

# XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

## AQDEURIM: UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL DESENVOLVIDA PARA AUXILIAR NA DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA HIDRÁULICA DE POÇOS

Yuri Tomaz Neves<sup>1</sup>; Laércio Leal dos Santos<sup>2</sup>; Bruno Menezes da Cunha Gomes<sup>3</sup>; Cinthia Maria de Abreu Claudino<sup>4</sup>; Thiago de Sá Sena<sup>5</sup>; Maria Ingridy Lacerda Diniz<sup>6</sup>.

**Resumo** - O poço é a principal obra civil que estabelece a conexão entre o usuário de água subterrânea e o aquífero profundo. No seu dimensionamento um dos principais parâmetros a ser analisado é a eficiência hidráulica, de vez que tem implicações diretas e determinantes no custo de captação das águas subterrâneas. Para se determinar a eficiência hidráulica é necessário utilizar uma grande quantidade de fórmulas e funções matemáticas, o que demanda tempo. Nessa ótica, o presente artigo tem como objetivo apresentar um “software” desenvolvido para automatizar o processo de determinação da eficiência hidráulica de poços. O “software” foi desenvolvido no ambiente Visual Studio utilizando a linguagem de programação Visual Basic. Como resultado foi possível obter uma ferramenta de fácil manuseio, interface autoexplicativa, e com soluções, validadas com êxito, por cálculos manuais. Através dos resultados obtidos, verifica-se que a ferramenta será de grande utilidade para os profissionais que trabalham com esse tipo de estrutura, tendo em vista que proporcionará a construção de poços mais econômicos com maior segurança e praticidade.

**Abstract** - The well is the principal civil work, which establishes the bond between groundwater users and the deep aquifer. During its sizing, of the main parameters to be analyzed is the hydraulic efficiency, since it has direct and decisive implications for the cost of funding of groundwater. To determine the hydraulic efficiency is necessary to use a large amount of mathematical formulas and functions, which takes a lot of time. From this perspective, this article aims to present a software designed to automate the determination process of the hydraulic efficiency of the wells. The software was developed in Visual Studio using the Visual Basic programming language. As result,

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Civil - Universidade Estadual da Paraíba: Campus VIII, Araruna – PB, (83) 99941-4851, yuutomaz@gmail.com.

<sup>2</sup> Doutor em Engenharia Civil - Universidade Estadual da Paraíba: Campus VIII, Araruna – PB, (83) 99944-7494, laercioeng@hotmail.com.

<sup>3</sup> Graduando em Engenharia Civil - Universidade Estadual da Paraíba: Campus VIII, Araruna – PB, (83) 99620-1194, brunocunhaeng@gmail.com.

<sup>4</sup> Graduanda em Engenharia Civil - Universidade Estadual da Paraíba: Campus VIII, Araruna – PB, (83) 99618-9626, cinthiamariaac@gmail.com.

<sup>5</sup> Graduando em Engenharia Civil - Universidade Estadual da Paraíba: Campus VIII, Araruna – PB, (83) 99957-2703, tg.777@hotmail.com.

<sup>6</sup> Graduanda em Engenharia Civil - Universidade Estadual da Paraíba: Campus VIII, Araruna – PB, (83) 99654-8343, ingridy\_m12@hotmail.com.

it was possible to get an easy tool to use, self-explanatory interface, and validated solutions for manual calculations. From the results, it appears that the software will be useful for professionals who work with this type of structure in order to provide a construction of economic wells with greater safety and convenience.

**Palavras-Chave** – Água Subterrânea. Eficiência Hidráulica. Software.

## 1 - INTRODUÇÃO

Água subterrânea é toda a água que ocorre abaixo da superfície da Terra, preenchendo os poros ou vazios intergranulares das rochas sedimentares, ou as fraturas, falhas e fissuras das rochas compactas, e que sendo submetida a duas forças (de adesão e de gravidade) desempenha um papel essencial na manutenção da umidade do solo, do fluxo dos rios, lagos e brejos (ABAS, 2016).

De acordo com Feitosa e Manoel Filho (2000) um pouco mais de 97% da água doce disponível na terra encontra-se no subsolo e portanto menos de 3% na superfície.

Segundo SABESP (2016), 1/5 de toda água doce do planeta Terra encontra-se no Brasil que possui uma reserva subterrânea com mais de 111.000km<sup>3</sup> de água. Em apenas um dos reservatórios subterrâneos encontrados na região Nordeste do país, é possível encontrar 18.000km<sup>3</sup> de água para o abastecimento humano. Isso seria suficiente para abastecer a população brasileira atual por, no mínimo, 60 anos.

No que tange a sua exploração, verifica-se que nos últimos 25 anos foram perfurados mais de 12 milhões de poços no mundo. No Brasil observa-se, nas últimas décadas, um aumento considerável da utilização de água subterrânea para o abastecimento público. Convém destacar que grande parte das cidades brasileiras com população inferior a 5.000 habitantes, com exceção do semi-árido nordestino e das regiões formadas por rochas cristalinas, possui condições de recepção de água proveniente de reservas subterrâneas (SABESP, 2016).

De acordo com Cardoso et., all (2008) estima-se que foram perfurados no Brasil cerca de 416 mil poços tubulares após o ano de 1958.

No estado de São Paulo cerca de 65% das cidades são abastecidas com águas subterrâneas, onde, considerando apenas a sua região metropolitana, aproximadamente 3 milhões de habitantes recebem água proveniente de poços profundos (SABESP, 2016). De acordo com ABAS (2016) a maior crise de abastecimento no estado de São Paulo fez com que o número de licenças para perfurar poços aumentasse para 82% no ano de 2015, estando a sua região metropolitana, com aproximadamente dez mil poços em atividade.

A crescente utilização das águas subterrâneas deve-se não somente a fatores atrelados a escassez das reservas hídricas superficiais, como também ao fato que as águas subterrâneas apresentam excelente qualidade e um custo menor de captação, adução e tratamento. O litro de água retirada de um poço custa 15 vezes menos do que o litro de água retirada de fontes superficiais (SABESP, 2016).

Dentre as suas diversas aplicações das águas subterrâneas tem-se o abastecimento doméstico, a irrigação, a pecuária, a indústria, a recreação e a piscicultura, onde para cada qual, a água deve apresentar padrões de qualidade específicos (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2000).

Para com a captação das águas subterrâneas, verifica-se que um aspecto bastante importante a ser analisado é a eficiência hidráulica dos poços, pois traz implicações diretas e determinantes nos custos. Um poço pode ser considerado hidraulicamente eficiente quando se consegue obter os resultados esperados em termos de capacidade produtiva, ao mínimo custo possível (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2000).

De acordo com Feitosa e Manoel Filho (2000) dois aspectos fundamentais têm implicações diretas na eficiência hidráulica de poços. O primeiro diz respeito ao próprio desenho construtivo, onde diversos fatores ligados aos diâmetros das tubulações de revestimento e filtros, espessura penetrada do aquífero, comprimentos de seções revestidas, particularmente dos filtros, têm implicações sérias na resistência a ser criada ao fluxo da água em direção à bomba. O segundo aspecto diz respeito aos procedimentos utilizados durante a perfuração do poço, onde muitas vezes os danos causados nas paredes do aquífero, quase sempre produzidos pelo fluido de perfuração, criam resistências indesejáveis ao escoamento da água subterrânea.

Na construção do poço, portanto, deve-se procurar criar a mínima dificuldade e resistência possível. Sobre esse assunto muitos estudos teóricos já foram desenvolvidos, assim como estudos de campo e de laboratório, que permitiram estabelecer uma grande quantidade de fórmulas e funções matemáticas. No entanto, por ser tratar de muitas equações, o processo para a elaboração de projetos construtivos eficientes torna-se demorado.

Nessa ótica, o presente artigo tem como objetivo apresentar uma ferramenta computacional desenvolvida para automatizar o processo de determinação da eficiência hidráulica de poços.

## **2 - ASPECTOS METODOLÓGICOS**

Para o desenvolvimento do “software”, primeiramente realizou-se um estudo de todos os procedimentos e critérios fornecidos por Feitosa e Manoel Filho (2000) para a determinação da eficiência hidráulica de poços.

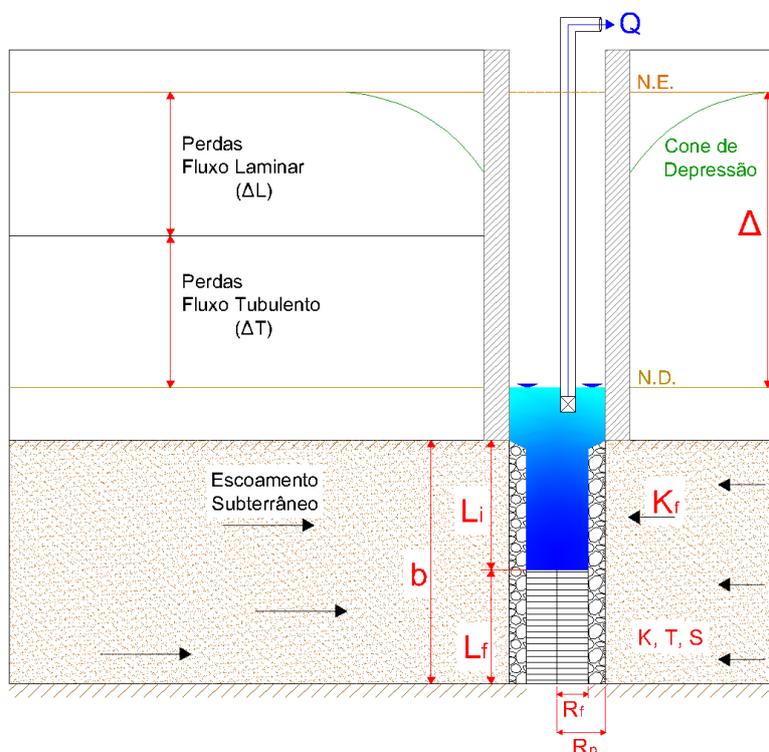
Em seguida definiu-se que a ferramenta computacional seria desenvolvida no ambiente Visual Studio, utilizando a linguagem Visual Basic. Essa linguagem foi escolhida pois além de possuir uma sintaxe familiar para o autor, facilitaria a utilização dos usuários finais, uma vez que ela possibilita o desenvolvimento de um ambiente atrativo, tornando o uso da ferramenta bastante intuitivo pela presença abundante de botões e caixas de texto.

Na sequência determinaram-se as condições de contorno e a melhor forma de apresentar tanto os dados de entrada como os de saída. Definido isso, foi realizado o incremento das rotinas de cálculo no “software”.

Para a validação do programa, realizaram-se testes comparando os resultados da ferramenta com os obtidos através de cálculos manuais. No caso de divergência de resultados ou falhas, foram realizadas as devidas correções.

### 3 – CÁLCULO DA EFICIÊNCIA HIDRÁULICA

Na determinação da eficiência hidráulica de um poço, primeiramente deve-se calcular a perda de carga total ( $\Delta$ ), que por sua vez é decomposta em perdas laminares ( $\Delta L$ ) e perdas turbulentas ( $\Delta T$ ). Para melhorar ilustrar essa situação tem-se a Figura 1 com o poço sendo bombeado com uma vazão constante:



**Figura 1.** Decomposição das perdas de carga em um poço bombeado.

Analisando a Figura 1, têm-se as seguintes variáveis:

- $Q$  - Vazão de bombeamento;
- $ND$  - Nível dinâmico no tempo  $t$ ;
- $NE$  - Nível estático;
- $L_i$  - Seção intermediária de ligação com a seção de captação;
- $L_f$  - Seção de captação constituída pelos filtros;
- $R_p$  - Raio do poço;
- $R_f$  - Raio dos filtros;
- $R_p - R_f$  - Zona de transição do pré-filtro;
- $K_f$  - Condutividade hidráulica do pré-filtro;
- $K$  - Condutividade hidráulica do aquífero;
- $b$  - Espessura do aquífero;
- $T$  - Transmissividade do aquífero;
- $S$  - Coeficiente de armazenamento do aquífero.

O que diferencia as perdas laminares das turbulentas é que as primeiras são diretamente proporcionais à vazão, já as últimas são diretamente proporcionais ao quadrado da vazão. Essas perdas são decompostas em rebaixamentos parciais, onde cada qual possui o seu respectivo coeficiente de proporcionalidade. As Equações (1) e (2) expressam o equacionamento geral das perdas laminares e turbulentas, respectivamente:

$$\Delta L = \sum_{i=1}^3 B_i Q \quad (1)$$

$$\Delta T = \sum_{i=0}^4 C_i Q^2 \quad (2)$$

Onde:

- $Q$  - Vazão de bombeamento ( $m^3/s$ );
- $B$  - Coeficiente de perdas de carga laminares;
- $C$  - Coeficiente de perdas de carga turbulentas.

A soma das equações (1) e (2) dar-se o nome de equação característica de funcionamento do poço. As perdas laminares são decompostas em:

- Perdas no aquífero:

$$\Delta L_1 = \left( \frac{1}{4\pi T} \ln \frac{2,25Tt}{R_p^2 S} \right) Q \quad (3)$$

Onde:

- $T$  - Transitividade ( $m^2/s$ );
- $t$  - Tempo de bombeamento ( $s$ );
- $R_p$  - Raio do poço ( $m$ );
- $S$  - Coeficiente de armazenamento.

- Perdas na zona de transição do pré-filtro:

$$\Delta L_2 = \left( \frac{1}{2\pi K_f b} \ln \frac{R_p}{R_f} \right) Q \quad (4)$$

Onde:

- $K_f$  - Condutividade hidráulica média ou equivalente do pré-filtro influenciada por eventuais danos de formação ( $m/s$ );
- $b$  - Espessura do aquífero ( $m$ );
- $R_f$  - Raio dos filtros ( $m$ ).

A perda na zona de transição do pré-filtro é afetada por eventuais danos de formação causados pelo fluido de perfuração na construção do poço e por eventos posteriores determinantes de redução de condutividade hidráulica, como incrustações químicas ou carreamento de materiais finos da formação, causados pela ação de bombeamentos com vazões superiores à capacidade de retenção do aquífero (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2000).

- Perdas por penetração parcial do aquífero:

$$\Delta L_3 = \left( \frac{1}{2\pi T} \frac{1-p}{p} \ln \frac{(1-p)L_f}{R_p} \right) Q \quad (5)$$

Onde:

- $L_f$  - Comprimento dos filtros ( $m$ );
- $p$  - Relação entre a penetração e a espessura do aquífero ( $L_f/b$ );
- $T$  - Transmissividade do aquífero ( $m^2/s$ ).

No que diz respeito às perdas turbulentas, tem-se as seguintes perdas parciais:

- Perdas na entrada dos filtros:

$$\Delta T_1 = \left( \frac{3,32 \cdot 10^{-3}}{R_f^2 L_f^2 \alpha^2 (1-\beta)^2} \right) Q^2 \quad (6)$$

Onde:

- $\alpha$  - Percentual de área aberta dos filtros (%);
- $\beta$  - Percentual de obstrução dos filtros pelo pré-filtro (%).

- Perdas axiais na seção de captação – filtros:

$$\Delta T_2 = \left( 0,02754 F_f \frac{L_f}{D_f^5} \right) Q^2 \quad (7)$$

Onde:

- $F_f$  - Fator de atrito dos filtros;
- $D_f$  - Diâmetros dos filtros ( $m$ ).

- Perdas axiais na seção intermediária:

$$\Delta T_3 = \left( 0,08262 F_i \frac{L_i}{D_i^5} \right) Q^2 \quad (8)$$

Onde:

- $F_i$  - Fator de atrito do revestimento da seção intermediária ( $m$ );
- $L_i$  - Comprimento do revestimento da seção intermediária ( $m$ );
- $D_i$  - Diâmetro da seção intermediária ( $m$ ).

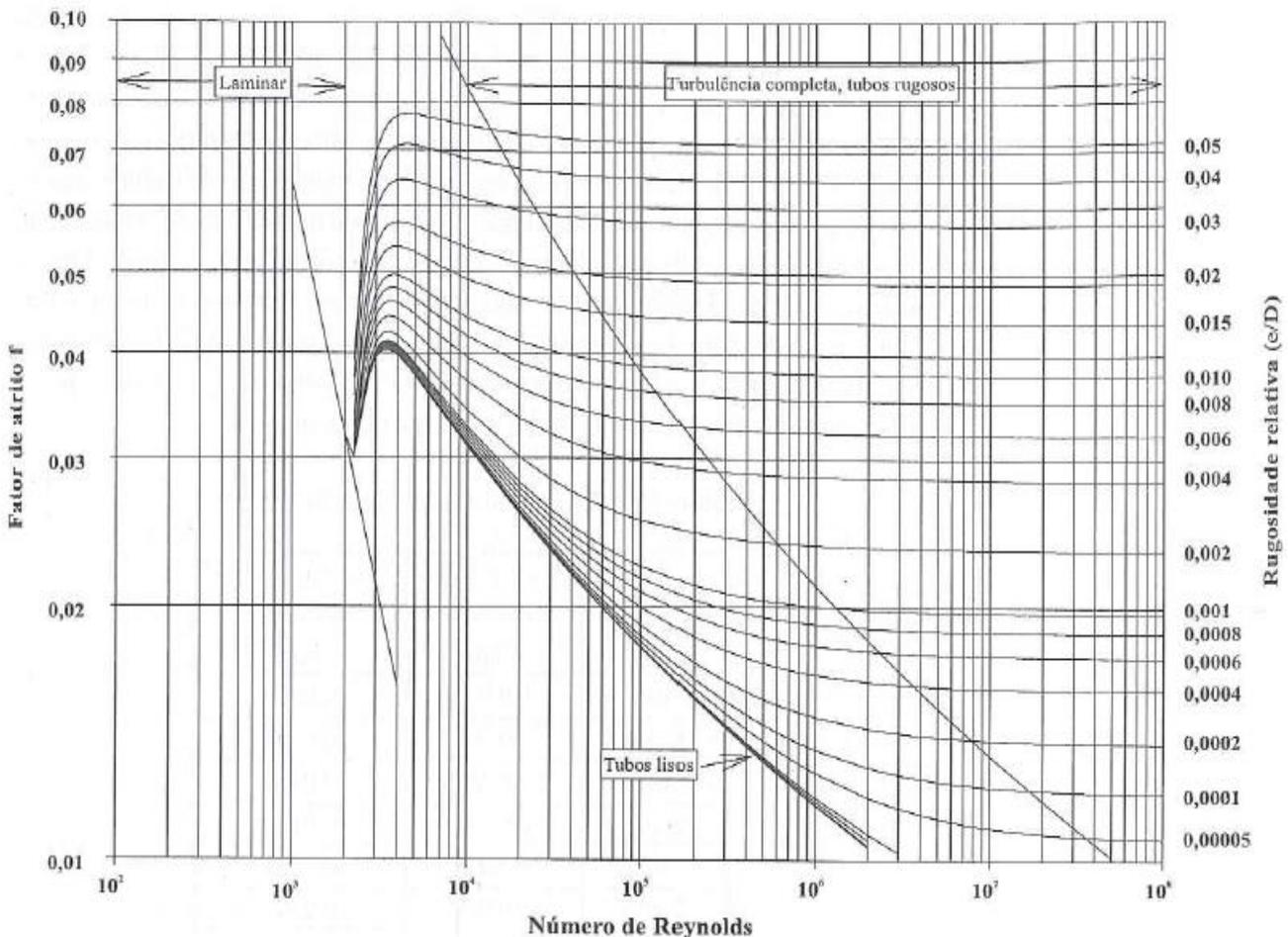
- Perdas axiais na câmara de bombeamento:

$$\Delta T_4 = \left( 0,08262 F_c \frac{L_c}{D_c^5} \right) Q^2 \quad (9)$$

Onde:

- $F_c$  - Fator de atrito do revestimento da câmara de bombeamento;
- $L_c$  - Distância do topo da seção intermediária até a bomba ( $m$ );
- $D_c$  - Diâmetro da câmara de bombeamento ( $m$ ).

Segundo Porto (2006), o valor dos fatores de atrito presentes nas Equações 7,8 e 9 podem são determinados utilizando o ábaco de Moody:



**Figura 2.** Diagrama de Moody.  
**Fonte –** Porto (2006).

Porto (2006) também apresenta uma equação, utilizada por Swamee (1993) que reproduz o diagrama de Moody:

$$f = \left\{ \left( \frac{64}{\text{Re } y} \right)^8 + 9,5 \cdot \left[ \ln \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{\text{Re } y^{0,9}} \right) - \left( \frac{2500}{\text{Re } y} \right)^6 \right]^{-1,6} \right\}^{0,125} \quad (10)$$

- $\text{Re } y$  - Número de Reynolds;
- $\varepsilon$  - Rugosidade absoluta do material ( $m$ );
- $D$  - Diâmetro dos filtros, da seção intermediária ou da câmara de bombeamento ( $m$ ).

De acordo com Feitosa e Manoel Filho (2000) para revestimentos de aço liso  $\varepsilon$  varia de 0,00015 a 0,00025m e para filtros de aço inox,  $\varepsilon$  varia de 0,001 a 0,003m.

O número de Reynolds presente na Equação 10, é calculado por meio da seguinte equação:

$$\text{Re } y = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (11)$$

Onde:

- $\nu$  - Viscosidade cinemática da água ( $m^2/s$ ).
- $V$  - Velocidade da água ( $m/s$ );

Além das perdas turbulentas parciais mencionadas, tem-se as perdas na zona do pré-filtro ( $\Delta T_0$ ), que somente ocorrem quando o número de Reynolds é maior que o valor 30. Não existe fórmula para o seu cálculo, podendo o seu valor ser determinado por meio de testes de bombeamento com vazões escalonadas e crescentes (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2000).

Após determinar o valor de todas as perdas e conseqüentemente o rebaixamento total do nível de água, é possível determinar a eficiência hidráulica do poço por meio da seguinte Equação:

$$E = \frac{B_1 Q}{\Delta L + \Delta T} \quad (12)$$

Onde:

- $B_1 Q$  - Perdas laminares no aquífero ( $m$ );

A eficiência hidráulica de um poço é dada em (%). Por tanto se todas as perdas laminares ou turbulentas, com exceção das perdas naturais no aquífero, fossem nulas, o poço teria uma eficiência

de 100%. De acordo com Feitosa e Manoel Filho (2000), valores próximos podem ser obtidos desde que:

- Os poços sejam projetados com diâmetros de revestimentos e filtros compatíveis com as vazões esperadas;
- O poço penetre totalmente a espessura do aquífero;
- O pré-filtro utilizado apresente uma porosidade elevada;
- O tamanho dos grãos do pré-filtro seja suficientemente grande;
- No procedimento de perfuração, especialmente no que diz respeito ao tipo de fluido utilizado, não ocorra danos de formação e conseqüentemente redução na condutividade hidráulica da zona de transição do pré-filtro.

Vale ressaltar que no projeto construtivo de poços, todos os fatores supracitados devem ser analisados em conjunto com os custos, de modo a estabelecer uma condição otimizada de execução da obra.

#### 4 – PROGRAMA DESENVOLVIDO

Após realizar todo o procedimento metodológico, foi possível obter um “software” de fácil manuseio e interface autoexplicativa. A ferramenta de nome AQDEURIM é uma versão de uma linha de programas computacionais livres, que está em fase de desenvolvimento, denominada DEURIM:

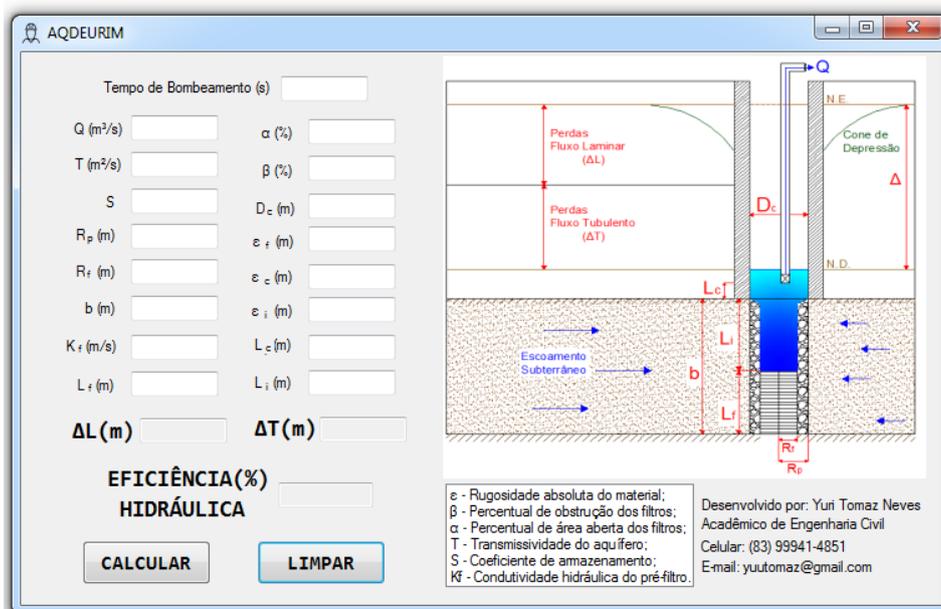


Figura 3. Ferramenta computacional AQDEURIM.

O funcionamento do “software” é bastante simples, basta preencher os espaços em branco com os valores desejados e em seguida clicar em “CALCULAR” para se obter como resposta as

perdas no regime laminar ( $\Delta L$ ), turbulento ( $\Delta T$ ) e a eficiência hidráulica. Caso se deseje verificar outro elemento, é só clicar em “LIMPAR” que todos os espaços em branco serão zerados.

## 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do apresentado é possível concluir que a ferramenta desenvolvida será de grande utilidade para os profissionais que trabalham com projetos de poços para captação de águas subterrâneas, pois irá proporcionar a obtenção da eficiência hidráulica de poços com grande precisão e em menor tempo, quando comparado ao processo de cálculo manual. Esse resultado traz a vantagem de que, ao comparar a eficiência hidráulica com os custos, será possível determinar, com mais praticidade, uma condição otimizada de execução da obra.

O “software” está em sua versão beta, onde a próxima etapa será divulgá-lo na web e, por conseguinte, aprimorá-lo por meio de sugestões de profissionais da área.

## 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAS. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. Disponível em: <http://www.abas.org/>. Acesso em: 10 de junho de 2016.

ARDOSO, F. B. F.; OLIVEIRA, F. R.; NASCIMENTO, F. S.; VARELLA, P. L. N.; FLORES, P. M. **Poços tubulares construídos no Brasil**. 2008. In: XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. ABAS.

FEITOSA, Fernando A.c.; MONOEL FILHO, João. **Hidrogeologia - Conceitos e Aplicações**. 2. ed. Fortaleza: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2000. 391 p.

PORTO, R.M. **Hidráulica Básica**. São Carlos: Publicações EESC-USP, 2006. 540p.

SABESP. Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. Disponível em: <http://site.sabesp.com.br/>. Acesso em: 10 de junho de 2016.

SWAMEE, P.K. **Design of a submarine pipeline**. J. Transp Eng. ASCE, 119 (1), 159 – 170, 1993.