
Ampliação grad. de diâm.	12	0,9
Cotovelo 90°	45	3,375
Registro de gaveta aberto	8	0,6
Curva 90°	30	2,25
TOTAL =		8,85

Considerando-se que a $Q_{\text{máx.}} \text{ desejada}$
 é $Q_{\text{máx.}} = Q_1 + Q_2 = 0,00345 \text{ m}^3/\text{s}$,
 estimando-se ΔH pela a fórmula acima
 e adotando-se $H_{\text{geom}} = 1,87 \text{ m}$ (c/Res.inf.vazio,p/segur.)
 e $L = L_{\text{Tot}} = 12,75 \text{ m}$,
 resulta $\Delta H_{\text{Tot}} = 0,140 \text{ m}$

$L_{\text{Tot.}} = L_{\text{Tubul.}} + \Sigma L_{\text{equival.}} = 12,75 \text{ m}$

Nota: H_{geom} utilizado acima foi estimado considerando que a saída do retorno para o reservatório superior fique 0,10m acima da sua borda e contando com lâmina d'água mínima de 0,30m no reserv. Infer. (c/ fundo 0,5m abaixo do fundo do res. super.).

Assim, considerando-se que
 $H_{\text{man.}} = H_{\text{geom}} + \Delta H_{\text{Tot.}} = 2,010 \text{ m}$
 e que $Q_{\text{Proj.}} = Q_{\text{máx.}} = 0,00345 \text{ m}^3/\text{s}$,
 pode-se estimar
 $Pot_{\text{Útil}} = \gamma H_{\text{man}} Q_{\text{Tot.}} = 67,782 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{s} (= 0,90 \text{ HP})$
 ($\gamma_{\text{ág.}} = 9780 \text{ N/m}^3$)

Estimando rendimento $\eta = \sim 0,89$, vem:

$Pot_{\text{Fornec.}} = Pot_{\text{Út}} / \eta = 76,159 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{s} (= 1,02 \text{ HP})$

Figura 4 – Planilha eletrônica (no ambiente Microsoft Excel®) para a verificação do sistema de extravasamento e cálculo do sistema de recalque, definindo potência de bomba.

- . Diâmetro da seção transversal da tubulação de extravasamento, $D_{\text{tub.ex.}}$, fornecido à planilha como 0,100m neste exemplo. Na condição extrema, admite-se que essa tubulação funcione a plena carga, sob pressão – ou seja, afogada sob o NA_1 máximo operacional.
- . Coeficiente da fórmula de Hazen-Williams para o tipo de material constituinte do extravasador, $C_{\text{tub.ex.}}$ (vale mais quanto maior a condutividade hidráulica da tubulação), fornecido em tabelas empíricas para os mais variados materiais. Foi adotado o valor 130 (para uso no S.I. de unidades), para PVC (ver AZEVEDO NETTO *et al.*, 2003).
- . Área da seção transversal da tubulação de extravasamento, $S_{\text{tub.ex.}}$, calculada pela planilha para o diâmetro fornecido.
- . Comprimento equivalente a uma singularidade para determinada tubulação, $L_{\text{equival.}}$, representando o comprimento de tubulação daquele mesmo tipo que produziria a mesma perda de carga causada pela singularidade. É fornecido por tabelas empíricas e empregado para avaliar perdas de carga singulares (ou localizadas) pelo “método dos comprimentos equivalentes” (AZEVEDO NETTO *et al.*, 2003), aplicado pela planilha tanto no cálculo do extravasador (3ª parte da planilha) quanto no dimensionamento da bomba (4ª parte).
- . Comprimento total da tubulação, $L_{\text{Tot.}}$, aplicado pela planilha tanto no cálculo do extravasador (3ª parte da planilha) quanto no dimensionamento da bomba (4ª parte). Calcula-se como a soma dos comprimentos reais de tubo e dos comprimentos equivalentes de todas as singularidades atravessadas pela água no percurso (ver PIMENTA, 1980), para efeito de cálculo da perda de carga total no sistema de tubulações.
- . Perda de carga ao longo de trecho homogêneo de tubulação, ΔH . Nesta planilha, é calculada pela fórmula de Hazen-Williams (ver Figura 4), em função da vazão, Q , do comprimento da tubulação, L , do coeficiente C e do diâmetro da tubulação, D . Numa extensão de uso, pode-se estimar a perda de carga em todo o sistema de tubulações e singularidades ($\Delta H_{\text{Tot.}}$) se for empregado o “comprimento total”, $L_{\text{Tot.}}$, na posição reservada ao comprimento L em algum método de cálculo de perda de carga distribuída. Nesta planilha se usa a fórmula de Hazen-Williams de perdas de carga, tanto no cálculo do extravasador (3ª parte da planilha) quanto no dimensionamento da bomba (4ª parte).
- . Altura geométrica, $H_{\text{geom.}}$: desnível entre o NA inferior e o NA superior em problemas em que a água transita entre dois reservatórios interligados por conduto forçado. Emprega-se este conceito tanto no cálculo do extravasador (3ª parte da planilha, em que se imagina uma condição extrema em que a tubulação vertical fique afogada entre os dois NNAA) quanto no dimensionamento da bomba (4ª parte, em que esta eleva a água do NA menor para o maior). Na planilha, este valor é calculado em cada caso extremo pelos valores de NA escolhidos.
- . Altura manométrica da bomba, $H_{\text{man.}}$, a qual deve coincidir com a soma da altura geométrica ($H_{\text{geom.}}$) e das perdas de carga totais ($\Delta H_{\text{Tot.}}$) para que a bomba funcione bem num regime supostamente permanente.
- . Potência útil máxima necessária da bomba, na condição extrema de funcionamento, $Pot_{\text{út.}}$, a qual pode ser calculada como o quociente da “potência bruta” máxima da bomba (produto do peso específico da água, $\gamma_{\text{ág.}}$, pela $H_{\text{man.}}$ e pela vazão então bombeada para manter as duas aberturas vertendo em regime permanente, $Q_{\text{Tot.}}$) pelo rendimento hidráulico, η (ver

fórmulas na Figura 4), fornecido pelo fabricante da bomba para cada condição de funcionamento.

3.2 Cálculos efetuados pela planilha para dimensionar longitudinalmente o reservatório inferior

Nas partes da planilha numeradas como “1ª” e “2ª” (Figura 3), respectivamente dedicadas aos cálculos dos alcances dos jatos superior e inferior ($x_{máx,1}$ e $x_{máx,2}$), o projetista pode escolher valores para a carga hidráulica sobre a abertura, o diâmetro nominal da mesma, os coeficientes de vazão e de velocidade e o desnível sofrido pelo jato até encontrar o NA do reservatório inferior. Para representar a situação crítica, admite-se a carga hidráulica no reservatório alto no seu valor máximo operacional e, no reservatório inferior, o NA na posição mínima operacional.

Os valores dos coeficientes hidráulicos das aberturas, ambas aqui adotadas como orifícios circulares de bordas delgadas, foram baseados na literatura, como funções do nº de Reynolds (ver respectivos detalhes na planilha). Após uma estimativa inicial, calcula-se a velocidade real e, daí, o adimensional de Reynolds – verificando-se o acerto da estimativa inicial e, eventualmente, corrigindo-a se necessário.

O alcance $x_{máx}$ é calculado, para cada orifício, em função do desnível sofrido pelo jato (função da geometria da bancada e da posição do NA crítica em cada caso – ver detalhes na planilha). A fórmula (tradicional) da parábola balística relacionando estas duas posições, ambas medidas a partir da posição da abertura, é mostrada na planilha.

Para cada abertura resulta um alcance diferente do jato. Não se sabe de antemão qual dos dois jatos terá maior alcance, pois o superior tem menor carga, mas percorre uma distância vertical maior até atingir o NA do reservatório inferior (analisar a fórmula balística para melhor compreensão desta indefinição *a priori*). Nesta planilha, optou-se por acrescentar, por segurança, 0,5m ao maior “alcance máximo”, dentre os calculados para os dois jatos. O resultado dessa soma é adotado como comprimento para construir o reservatório inferior. O projetista pode modificar este critério se desejar, aumentando ou reduzindo a segurança.

No exemplo fornecido na Figura 3, conclui-se que o reservatório deverá ser projetado com um comprimento de aproximadamente 2,24m.

3.3 Cálculos efetuados pela planilha para dimensionar o extravasor e a bomba

A “3ª parte” da planilha eletrônica, na Figura 4, mostra inicialmente os valores característicos adotados para a tubulação de extravasamento. Os comprimentos equivalentes das singularidades dessa tubulação são somados na tabela específica, obtendo-se um total para elas. Este é somado ao comprimento real de tubos para se obter o comprimento “L” que será usado para estimar a perda de carga total no sistema (com a fórmula de Hazen-Williams, mostrada na planilha, canto superior direito).

Em seguida, adota-se um valor para a vazão máxima que poderá passar pela tubulação extravasora (dentro do retângulo respectivo) e será automaticamente calculada a altura geométrica necessária para que ela seja conduzida tubulação abaixo. Este valor poderá coincidir ou não com a altura geométrica real da bancada nas condições críticas já vistas. Caso não haja tal coincidência, pode-se continuar a tentar novos valores de vazão até obtê-la. Ao ser atingida tal meta, ter-se-á o valor correto da vazão máxima que o sistema poderá extravasar.

A planilha também calcula a relação (quociente) entre essa vazão e a vazão circulante que precisará extravasar por segurança (isto é, a soma das vazões pelas duas aberturas, idealmente coincidente com a vazão mínima requerida na bomba). Tal quociente fornece uma idéia da

segurança com que o sistema trabalha contra vazamentos para fora da bancada. No exemplo mostrado, a vazão máxima que o extravasor pode conduzir é cerca de 7,3 vezes a vazão circulante – denotando um bom nível de segurança.

A “4ª parte” da planilha (ainda na Figura 4) adota uma metodologia semelhante à da 3ª parte, mas agora para o cálculo da altura manométrica que a bomba precisará elevar – o método dos comprimentos equivalentes é novamente usado para calcular a perda total de carga no sistema. O raciocínio e os cálculos são bem detalhados na planilha. A vazão adotada para o dimensionamento da “bomba mínima” é a soma das vazões máximas (condição crítica: duas aberturas vertendo simultaneamente, como visto na Figura 3) pelas duas aberturas.

Com a perda de carga total e a altura geométrica no sistema elevatório, calcula-se a potência útil necessária da bomba. Adotando-se um fator de rendimento conveniente, η , calcula-se então a potência a ser fornecida à bomba, para que se possa efetuar sua encomenda ou verificar se se dispõe de semelhante bomba na instituição.

Com essa descrição, fica evidenciado que a planilha constitui uma ferramenta que permite rapidamente o teste de várias hipóteses de projeto, deixando ao projetista mais tempo livre para a criação de alternativas.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho resultou uma planilha de cálculo eletrônica que torna toda a parte do projeto da bancada relativa a cálculos especulativos, estudo de alternativas e dimensionamento uma tarefa menos árdua e mais rápida. Com isto, reserva-se mais tempo e atenção para que o projetista empregue sua criatividade à busca da melhor concepção geométrica.

Com efeito, apesar de não haver à época, no laboratório disponível para abrigar a bancada, um sistema prévio de apoio eletro-hidráulico – tal como motor, bomba ou instalações hidráulicas para o extravasamento ou a circulação de água na bancada de orifícios e bocais – foi possível viabilizar sua construção com uma concepção de alimentação e extravasamento prática e leve – que permitiu atingir vazão considerável e jatos de longo alcance (cerca de dois metros).

Detalhes tais como a determinação da largura do reservatório baixo e uma definição mais precisa da geometria dos vertedores e bocais a serem disponibilizados não foram mais explorados aqui porque se decidiu deixá-los a cargo da criatividade de cada projetista e necessidade de cada laboratório e curso (vide diretrizes de projeto específicas ao final da Seção 2).

A planilha está pronta para ser disponibilizada para o usuário interessado, na forma apresentada. Porém, uma vez que tem seus códigos abertos, apresenta grande facilidade para que cada usuário efetue mudanças que permitam melhor atingir seus objetivos específicos de projeto.

Além da finalidade para que foi construída, esta planilha pode também servir como um exercício para estudo dirigido de dimensionamento hidráulico por parte de estudantes de engenharia. Estes podem modificá-la como desejarem para aplicação em problemas diversos, exercitando assim tanto seus conhecimentos hidráulicos como os de uso de planilha de cálculo para a solução de problemas de engenharia.

Finalmente, cumpre lembrar que numa sociedade em desenvolvimento, tal como a brasileira, com recursos reduzidos para a educação em todos os graus, deve-se incentivar o intercâmbio de técnicas de projeto em vários níveis – não se devendo fazer exceção às técnicas de concepção e dimensionamento de bancadas didáticas. Isto permitirá a cada grupo de trabalho contar com mais ferramentas para dimensionar bancadas de laboratório de acordo com as próprias necessidades – evitando, assim, o investimento, tão comum, de recursos na

compra de bancadas “de prateleira” que às vezes podem não surtir efeitos ótimos para os ambientes e os objetivos de cada instituição.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio oferecido pelo Instituto Mauá de Tecnologia-IMT, pela Diretoria da Escola de Engenharia Mauá e pela Coordenadoria do Curso de Engenharia Civil, tanto nos aspectos práticos e financeiros que viabilizaram o projeto quanto na discussão de idéias durante o mesmo; bem como à Gerência de Manutenção e Serviços-GMS e à Oficina do IMT, que não pouparam esforços para que o projeto resultasse prático e fisicamente viável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALFONSI, G.; ORSI, E. **Problemi di idraulica e meccanica dei fluidi**. Milão: Politécnico di Milano, Istituto di Idraulica, 1984. 507p.

AZEVEDO NETTO, J.M. DE; FERNANDES Y FERNANDES, Z..M.; ARAÚJO, R. DE; ITO, A.E.. **Manual de Hidráulica**. São Paulo: Edgard Blücher, 8.ed., 3.reimpr., 2003. 670p.

GHETTI, A. **Idraulica**. Pádua: Universidade de Pádua, 2.ed., 1995. 566p.

BRASIL. Lei nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996. Estabelece as diretrizes e bases da educação nacional. Cap. IV, Art. 43, §3. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, v. 134, n. 248, 23 dez. 1996.

LENCASTRE, A. **Hidráulica geral**. Lisboa: Armando Lencastre, 2.ed., 1996. 652p.

MICROSOFT. **Microsoft - Office 97® Professional**. 1 CD-ROM. São Paulo: Microsoft Informática LTDA, 1997.

PIMENTA, C. F. **Hidráulica Geral. Apostilas [de] Laboratório**, fasc.7, São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1970. 90p.

PIMENTA, F. C. **Curso de hidráulica geral**. v.1, 4.ed., Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1980. 482p.

PORTO, R. DE M. **Hidráulica Básica**. 2.ed., São Carlos: EESC-USP, 1999. 540p.

SPREADSHEET FOR DESIGNING A BENCH TO DEMONSTRATE THE FLOW THROUGH ORIFICES AND NOZZLES: THE RESULT OF INTERNAL TRAINEE WORK AT MAUÁ ENGINEERING SCHOOL

Abstract: *A practical contribution is offered for teachers and engineers needing to design a school bench for the practical teaching of flow through orifices and nozzles during the Hydraulics course. An electronic spreadsheet is conceived, and published, such as to help with the computations necessary to define the dimensions of bench parts, by testing alternative hypotheses; as well as to estimate final values resulting for the hydraulic state variables describing the flow. In spite of all the concepts and methods for the necessary computations being of a basic nature and of common knowledge in Hydraulics, the complete process of designing, involving trial and error, may be rendered considerably time-consuming and troublesome. Moreover, practical restrictions such as space availability, laboratory height limitation and limited electrical power in the building facilities, as well as an eventual interest to take advantage of components available in store, (or, perhaps, parts being offered for reduced costs – for instance, a centrifuge pump for water cycling), may require the designer to test several sizing alternatives, then submitting each one to a complete design process such as to accommodate it to those restrictions. At this point, spreadsheets become a tool useful to speed up most of the computational work needed. This spreadsheet was prepared and is presented for a specific bench conception created by a teacher and a trainee student (the authors, respectively); however, most its features are usual, and others may be changed, improved or incremented by the user in order to comply to specific needs.*

Key-words: *Hydraulics laboratory, Orifices and nozzles, Speeding up design, Electronic spreadsheet, School-bench design.*