

EUDES JOSÉ ARANTES

**CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO SOBRE  
VERTEDOUROS EM DEGRAUS VIA CFD**

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção do título de doutor em Engenharia Civil na Área de Hidráulica e Saneamento.

ORIENTADOR: Prof. Assoc. Rodrigo de Melo Porto.

São Carlos  
2007

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

A662c Arantes, Eudes José  
Caracterização do escoamento sobre vertedouros em  
degraus via CFD / Eudes José Arantes ; orientador Rodrigo  
de Melo Porto. -- São Carlos, 2007.

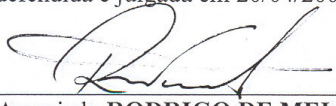
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação e  
Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento -- Escola  
de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

1. Engenharia Hidráulica. 2. Canais com degraus. 3.  
Fluidinâmica computacional. 4. Escoamento aerado. 5.  
Escoamentos turbulentos. 6. Cavitação. I. Título.

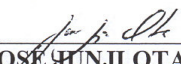
FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **EUDES JOSÉ ARANTES**


Tese defendida e julgada em 20/04/2007 perante a Comissão Julgadora:


  
\_\_\_\_\_  
Prof. Associado **RODRIGO DE MELO PORTO (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) Aprovado

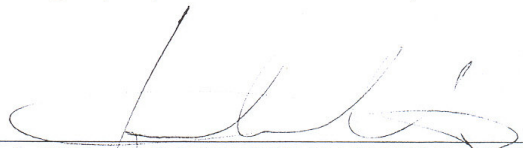
  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **FERNANDO EDUARDO MILIOLI**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) Aprovado

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **JOSE JUNJI OTA**  
(Universidade Federal do Paraná/UFPR) APROVADO

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **PODALYRO AMARAL DE SOUZA**  
(Escola Politécnica/USP) Aprovado

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **MARCELO GIULIAN MARQUES**  
(Universidade Federal do Rio Grande do Sul/UFRGS) Aprovado

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Associado **MARCELO ZAIAT**  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia (Hidráulica e Saneamento)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Associado **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**  
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

“Se tratti di acqua anteponi l’esperienza allá teoria.”  
(Leonardo da Vinci)

## DEDICÁTÓRIA

*À minha família, em especial à minha amada esposa, Elisângela, à minha querida filha, Caroline, que alegra nossas vidas e aos meus queridos pais, Mário e Bernadete.*

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Assoc. Rodrigo de Melo Porto, meu orientador, pelos ensinamentos, apoio, dedicação. Ao Prof. Tit. Fazal Hussain Chaudhry pelo início da orientação. Ao Prof. Tit. Harry Edmar Schulz pelas sugestões e contribuições. Ao Prof. Tit. José Cuminato pela disponibilização do Cluster e também contribuições na pesquisa. Ao Prof. Dr. Edson C. Wendland pela disponibilização do Laboratório de Hidráulica Computacional.

Aos funcionários da USP: André, Roberto, Rose, Pavi, Sá, Sônia, entre outros.

Aos meus amigos: Anderson, “Andréias”, Ângelo, Antenor, Alexandre (Botari e Kleper), Carlos, Caruso, Cazuzza, Christian, Fábio, Fernando, Francisco, Giovani(e), Gustavo, Keil, Klebber, Kid, Johannes, José Eduardo (Alamy e Quaresma), Leonardo, Lijalém, Lobão, Lute, Luiz, Marcos, Peter, Roberto, Ronan, Stênio, Tina, Velhinho, Zanqueta, Zozó e todos os que por ventura não tenha sido citados.

À Deus, que me dá saúde, a capacidade de me empenhar nas pesquisas e a felicidades de ter ao meu lado tantas pessoas amigas.

Além da dedicatória, agradeço minha esposa, minha filha e meus pais, por proporcionarem os melhores momentos de minha vida. Aos meus irmãos (Kátina e Marcel), minhas avós, minha sogra, meu sogro, meus cunhados, sobrinhos, tios e primos por fazerem parte de minha vida de forma especial.

À EESS que por intermédio da equipe FORMULA SAE da EESC-USP disponibilizou a licença do CFX durante o primeiro semestre da pesquisa.

À Escola de Engenharia de São Carlos pela oportunidade de realização do curso de doutorado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pela concessão da bolsa de doutorado e pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
LISTA DE FIGURAS.....	iii
LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE SÍMBOLOS.....	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Generalidades.....	1
1.2. Objetivos do Trabalho.....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. Considerações Gerais Sobre Vertedouros em Degraus.....	5
2.2. Regimes de escoamentos em Vertedouros em Degraus.....	6
2.3. Análise do escoamento Tipo <i>Skimming</i> (RAJARATNAM, 1990).....	13
2.4. Características Hidráulicas no escoamento Tipo <i>Nappe</i> .....	14
2.5. Perda de Energia em um Vertedouro em Degraus.....	15
2.5.1. Regime de escoamento <i>Skimming</i> – Dissipação de Energia.....	15
2.5.2. Regime de escoamento <i>Nappe</i> – Dissipação de Energia.....	21
2.5.3. Comparação entre os Regimes de escoamento <i>Nappe</i> e <i>Skimming</i> .....	23
2.6. Aeração ao Longo de Vertedouros em Degraus.....	24
2.7. Distribuição de Velocidades.....	31
2.8. Estudos Experimentais em Vertedouros em Degraus no Brasil.....	33
2.9. Estudos Numéricos do escoamento em Vertedouros em Degraus.....	36
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
3.1. Modelagem Computacional.....	39
3.2. Modelação numérica via “Computational Fluid Dynamic – CFD”.....	40
3.3. Escolha do Software.....	40
3.4. Equações Representativas dos escoamentos.....	41
3.5. Equações da Média de Reynolds para Navier-Stokes. (RANS).....	42
3.6. Modelos de Turbulência.....	43
3.6.1. Os Modelos $k - \epsilon$ .....	44
3.6.1.1. Modelo $k - \epsilon$ (Padrão).....	44
3.6.1.2. O Modelo $k - \epsilon$ (RNG).....	45
3.6.2. Modelos de Tensões de Reynolds.....	48

3.6.3. Simulação de Grandes Escalas (Large Eddy Simulation – LES).....	51
3.7. Modelos Multifásicos.....	54
3.7.1. Modelo Não-homogêneo.....	55
3.7.2. Modelo Homogêneo.....	57
3.7.3. Transferência de Massa na Interface.....	58
3.7.4. Modelo de Mistura (Mixture Model).....	59
3.7.5. Modelo de Superfície Livre.....	60
3.8. Discretização Numérica.....	61
3.9. Utilização do CFX <sup>®</sup> .....	64
3.9.1. Geração da Geometria e da Malha.....	64
3.9.2. Condições de Simulação.....	65
3.9.3. Acompanhamento da Resolução e Visualização dos Resultados.....	68
4. RESULTADOS E ANÁLISES.....	69
4.1. Considerações Gerais.....	69
4.2. Estudo do escoamento em Vertedouros em Degraus.....	70
4.2.1. Perfil de Pressão e de Velocidades.....	70
4.2.2. Estudo da Perda de Energia em Vertedouros em Degraus.....	76
4.2.3. Estudo Numérico da Caracterização do Escoamento em Vertedouros em Degraus.....	87
4.2.3.1. Distribuição das Velocidades do Escoamento.....	90
4.2.3.2. Perda de Energia Específica ao Longo do Vertedouro.....	93
4.2.3.3. Fator de Resistência do Escoamento.....	95
4.2.3.4. Posição de Início de Aeração do Escoamento.....	98
4.2.3.5. Estudo da Aeração do Escoamento.....	100
4.2.3.6. Estudo da Cavitação em Vertedouro em Degraus.....	104
4.3. Estudo da Mudança de Escoamento do Regime <i>Skimming Flow</i> para <i>Nappe Flow</i> .....	107
4.4. Aplicação de Ferramenta CFD em Escoamento em Canal com Forte Declividade.....	108
4.5. Proposta de Aerador de Fundo no Início do Vertedouro.....	122
5. CONCLUSÕES E DISCUSSÕES.....	131



<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>135</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>143</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>152</b>
<b>APÊNDICE C.....</b>	<b>157</b>
<b>APÊNDICE D.....</b>	<b>159</b>
<b>APÊNDICE E.....</b>	<b>165</b>
<b>APÊNDICE F.....</b>	<b>170</b>
<b>APÊNDICE G.....</b>	<b>176</b>



## Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

