



JOÃO DAVID FERREIRA

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

ESTIMATIVA DA TENSÃO APARENTE E DOS COEFICIENTES DE CORIOLIS E BOUSSINESQ EM CANAIS DE SECÇÃO COMPOSTA USANDO REDES NEURONAIS

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL- PERFIL DE ESTRUTURAS

Universidade NOVA de Lisboa

Março, 2023



ESTIMATIVA DA TENSÃO APARENTE E DOS COEFICIENTES DE CORIOLIS E BOUSSINESQ EM CANAIS DE SECÇÃO COMPOSTA USANDO REDES NEURONAIS

JOÃO DAVID FERREIRA

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Orientador: Doutor João Nuno Sequeira Fernandes
Professor auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Júri:

- Presidente:** Doutora Ildi Cismasiu,
Professora Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Arguente:** Doutora Maria da Graça Neves,
Professora Associada com Agregação da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
- Orientador:** Doutor João Nuno Sequeira Fernandes,
Professor auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Estimativa da tensão aparente e dos coeficientes de Coriolis e Boussinesq em canais de secção composta usando redes neuronais.

Copyright © João David Ferreira, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

À minha Família

AGRADECIMENTOS

Para a realização desta dissertação foi imprescindível o contributo de algumas pessoas a quem não poderia deixar de agradecer.

Ao meu orientador, Professor João Fernandes pela colaboração, transmissão de conhecimento, incentivo e disponibilidade ao longo de todo este processo, bem como o rigor científico com que orientou esta dissertação. Agradeço a apresentação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), em particular, o pavilhão de Hidráulica Fluvial, que me permitiu contactar com o meio científico e observar as instalações adequadas para a recolha de dados.

Aos meus amigos Afonso, João Correia e Rodrigo pela amizade, disponibilidade e ajuda em todo o meu percurso académico na Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT).

À minha amiga Matilde que me orientou e focou no essencial para realizar e avançar neste trabalho.

À minha família e namorada Teresa por todo o carinho, apoio e compreensão que demonstram desde sempre.

RESUMO

Em condições normais o escoamento dos rios realiza-se no leito principal, no entanto, em situações de cheia, a capacidade de vazão desses leitos é excedida e o escoamento faz-se também nos campos adjacentes, denominados leitos de cheia ou planícies de inundação, resultando uma configuração de secção composta. Como na zona do leito principal a altura de escoamento é maior do que nas planícies de inundação, existe uma diferença de velocidades entre elas, que gera interações e transferências de massa e de quantidade de movimento. Nestas condições, as características do escoamento não se encontram bem definidas devido ao elevado número de fenómenos associados que para elas contribuem.

A presente dissertação estuda os mecanismos envolvidos nos escoamentos em secção composta e estima alturas de água em caso de caudais de cheia fluvial, contribuindo para uma melhoria do mapeamento da inundação para um determinado caudal, ajudando a preparar melhor uma situação de cheia fluvial. Para tal foram realizadas duas análises complementares: avaliação e cálculo da tensão de corte aparente (comparando medições experimentais com valores teóricos) e estimativa dos coeficientes de Coriolis e Boussinesq em canais de secção composta. Ao calcular estes dois parâmetros com menores erros, a estimativa do caudal escoado por sua vez vai ter valores mais próximos da realidade melhorando o mapeamento num determinado local. Nas duas análises realizadas recorreu-se a uma base de dados de escoamentos em canais de secção composta e a redes neuronais. Estas redes são modelos computacionais inspirados no funcionamento do cérebro humano, compostas por camadas de neurônios artificiais que processam informações através de conexões sinápticas ponderadas. Neste sentido, têm vindo a ganhar grande popularidade ao longo dos anos, como é evidenciado pelo aumento crescente do número de artigos sobre estas em revistas científicas.

Palavras-chave: Canal de secção composta, Tensão aparente, Redes Neuronais, Coeficientes de Coriolis e Boussinesq.

ABSTRACT

Under normal circumstances, flow in rivers takes place in the central main channel but, during flood events, the flow capacity of the main channel is surpassed, and the flow inundates the adjacent floodplains, resulting in a compound section configuration.

As flow depth in the main channel is higher than the one in the floodplains, there is a significant velocity gradient, which leads to interactions and transfers of mass and momentum. During these events, the flow characteristics are not well defined due to the high number of flow mechanisms associated to these flows.

The present work studies the mechanisms of flow in a compound section and estimates water depths in the event of fluvial flood flows, contributing to the improvement of the inundation mapping for a given flow, therefore helping prepare a fluvial flood event.

Two complementary analyses were carried out: evaluation and calculation of the apparent shear stress (comparing experimental measurements with theoretical values) and estimation of the Coriolis and Boussinesq coefficients in channels with compound section. By calculating these two parameters with smaller errors, the estimated flow rate will in turn have values closer to reality, improving the mapping at a given location. In both cases, a database of flows in compound channels and neural networks were used. These neural networks are computational models inspired by the functioning of the human brain, composed by layers of artificial neurons that process information through weighted synaptic connections. In this sense, they have been gaining great popularity over the years, as evidenced by the increasing number of articles about them in scientific journals.

Keywords: Compound channel, Apparent shear stress, Artificial Neural Networks, Coriolis and Boussinesq coefficients

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Considerações iniciais.....	1
1.2	Problemas e Objetivos.....	1
1.3	Enquadramento do trabalho.....	2
1.4	Organização do documento.....	4
2	REVISÃO DA LITERATURA	7
2.1	Cheias Fluviais.....	7
2.2	Estrutura do escoamento em canais de secção composta.....	8
2.3	Relação altura de água / caudal em canais de secção composta.....	9
2.4	Tensão Aparente.....	13
2.5	Coeficiente de atrito aparente <i>C_{fa}</i>	16
2.6	Redes Neurais.....	17
2.7	Coeficiente de Coriolis e Boussinesq	19
3	DADOS EXPERIMENTAIS	21
3.1	Variáveis utilizadas.....	21
3.2	Dados recolhidos da literatura	22
4	TENSÃO APARENTE.....	25
4.1	Obtenção da tensão aparente (experimental).....	25
4.2	Métodos disponíveis para avaliação da tensão aparente	27

4.3	Rede neuronal	28
4.4	Desempenho dos métodos de cálculo de τ_a	32
4.4.1	Resultados de τ_a e C_{fn}	32
4.4.2	Resultados de caudal	35
5	COEFICIENTE DE CORIOLIS E DE BOUSSINESQ EM CANAIS DE SECÇÃO COMPOSTA	37
5.1	Cálculo dos coeficientes de Coriolis e de Boussinesq	37
5.2	Resultados obtidos	42
5.2.1	Cálculo de α e β através de Redes Neurais	42
5.2.1	Variação de α e β com altura relativa	45
5.2.2	Variação de α e β com a rugosidade dos leitos principal e de cheias	46
5.2.3	Variação de α e β com a proporção da largura B/b_{mc} (<i>width ratio</i>).....	50
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	53
6.1	Conclusões.....	53
6.2	Trabalhos Futuros.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Transbordo da água do leito principal para planícies habitáveis.....	8
Figura 2 - Estrutura de fluxo turbulento em canal composto (adaptado de Shiono e Knight 1991).....	9
Figura 3 - Gradiente de velocidade do escoamento (Adaptado de Singh et al. 2019)	13
Figura 4 - Vórtices verticais e horizontais(Adaptado de Singh et al. 2019).....	14
Figura 5 - Estrutura típica de uma rede neuronal com vários dados de entrada (Inputs).....	18
Figura 6 - Geometria do (a) canal simétrico e (b) assimétrico (adaptada de Fernandes et al. 2015).....	21
Figura 7 - Procedimento para a obtenção da tensão aparente	25
Figura 8 - Diagrama de <i>Venn</i> dos ensaios realizados	26
Figura 9 - Neural Fitting App	28
Figura 10 - Seleção dos dados para o estudo.....	29
Figura 11 - Dados de Treino, Validação e Teste.....	30
Figura 12 - Algoritmo de treino da rede neuronal.....	30
Figura 13 - Função Matlab.....	31
Figura 14 - Procedimento de cálculo de τ_a e Caudais após o output extraído das redes neuronais.	32
Figura 15 - Ajustamento e comparação de valores de Tensão aparente τ_a	33
Figura 16 - comparação do caudal experimental com o estimado pelos diferentes autores (a,b,c,d,e) e pela rede neuronal (f).....	36
Figura 17 - Geometria do canal de secção composta simétrico (a) e assimétrico (b)	38
Figura 18 - Secção transversal do canal de secção composta.	38
Figura 19 - Distribuição de velocidades longitudinais na secção transversal (coluna da esquerda) e velocidades longitudinais médias na altura (coluna da direita) (adaptada de Fernandes et al. 2022).....	41

Figura 20 - Comparação para os resultados do coeficiente de energia e de quantidade de movimento calculados pelas Equações 16/17 e 28/29.....	41
Figura 21 - Comparação dos resultados de α , realizados em 3 treinos	43
Figura 22 - Comparação dos resultados de β , realizados em 3 treinos.....	43
Figura 23 - Variações dos coeficientes α e β em relação à altura relativa	45
Figura 24 - Variação de α e β com a altura relativa e a rugosidade do canal para 20 ensaios experimentais realizados por Prinos e Townsend (1984). $B/b_{mc}= 5,256$	46
Figura 25- Variação de α e β com a altura relativa e a rugosidade do canal para 20 ensaios experimentais realizados por Prinos e Townsend (1984). $B/b_{mc}= 3,833$	47
Figura 26 - Variação de α e β com a altura relativa e a rugosidade do canal para 40 ensaios experimentais realizados por Wormleaton <i>et al</i> (1982). $B/b_{mc}= 4,19$	47
Figura 27 - Variação de α e β com a altura relativa e a rugosidade do canal para 36 ensaios experimentais realizados por Knight e Hamed (1984). $B/b_{mc}= 4,01$	48
Figura 28 - Variação de α e β com a altura relativa e a proporção da largura B/b_{mc} para 22 ensaios experimentais realizados por Wormleaton e Merret (1990). $hb/b_{mc}=0,1$	50
Figura 29 - Variação de α e β com a altura relativa e a proporção da largura B/b_{mc} para 16 ensaios experimentais realizados por Noutsopoulos e Hadjipanos (1983). $hb/b_{mc}=0,5$	50
Figura 30 - Variação de α e β com a altura relativa e a proporção da largura B/b_{mc} para 18 ensaios experimentais realizados por Knight e Demetriou (1983). $hb/b_{mc}=0,5$	51
Figura 31 - Variação de α e β com a altura relativa e a proporção da largura B/b_{mc} para 23 ensaios experimentais realizados por Myers (1984). $hb/b_{mc}=0,5$	51

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Resumo dos dados experimentais obtidos da literatura.....	23
Quadro 2 - Equações para cálculo da tensão aparente na interface vertical entre o canal principal e as planícies de inundação.....	27
Quadro 3 - Intervalos de target, input e output.....	31
Quadro 4 - Erros na estimativa de τa e Cfa	33
Quadro 5 - Erros na estimativa dos caudais	35
Quadro 6 - Condições experimentais.	39
Quadro 7 - Erros de α e β	42
Quadro 8 - Principais resultados de α e β obtidos por diferentes autores, através de ensaios realizados em canais com diferentes geometrias e condições de vegetação.....	44

SÍMBOLOGIA

Nesta dissertação adotou-se a abreviatura de "Mc" proveniente do inglês, *Main Chanel*, para designar o leito principal, e de "Fp", *Floodplains*, para designar leitos de cheia ou planícies de inundação.

Siglas

ANN *Artificial Neural Networks*

Símbolos

g	Aceleração Gravítica
h_{int}	Altura de escoamento na interface
h_b	Altura do leito principal
h_{fp}	Altura da planície de inundação
H_r	Altura relativa
H_{mc}	Altura total do escoamento
A_{mc}, A_{fp}	Área de escoamento
Q	Caudal
Q_t	Caudal total
C_{fa}	Coefficiente de atrito aparente
β	Coefficiente de Boussinesq
α	Coefficiente de Coriolis
K	Coefficiente de rugosidade
γ	Coefficiente experimental
n	Coefficientes de rugosidade
s_0	Declive longitudinal
ΔU	Diferença de velocidade média entre caudal do MC e FP
s	Inclinação
b_{mc}, B_{fp}	Largura da base
B_{mc}	Largura do topo
B	Largura superior total do canal
ρ	Massa volúmica
N_f	Número de planícies de inundação num canal de secção composta
φ	Parâmetro experimental

P	Perímetro Molhado
R	Raio Hidráulico
τ_0	Tensão de arrastamento
τ_a	Tensão de corte aparente
τ_{xy}^d	Valor médio da tensão de Reynolds em profundidade
U	Velocidade média do escoamento num dado leito
ν	Viscosidade Cinemática

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A hidrologia consiste no estudo científico da água e das suas propriedades, distribuição e efeitos na superfície terrestre, sol e atmosfera. Neste âmbito destaca-se a grande não linearidade da maioria dos processos hidrológicos e o elevado nível de variabilidade tanto espacial como temporal, bem como a dificuldade do seu estudo devido à incerteza dos parâmetros de estimativa.

Neste sentido, a maior parte dos dados obtidos em hidrologia, hidráulica fluvial e em estudos de cheias fluviais provêm de medidores colocados no terreno ou através de instrumentos, sensores e deteção remota. Paralelamente, de modo a detetar padrões nos dados, recorre-se a modelação numérica, utilização de modelos existentes ou a experiências laboratoriais (Ranjithan et al. 1993; Rogers e Dowlá 1994; Smith e Eli 1995; Minns e Hall 1996), como é o caso da presente dissertação.

1.2 Problemas e Objetivos

O escoamento em leitos aluvionares durante eventos de cheia (i.e. quando se verificam elevados caudais), faz-se não só pelo leito principal, mas também com o alagamento dos leitos laterais, denominados por leitos de cheia. Nesses casos, o escoamento passa a fazer-se em secção composta ou em canais compostos.

A presente dissertação tem como principal objetivo estudar os mecanismos envolvidos no escoamento neste tipo de canais, ou seja, com a interação entre os escoamentos nos leitos principal e de cheias influência a estimativa da relação caudal e altura de água. Mais concretamente, com o presente trabalho pretende-se melhorar a estimativa de alturas de água em canais de secção composta i.e. durante cheias fluviais. Em última análise, o trabalho poderá

permitir para melhorar o mapeamento da inundação para um determinado caudal e, dessa forma, poder preparar melhor uma situação de cheia fluvial. Como a tensão de corte aparente permite quantificar a transferência de quantidade de movimento na camada de mistura de um canal composto, e calculando esta com menos erros e obtendo valores mais próximos da realidade, a estimativa do caudal escoado por sua vez vai ter valores mais próximos da realidade, permitindo melhorar o mapeamento das cheias num determinado local. A mesma situação acontece com a estimativa dos coeficientes Coriolis e Boussinesq.

Para atingir os objetivos serão realizadas duas análises complementares:

1 - Será aprofundada a avaliação da tensão de corte aparente gerada entre os escoamentos nos leitos principal e de cheias (e.g. Wormleaton e Merret 1990) e

2 - Será efetuada a estimativa dos coeficientes de Coriolis e Boussinesq em canais de secção composta (e.g. Hamidifar et al. 2016, Keshavarzi e Hamidifar 2018).

Para atingir estes objetivos, recorrer-se-á a uma base de dados experimentais laboratoriais, compilada no âmbito de trabalhos anteriores (cf. Fernandes et al. 2015) e completada no âmbito do presente trabalho e a redes neuronais. Os dados experimentais serão usados de modo a treinar métodos baseados em redes neuronais e validar os respetivos resultados. Para aferir a adequabilidade dos novos modelos, os seus resultados serão comparados com metodologias tradicionalmente utilizadas e valores recorrentes da literatura.

1.3 Enquadramento do trabalho

Embora os escoamentos nos rios se realizem geralmente no leito principal, em situações de cheia, a capacidade de vazão desse leito pode ser excedida e o escoamento ocorre também nos campos adjacentes (leitos de cheia), obtendo-se uma configuração tipicamente denominada por canais de secção composta. Com base na revisão de literatura realizada no âmbito desta dissertação, identificaram-se alguns dos principais problemas e lacunas existentes no que diz respeito ao escoamento em canais de secção composta.

Como a altura de escoamento no leito principal é superior à verificada no leito de cheia, existe uma diferença de velocidades entre os escoamentos nessas sub-seções, que, por sua vez, dá origem a interações entre os escoamentos e a transferências de massa e de quantidade de movimento. Nestas condições, as características do escoamento não são tão bem definidas como no escoamento num único canal. Adicionalmente, a rugosidade dos leitos é geralmente diferente, nomeadamente pela ocupação dos leitos de cheia por vegetação, por exemplo. Nesses casos, os mecanismos de escoamento podem sofrer alterações adicionais.

No contexto da gestão de risco de inundação é essencial prever os níveis de água e as velocidades de escoamento de forma a preparar as comunidades para os acontecimentos extremos e, dessa forma, mitigar as perdas económicas e humanas. Devido à complexidade do escoamento em canais de secção composta, com a referida interação entre os escoamentos no canal principal e nas planícies aluviais, a capacidade de vazão não é facilmente determinada.

A forma convencional de cálculo de vazão numa secção composta consiste em dividir conceptualmente o fluxo em subsecções (ou seja, entre os leitos principal e de cheias) e aplicar as fórmulas de resistência ao escoamento uniforme independentemente para cada uma (Chow, 1959). Essa é a abordagem considerada em vários *softwares* utilizados pela globalidade dos projetistas (e.g. Hec-RAS). A abordagem em questão tem vindo a comprovar-se como sendo pouco adequada nos casos em que existe uma inundação dos leitos adjacentes ao leito principal devido à interação significativa entre os escoamentos de cada subsecção, isto é, entre a parte mais profunda e a mais rasa.

Neste sentido, ao longo do presente trabalho, será estudado o uso do método de tensão aparente, que propõe a inclusão de uma tensão de corte adicional atuando na interface vertical entre os escoamentos no canal principal e nas planícies aluviais para contabilizar a transferência e quantidade de movimento entre os escoamentos nessas subsecções. Essa tensão aparente será assim uma forma adicional de resistência ao escoamento (além da resistência provocada pelo fundo).

No que diz respeito aos mecanismos do escoamento, realça-se a sua complexidade, devido à existência de uma região turbulenta na interface entre os escoamentos dos leitos. Esta turbulência dá-se sob a forma de transferência de massa e de quantidade de movimento, que diminui a capacidade de vazão e velocidade do leito principal (em comparação com a situação em que esse escoamento se verifica apenas nessa secção), enquanto os mesmos parâmetros no leito de cheia aumentam. Myers et al. (2000) verificaram que este efeito é reforçado pelo facto de geralmente a rugosidade do leito de cheia exceder significativamente a do leito principal, nomeadamente por apresentar vegetação ripícola e rasteira.

Vários estudos experimentais (e.g. Myers, 1978; Moreta e Martin, 2010; Tang e Knight, 2008) revelaram que os principais fatores que influenciam a tensão de corte aparente incluem as características geométricas como a profundidade da água, a largura do canal principal e da planície aluvial, a simetria do canal, e os parâmetros hidráulicos como a rugosidade do leito principal e dos leitos de cheia.

No presente trabalho, para a estimativa da tensão de corte aparente que atua na interface dos leitos principal e de cheias de um canal composto recorreu-se às redes neurais artificiais, tendo sido aplicada uma análise dimensional às principais características dos canais compostos para obter as variáveis adimensionais que afetam a tensão de corte aparente. Foi também

utilizada uma extensa base de dados experimentais em laboratório para treinar a rede neural e validar os resultados.

A previsão do coeficiente de atrito aparente e dos caudais por redes neurais artificiais vão ser comparadas com resultados fornecidos por outros métodos desenvolvidos por diversos autores. É expectável que a tensão de corte aparente em canais compostos possa ser estimada com a mesma precisão que os melhores métodos existentes.

Adicionalmente, usando a mesma base de dados de escoamentos e as redes neuronais foram estimados os coeficientes de correção da energia cinética (coeficiente de Coriolis) e o coeficiente de correção da quantidade de movimento (coeficiente de Boussinesq). Em relação a estes coeficientes é expectável a sua diminuição com ao aumento da altura relativa (H_r) do escoamento, definida como a relação entre as alturas de escoamento nos leitos de cheia e principal. À medida que a altura relativa aumenta a interação entre os escoamentos no canal principal e nas planícies de inundação diminui e o comportamento hidráulico do canal composto (i.e. os mecanismos do escoamento) aproxima-se de um canal simples.

1.4 Organização do documento

A dissertação apresentada está dividida em seis capítulos e o seu conteúdo está organizado do seguinte modo.

No presente capítulo, apresenta-se o enquadramento do trabalho, os principais objetivos e as metodologias que estiveram na base do trabalho desenvolvido e a estrutura desta dissertação.

No segundo capítulo apresenta-se a base teórica necessária para melhor compreender os fenómenos relacionados com escoamentos em canais de secção composta, tensão aparente e redes neuronais, através da referência a estudos de outros autores, bem como, os recursos teóricos requeridos para interpretar e analisar os resultados obtidos experimentalmente.

No terceiro capítulo procede-se à descrição da geometria das instalações e conseqüentemente da denominação das variáveis adotadas no estudo, bem como o processo de compilação da extensa base de dados recolhida na literatura existente. É também apresentada uma tabela resumo com intervalos de valores de ensaios dos autores escolhidos.

No quarto capítulo explica-se o processamento e a análise dos dados usando redes neuronais e posteriormente compara-se os erros calculados por esta função comparando-os com métodos de calculo de outros autores bibliográficos.

No quinto capítulo apresentam-se os cálculos referentes aos coeficientes Coriolis e Bousinesq para os ensaios experimentais anteriormente utilizados no estudo de τ_a e comparam-se, de forma crítica, com os valores extraídos da rede neuronal.

Por fim, no sexto capítulo são apresentadas as conclusões mais relevantes do trabalho realizado e são sugeridas novas possibilidades de desenvolvimento da investigação.

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Cheias Fluviais

O estudo e compreensão dos fenómenos das cheias são extremamente importantes para a segurança das populações e dos bens que se encontram em zonas propícias a inundações. Geralmente, a causa natural mais comum das cheias são as precipitações intensas (no caso de bacias hidrográficas pequenas) ou prolongadas (em grandes bacias hidrográficas). Embora sejam pouco frequentes, as situações de cheia são recorrentemente responsáveis por vários danos humanos e encargos económico-financeiros.

Estatísticas recentes estimam que as cheias fluviais tenham causado cerca de 7 milhões de mortes no século XX, sendo as perdas médias anuais a elas associadas de cerca 104 mil milhões de dólares americanos (UNDRR, 2019). Com o agravar das alterações climáticas, espera-se que o risco de cheias fluviais aumente em várias regiões no mundo (Ward et al., 2013; Ignjacevic et al., 2020).

Paralelamente, é expectável que a exposição às cheias aumente, em relação à situação em 2012, três vezes até 2050, devido ao aumento populacional e aos ativos económicos em áreas propícias a cheias (Jongman et al., 2012), tornando ainda mais evidente a necessidade de compreender as cheias fluviais, bem como os impactos associados, de modo a reduzir o risco de ocorrência das mesmas de modo eficaz e eficiente.

O impacto esperado das cheias na sociedade e no ambiente denomina-se frequentemente risco de cheia e resulta essencialmente da sobreposição de três componentes e os seus respetivos processos, que tendem a estar interligados. Essas componentes são (ver, por exemplo, Dottori et al., 2018; Barendrecht et al., 2017; Vorogushyn, S. et al., 2018; Di Baldassarre, et al., 2015; Merz, 2014):

- (1) os perigos - processos que levam à subida dos níveis das cheias;
- (2) a exposição - os elementos em risco, como a população ou as infraestruturas;

(3) a vulnerabilidade - a suscetibilidade dos elementos em risco quando afetados pela cheia.

Sendo os perigos determinados pelos processos atmosféricos e ambientais, a exposição dependente do uso de planícies aluviais e do desenvolvimento económico e populacional, e a vulnerabilidade moldada pelas influências adaptativas dos seres humanos, como as precauções provadas, os avisos prévios ou a gestão de crises (Merz, 2021).

As situações de cheia nos rios podem provocar uma subida do nível da água a um ponto tal que o caudal afluyente esgota a capacidade de vazão do leito principal, passando parte do escoamento a fazer-se nos terrenos adjacentes. Nessas condições, de uma forma geral, pode-se referir que o troço de jusante dos rios apresenta uma secção transversal composta pelo leito principal (*lp* ou *mc* da denominação em inglês *main channel*) ladeado por um ou dois leitos de cheia (*lc* ou *fp* de *floodplain*).

Nas últimas décadas foram realizados diversos estudos, experimentais e numéricos, sobre escoamentos em canais com secção composta. Na sua maioria é assumida a condição de regime uniforme. Tendo em conta que na natureza o escoamento raramente se processa em regime uniforme e que geralmente os leitos de cheia apresentam rugosidade superior à do leito principal, torna-se relevante estudar a influência deste tipo de condições/variáveis na estrutura de uma secção composta (Figura 1).

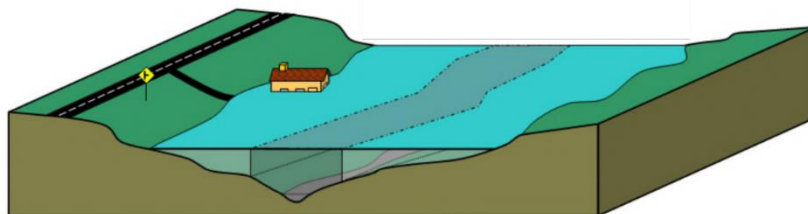


Figura 1 - Transbordo da água do leito principal para planícies habitáveis

2.2 Estrutura do escoamento em canais de secção composta

A maioria das estruturas dos rios naturais são canais compostos que consistem num canal principal profundo com uma ou duas planícies aluviais laterais com alturas de água relativamente rasas, que desempenham um papel vital na ocorrência de uma inundaçãõ e que, por serem zonas húmidas, geralmente são cobertas por vegetaçãõ. Nestes rios, o escoamento primário do canal principal interage com o escoamento das planícies aluviais superficiais que apresentam diferentes características de rugosidade. Como tal, existem estruturas complexas

e turbulentas no fluxo de canais compostos, que podem ser representados pela camada de mistura gerada pelo gradiente de velocidade na zona da interface entre o canal principal e as planícies aluviais. É relevante referir que a interação do fluxo na interface entre o canal principal e as planícies aluviais afeta a capacidade geral de descarga e a sua distribuição nos canais de secção composta (Singh et al., 2019). Os mecanismos de escoamento são ainda caracterizados pelos vórtices de larga escala com eixo vertical próximo da interface e pelas correntes secundárias que se formam nos leitos principal e de cheias (Figura 2).

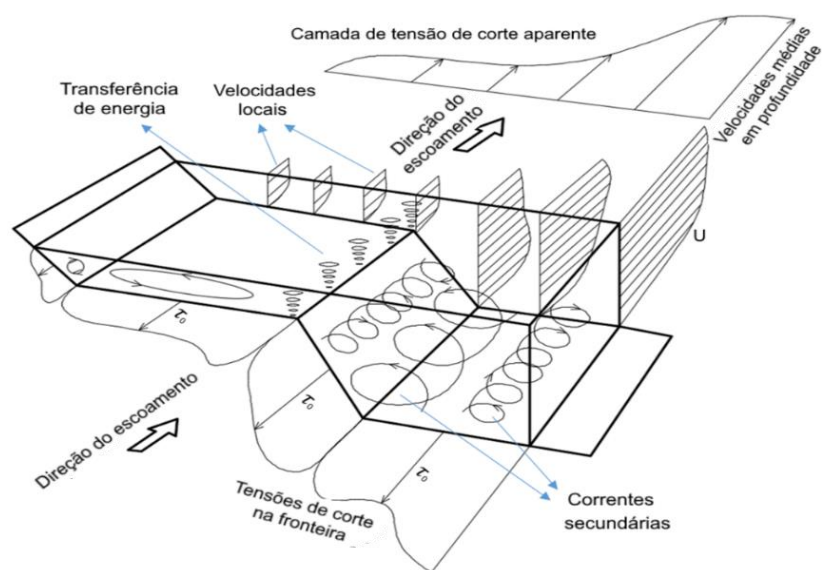


Figura 2 - Estrutura de fluxo turbulento em canal composto (adaptado de Shiono e Knight 1991).

O escoamento nos canais de secção composta sempre teve uma importância considerável quer teórica, quer prática, em acontecimentos de elevados caudais. Concretamente, ao longo dos anos, muitos investigadores tentaram estimar empiricamente a interação do fluxo em termos de tensão de corte sobre a interface entre o canal principal e as planícies aluviais (Singh et al., 2019).

2.3 Relação altura de água / caudal em canais de secção composta

Quando a vazão num canal fluvial se eleva acima de um determinado nível de cheia e inunda as áreas de planície aluviais adjacentes, a quantidade de movimento é transferida às

regiões da interface que separam as zonas profundas e rasas. Os níveis de turbulência aumentam com o aumento dos valores de rugosidade. Em certas condições, os fenômenos de transferência de quantidade de movimento gerados nas regiões de junção de fluxos de canais compostos podem ter uma influência significativa na hidráulica do sistema (Prinos, Townsend & Tavoularis, 1985).

Existe um gradiente entre a velocidade do escoamento no leito principal e a velocidade nos leitos de cheia, como consequência de diferenças na altura de escoamento e atrito no fundo do canal. De acordo com Van Prooijen et al. (2005), esse gradiente de velocidade gera uma camada de mistura na interface entre os leitos provocando uma complexa estrutura turbulenta tridimensional. Na Figura 2 destacam-se os vórtices de larga escala e de eixo vertical que provocam transferência de quantidade de movimento. Como resultado a capacidade de transporte do leito principal diminui e a dos leitos de cheia aumenta, provocando uma redução da capacidade de transporte global comparativamente à situação hipotética de não existir qualquer interação entre os escoamentos nos leitos principal e de cheias.

Tendo em conta os resultados obtidos em Fernandes et al. (2010), os autores concluíram que os métodos 1D baseados na divisão em subsecções obtêm boas estimativas de caudais, desde que sejam implementadas correções que indiretamente têm em conta a interação entre o escoamento no leito principal e o escoamento nos leitos de cheia.

Relativamente aos métodos de modelação 2D e 3D atualmente disponíveis, estes têm em conta algumas das características do escoamento em canais de secção composta. No entanto, na prática da engenharia, devido à elevada quantidade de dados necessários, muitas vezes não disponíveis, e da necessidade de utilizar malhas muito finas (o que aumenta o tempo de processamento da informação), os métodos 1D são, na maioria das vezes, preferidos. Ainda assim, a transferência de quantidade de movimento deve ser tida em consideração na modelação 1D (Bousmar e Zech, 1999).

Para fazer face às especificidades do escoamento em canais de secção composta, têm sido propostos métodos que, fazendo a divisão do canal, tentam modelar os processos de interação que ocorrem neste tipo de escoamentos, nomeadamente a transferência de massa e de quantidade de movimento.

Fernandes et al. (2010) compilaram e apresentaram alguns destes métodos, destacando método da troca de caudal (MTC) e o método da interação do canal dividido (MICD) que tentam melhorar os resultados dos métodos tradicionais: o método do canal único (MCU) e o método da divisão do canal (MDC).

O Método do Canal Único, MCU (*Single Channel Method*) não considera as secções compostas e assume uma velocidade uniforme em toda a secção transversal. Utilizando um coeficiente de rugosidade global, este método calcula o caudal total através de uma equação de resistência ao fundo (e.g. equação de Manning-Strickler).

$$Q = K R^{2/3} A S_0^{1/2} \quad (1)$$

Q - Caudal;

K - Coeficiente de rugosidade;

R - Raio hidráulico global;

A - Área de escoamento global;

S_0 - Declive longitudinal do canal.

O Método da Divisão do Canal, MDC (*Divided Channel Method*) propõe a divisão do canal em três subsecções, nomeadamente, o leito principal e os leitos de cheia. A divisão típica do canal é através de linhas verticais, sendo o caudal total dado pela soma dos caudais de cada leito:

$$Q = \sum_i Q_i = \sum_i K_i R_i^{2/3} A_i S_0^{1/2} \quad (2)$$

em que o índice i indica cada subsecção i (por exemplo, leito principal e de cheias).

O Método da Troca de Caudal, MTC (*Exchange Discharge Model*) desenvolvido por Bousmar e Zech (1999) é um método baseado no conceito de tensão tangencial aparente. Na base deste método está a integração na área de escoamento da equação da conservação da quantidade de movimento que, após simplificações e operações matemáticas, pode ser dada pelas seguintes equações:

$$\rho g A_{mc} S_0 + (h_{b,dir} \tau_{a,dir} + h_{b,esq} \tau_{a,esq}) - \tau_0 P_{mc} = 0 \quad \text{para o canal principal (3)}$$

$$\rho g A_{fp} S_0 - h_b \tau_a - \tau_0 P_{fp} = 0 \quad \text{para leitos de cheia (4)}$$

em que:

mc - canal principal - abreviatura proveniente do inglês de *Main Chanel*;

fp -leitos de cheia ou planícies de inundação - abreviatura de *Floodplains*;

ρ - Massa volúmica da água;

g - Aceleração da gravidade;

h_b – Altura do escoamento do leito principal;
 τ_a – Tensão tangencial aparente na interface;
 τ_0 – Tensão de arrastamento;
 P – Perímetro molhado da subsecção;
“dir” – Direita;
“esq” – Esquerda.

Conhecendo-se a tensão de arrastamento basta estabelecer uma formulação para a tensão aparente para se conseguir calcular a curva de vazão para um dado canal.

O MTC modela a chamada “transferência da quantidade de movimento associada à turbulência” através de um modelo análogo ao modelo da camada de mistura (Smart, 1992), obtendo a seguinte equação para a tensão tangencial aparente:

$$\tau_a = \frac{1}{2} \varphi \rho (U_{mc} - U_{fp})^2 \quad (5)$$

em que:

φ – Parâmetro experimental;
 U – Velocidade média do escoamento.

O MTC apresenta a modelação da transferência da quantidade de movimento associada não só à diferença de velocidade entre as secções como também provocadas pela geometria, nomeadamente a alargamentos ou estreitamentos do leito principal. Não se apresentam as fórmulas dessa modelação devido estarem fora do âmbito do presente trabalho. As mesmas poderão ser consultadas na referência original (Bousmar e Zech, 1999).

O Método da Interação do Canal Dividido, MICD (Interacting Divided Channel Method) desenvolvido por Huthoff et al. (2008) é um método que se baseia no conceito da tensão tangencial aparente (equações 18 e 19). Este método recorre à formulação proposta por Van Prooijen et al. (2005) para modelar a transferência da quantidade de movimento na interface, nomeadamente através da modelação das componentes de flutuação das velocidades longitudinal e transversal, obtendo a seguinte equação para a tensão aparente gerada na interface:

$$\tau_a = \frac{1}{2} Y \rho (U_{mc}^2 - U_{fp}^2) \quad (6)$$

em que Y corresponde a um coeficiente, tendo sido obtido a partir de ensaios experimentais recolhidos na literatura (Huthoff et al., 2008 sugerem o valor de 0,02).

2.4 Tensão Aparente

Desde o início do milênio que novos e melhorados métodos de estimativa da transferência de quantidade de movimento nas interfaces dos leitos de cheia principais têm sido apresentados recorrendo à tensão de corte aparente, que permitem obter melhores resultados quando comparados com os métodos tradicionais (Fernandes et al., 2015; Khozani et al., 2019).

A tensão de corte aparente (τ_a) permite quantificar a transferência de quantidade de movimento na camada de mistura de um canal composto. Embora os mecanismos subjacentes à tensão de corte aparente ainda estejam a ser estudados, foi possível verificar uma forte relação entre τ_a e o quadrado do gradiente de velocidade entre os escoamentos em cada leito (Chen et al., 2016).

O leito principal e os leitos de cheia criam uma velocidade diferencial, Figura 3, o que leva à formação de uma camada de corte aparente lateral forte, Figura 4 (Bousmar e Zech 1999; Omran 2008).

A tensão aparente é um dos parâmetros hidráulicos principais necessários para a predição e dimensionamento de um canal composto (Singh e Khatua, 2018).

O método de tensão de corte aparente (ASSM¹) assume a existência de uma tensão de tangencial adicional que atua na interface vertical entre os escoamentos no canal principal e nas planícies aluviais, contabilizando a transferência de quantidade de movimento entre os escoamentos nessas subseções.

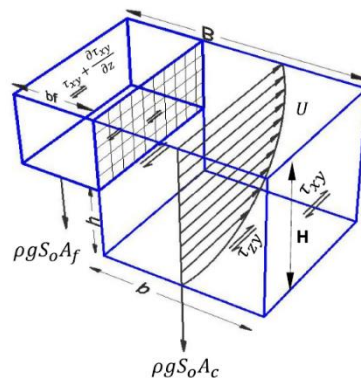


Figura 3 - Gradiente de velocidade do escoamento (Adaptado de Singh et al. 2019)

¹ Nesta dissertação será utilizado o acrónimo em inglês (*Apparent Shear Stress Method*).

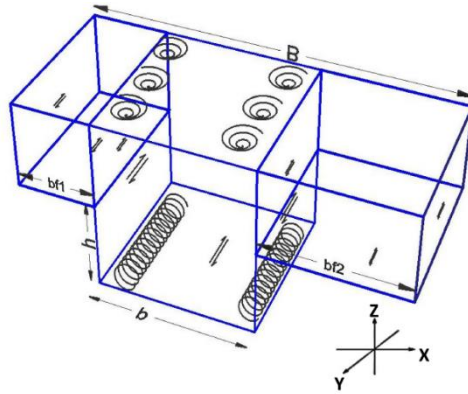


Figura 4 - Vórtices verticais e horizontais (Adaptado de Singh et al. 2019)

Esta tensão de corte aparente, τ_a , pode ser obtida pela integração, ao longo da planície aluvial ou das larguras do canal principal, da equação de conservação da quantidade de movimento média na altura para escoamento uniforme.

Sob escoamento uniforme, desprezando o termo de dispersão e a variação lateral da altura de escoamento obtém-se:

$$-\frac{1}{H_{mc}}(\rho g H_{mc} s_0 - \tau_0) = \frac{\partial \tau_{xy}^d}{\partial y} - \rho \frac{\partial VU}{\partial y} \quad (7)$$

onde:

τ_{xy}^d - Valor médio da tensão de Reynolds em profundidade;

y - Largura da planície;

V, U - Velocidades do escoamento nas direções lateral e longitudinal;

H_{mc} - Altura de escoamento.

Integrando a equação anterior sobre a largura da planície de inundação obtém-se:

$$\int \left[-\frac{1}{H_{mc}}(\rho g H_{mc} s_0 - \tau_0) \right] dy = \int \left[\frac{\partial \tau_{xy}^d}{\partial y} \right] dy - \int \left[\rho \frac{\partial VU}{\partial y} \right] dy \quad (8)$$

O lado direito desta equação é denominado tensão de corte aparente.

Na interface vertical entre o canal principal e a planície de inundação assume o seguinte valor:

$$\tau_a = -\tau_{xy}^d \Big|_{B_{mc}} + \rho UV \Big|_{B_{mc}} \quad (9)$$

Esta equação mostra que a tensão de corte aparente tem duas componentes distintas: uma que surge da turbulência e outra proveniente de correntes secundárias (Shiono e Knight 1991). O método da tensão aparente (ASSM) assume que τ_a pode ser modelado em função das características do canal (traduzidas pelos parâmetros geométricos ou parâmetros de rugosidade).

Tendo em conta um balanço de momento em cada subseção e as medidas de tensão de corte aparente de contorno sob escoamento uniforme, Myers (1978) quantificou a tensão de corte aparente na interface vertical das subseções. Desde então vários investigadores tentaram modelá-la, seguindo um procedimento empírico semelhante, aspeto que será abordado no capítulo 4.2.

Com base na teoria do comprimento de mistura de Ervine e Baird (1982) sugeriram a dependência da tensão de corte aparente com o quadrado do gradiente de velocidade entre os escoamentos em cada subseção. Prinos e Townsend (1985) obtiveram uma solução para a tensão de corte aparente usando uma regressão linear múltipla para os seus dados experimentais em canal composto simétrico.

Utilizando os dados do FCF-SERC², Wormleaton e Merret (1990) propuseram uma fórmula empírica para estimar a tensão de corte aparente em canais compostos retos. Christodoulou (1992) propôs uma fórmula simples que sugere que a tensão de corte aparente depende da razão entre a largura da planície de inundação e as larguras do canal principal.

Huthoff et al. (2008) desenvolveu uma nova equação para a tensão de corte aparente na interface com base na diferença entre as velocidades médias quadradas no canal principal e na planície de inundação. É importante destacar a equação de Moreta e Martin-Vide (2010) pela sua ampla gama de geometrias, escalas geométricas e distribuições de rugosidade. Estes autores propõem duas equações, separando a previsão da tensão de corte aparente em canais de pequena e grande escala.

Fernandes et al. (2010), em alternativa a Moreta e Martin-Vide (2010), propôs considerar apenas a segunda equação. A necessidade de dividir os dados em dois subgrupos de dados foi atribuída ao estabelecimento de condições de vazão uniformes em canais de pequena escala

² FCF-SERC - refere-se a uma grande instalação experimental financiada pelo conselho de investigação científica e engenharia (SERC), denominada nesta dissertação pelo acrónimo em inglês *flood channel facility* (FCF).

com abastecimento único de água tanto para o canal principal quanto para a planície de inundação.

A capacidade de vazão em cada subseção pode ser calculada pela equação de Manning, assumindo a tensão de corte adicional atuando na interface vertical entre o canal principal e as planícies de inundação, conforme as equações 10 e 11.

$$Q_{mc} = A_{mc} \frac{R_{mc}^{2/3}}{n_{mc}} S_0^{1/2} \sqrt{1 - \left(\frac{N_f \tau_a h_{fp}}{\rho g A_{mc} S_0} \right)} \quad (10)$$

$$Q_{fp} = A_{fp} \frac{R_{fp}^{2/3}}{n_{fp}} S_0^{1/2} \sqrt{1 + \left(\frac{\tau_a h_{fp}}{\rho g A_{fp} S_0} \right)} \quad (11)$$

onde:

n - Coeficiente de rugosidade

R - Raio Hidráulico

h_{fp} - Altura planície de inundação

N_f - Número de planícies de inundação

A inclusão da tensão de corte aparente leva a um aumento da vazão na planície de inundação e uma diminuição da vazão no canal principal e em toda a seção transversal em comparação com os resultados obtidos pelo MDC. Considera-se que as equações empíricas para a tensão de corte aparente se ajustam muito bem à série de dados para a qual foram desenvolvidas.

2.5 Coeficiente de atrito aparente C_{fa}

Sendo a tensão aparente derivada da transferência de quantidade de movimento, e esta é principalmente influenciada pelo gradiente de velocidades, Christodoulou (1992) propôs a seguinte expressão geral:

$$\tau_a = \frac{1}{2} \rho C_{fa} (\Delta U)^2 \quad (12)$$

em que C_{fa} é um coeficiente (adimensional) de atrito aparente que atua na interface vertical do canal principal com a planície de inundação. Moreta e Martin-Vide (2010) identificaram a grande dependência de C_{fa} com a razão entre a largura total do canal de seção composta, B , com a largura do canal principal b_{mc} .

C_{fa} também foi relacionado com altura relativa do escoamento, H_r , dada pela relação das alturas de escoamento no leito de cheias e no leito principal:

$$H_r = \frac{H_{mc} - h_b}{H_{mc}} \quad (13)$$

onde:

H_{mc} é a altura total do escoamento no leito principal;

h_b é a altura do do leito principal.

Ackers (1993) identificou esta razão como significativa no fenómeno de interação, mas incluiu também a razão entre a altura do escoamento do leito principal e a largura do mesmo h_b/b_{mc} . Para planícies de inundação rugosas, a razão de rugosidade n_r , entre a planície de inundação e o canal principal é também bastante importante.

Portanto, C_{fa} pode ser definido como:

$$C_{fa} = C_{fa} \left(\frac{B}{b_{mc}}, H_r, \frac{h_b}{b_{mc}}, n_r \right) \quad (14)$$

2.6 Redes Neurais

O desenvolvimento das Redes Neurais (ANN do termo em inglês, *Artificial Neural Networks*) teve início há cerca de 70 anos (McCulloch e Pitts 1943), inspirado pelo desejo de compreender o cérebro humano e igualar o seu funcionamento, tendo vindo a surgir uma evolução significativa decorrente da emergência de ferramentas computacionais poderosas e de algoritmos mais sofisticados, em particular nos últimos anos.

A sua capacidade de identificar relações em padrões possibilita a resolução de problemas complexos de grande escala, como reconhecimento de padrões, modelação não linear, classificação, associação e controlo. Consequentemente, as ANNs têm aplicações em diversas áreas, tais como a neurofisiologia, a física, a engenharia biomédica, a engenharia mecânica, a engenharia elétrica, as ciências computacionais, a acústica, a cibernética, a robótica, o processamento de imagens, finanças, entre outros (Govindaraju, 2000).

Neste sentido, as ANNs têm vindo a ganhar popularidade ao longo dos anos, como é evidenciado pelo aumento crescente do número de artigos sobre este tópico em revistas científicas na área da hidráulica e da hidrologia, por exemplo (Govindaraju, 2000). Desta forma, têm sido dedicadas grandes investigações ao seu potencial enquanto ferramentas computacionais que adquirem, representam e elaboram mapeamentos a partir dos inputs que recebem.

As ANNs permitem a elaboração de modelos não lineares, que tipicamente são verificados nesta temática, mais concretamente, em questões como: a previsão do fluxo de corrente, a qualidade da água, a previsão de precipitação, as operações de reservatórios, etc... (Govindaraju, 2000).

Em comparação com outros métodos, as ANNs têm a vantagem não só de ser mais versáteis, devido à elevada liberdade conferida pela possibilidade de escolha de número de camadas e neuronios associados, como também o facto de a sua estrutura permitir que a informação seja processada em múltiplas vias simultaneamente, ou seja, permitindo a implementação em paralelo (Govindaraju, 2000). Especificamente, quando comparadas com técnicas que têm por base regressões, que requerem pressupostos sobre a forma matemática da relação entre input e output, Figura 5, as ANNs permitem a criação de modelos não lineares que são muitas vezes mal compreendidas ou não definidas o suficiente para realizar uma análise significativa com base em métodos físicos. Além disso, é necessário uma grande quantidade e qualidade de dados validados com o objetivo de obter bons resultados.

Além disso, uma maior compreensão dos processos hidráulicos poderá permitir elaborar o modelo perfeito de ANN, em que são tidas em consideração todas as variáveis dos mesmos. A crescente aceitação por parte da comunidade científica relativamente às ANNs poderá promover a produção de modelos melhorados com resultados notáveis (Tanty e Desmukh, 2015).

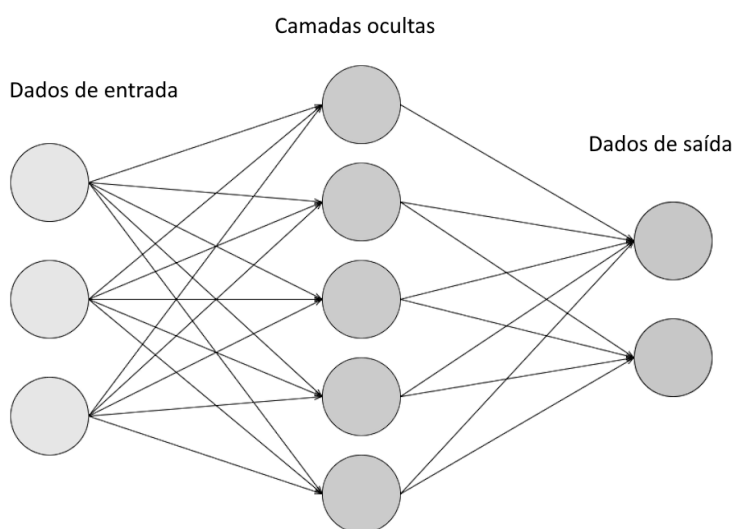


Figura 5 - Estrutura típica de uma rede neuronal com vários dados de entrada (Inputs)

2.7 Coeficiente de Coriolis e Boussinesq

Aplicar modelos hidráulicos bidimensionais à engenharia fluvial requer parâmetros difíceis de obter e é mais complexo que um simples modelo unidimensional. Adicionalmente, é de referir que alguns estudos demonstraram que a utilização de modelos bidimensionais pode não se refletir, necessariamente, em melhores resultados (e.g. Hardy et al., 1999; Marks e Bates, 2000; Bates et al., 2003; Aggett e Wilson, 2009).

O coeficiente de Coriolis (α ; adimensional) é um coeficiente de correção da energia cinética e o coeficiente de Boussinesq (β ; adimensional) é utilizado para a correção da quantidade de transferência de energia num escoamento. Estes coeficientes de correção facilitam o cálculo do caudal, utilizando as velocidades médias ao invés de utilizar as componentes pontuais da velocidade ao longo da secção do canal

Os métodos para calcular α e β podem ser categorizados como métodos aproximados, gráficos e teóricos (Hamidifar et al., 2016). Em alguns estudos, tanto α como β foram expressos como uma função do rácio do máximo e a média da velocidade da secção transversal (Rehbock, 1922; Chow, 1959; Mazumder, 1971).

Devido à distribuição não uniforme das velocidades numa secção de canal, é importante analisar a linha de energia média correspondente ao escoamento do caudal. Assim considerando $\frac{u^2}{2g}$ como a energia cinética por unidade de peso do fluido, e u a componente pontual da velocidade num determinado local do canal, Cardoso et al., (2021)apresentou:

$$\int_S Y \frac{u^2}{2g} u dS \quad (15)$$

Onde:

$\int Y u dS$ corresponde ao peso do fluido que atravessa a secção por unidade de tempo

Se o escoamento apresentasse uma distribuição uniforme de velocidades, com $u = U$, em que U é a velocidade média na secção transversal, a respetiva potência seria $Y(U^3/2g) S$. Na prática da engenharia, a distribuição de velocidades nas secções da conduta é, por norma, não-uniforme, pelo que $\int u^3 dS \neq U^3 S$, recorrendo-se ao coeficiente de energia para calcular a energia cinética, por unidade de peso de fluido, que atravessa uma dada secção transversal em função da velocidade média do escoamento.

Assim, define-se α como a razão entre a potência cinética do escoamento que efetivamente atravessa uma secção transversal de área S e a potência cinética de um escoamento fictício com velocidade uniforme igual à velocidade média, U , nessa secção:

$$\alpha = \frac{\int u^3 \Delta S}{U^3 S} \quad (16)$$

Relativamente à distribuição de velocidades longitudinais, uma vez mais, é não-uniforme, sendo $\int u^2 dS \neq U^2 S$ e, portanto, é necessário recorrer-se ao coeficiente da quantidade de movimento para exprimir este integral. β é definido pela razão entre o fluxo de quantidade de movimento de um escoamento, que efetivamente atravessa uma secção transversal de área S e o fluxo de quantidade de movimento de um escoamento fictício com velocidade uniforme igual à velocidade média, U , na mesma secção. Cardoso et al. (2021) apresentou:

$$\beta = \frac{\int u^2 \Delta S}{U^2 S} \quad (17)$$

Tendo em conta a definição e o método de cálculo destes coeficientes, vários autores tentaram estabelecer correlações entre estes e as características geométricas e de rugosidade dos canais do escoamento. Através de estudos experimentais, Kubrak et al (2015) concluiu que os coeficientes de energia e momento não dependem da inclinação do canal.

Os resultados obtidos por Al-khatib (1999), mostraram que os coeficientes α e β diminuem com o aumento do caudal e com o aumento da altura relativa, uma vez que o escoamento se torna mais estável com um fluxo mais elevado. Além disso, este autor verificou que os coeficientes α e β são, geralmente, superiores à unidade, $1 < \beta < \alpha$.

A transferência de impulso lateral entre o canal principal e a planície de inundação é muito elevada nos canais compostos e, por isso, a distribuição da velocidade do escoamento não é uniforme. Por conseguinte, os coeficientes α e β tornam-se elevados nos canais compostos (Seckin, 2009). Este autor assumiu também que a influência da largura e do degrau do canal principal em valores de α é quase insignificante e que os valores de β diminuem ligeiramente à medida que a largura do canal principal aumenta.

Hamidifar et al. (2016) verificou que os valores médios de α e β para canais compostos com vegetação são bastante superiores aos dos canais compostos sem vegetação, concluindo que, à medida que a densidade da vegetação aumenta, α e β também aumentam. Contudo, α é mais sensível a esta variação de densidade da vegetação do que β . A mesma relação se aplica à variação de altura relativa.

DADOS EXPERIMENTAIS

3.1 Variáveis utilizadas

Como se referiu anteriormente, no presente trabalho foi compilada uma base de dados experimentais de ensaios realizados em canais de secção composta. Esses ensaios foram efetuados em canais de diferentes dimensões cobrindo uma grande variação de geometrias, tamanhos e rugosidades. Na Figura 6 (a e b) são apresentadas as variáveis utilizadas para canais de secção composta simétricos e assimétricos.

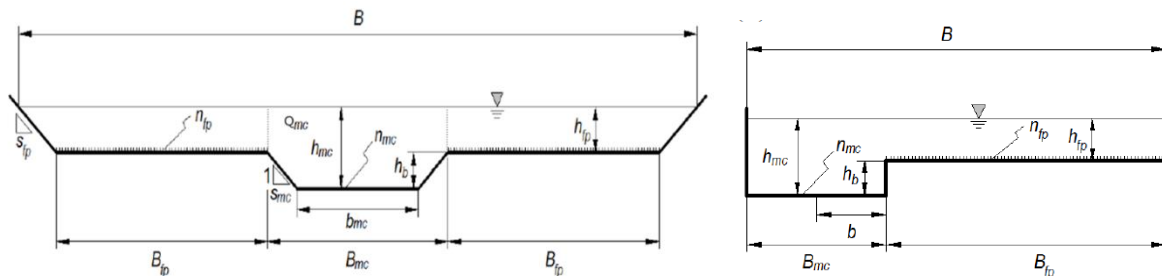


Figura 6 - Geometria do (a) canal simétrico e (b) assimétrico (adaptada de Fernandes et al. 2015)

São, desta forma, adotadas as seguintes variáveis:

- Q_t - Caudal total, Q_{mc} - Caudal do leito principal; Q_{fp} - Caudal dos leitos de cheias;
- B_{fp} - Largura dos leitos de cheias, B_{mc} - Largura do topo do leito principal, b_{mc} - Largura base do leito principal, B - Largura total do canal composto;
- h_{mc} - Altura total do escoamento, h_b - Altura do leito principal, h_{fp} - Altura dos leitos de cheias;
- s_{mc} - Inclinação das margens do leito principal, s_{fp} - Inclinação das margens dos leitos de cheias, s_0 - Declive longitudinal; n_{mc} - Coeficiente de rugosidade do leito principal, n_{fp} - Coeficiente de rugosidade leitos de cheias.

3.2 Dados recolhidos da literatura

A base de dados experimentais contendo as relações entre as alturas de escoamento e os caudais nos leitos principal e de cheias ou o caudal total teve por base a compilação apresentada em Fernandes et al. (2015). A essa base de dados foram adicionados alguns ensaios entretanto recolhidos da literatura (e.g Rajaratnam e Ahmadi 1979 e Rajaratnam e Ahmadi 1981)

Através da análise da bibliografia existente foi obtida uma base de dados com as várias características geométricas de escoamentos em canais experimentais estudados por diversos autores. Essa base de dados foi verificada através da análise de cada referência bibliográfica e após a sua confirmação, foram calculados os parâmetros adimensionais e dimensionais necessários para o presente estudo, tais como:

- Área de escoamento;
- Perímetro molhado;
- Raio Hidráulico definido por $R = \frac{\text{Área de escoamento}}{\text{Perímetro Molhado}}$;
- Altura relativa (H_r);
- Velocidade do escoamento
- Caudal
- Número de Froude definido por $F_r = \frac{U}{(g R)^{\frac{1}{2}}}$
- Número de Reynolds definido por $R_e = \frac{4 U R}{\nu}$, em que ν representa a viscosidade cinemática
- Razão de coeficientes de rugosidade definido por $n_r = \frac{n_{mc}}{n_{fp}}$

Posto isto, os trabalhos realizados resultaram numa extensa base de dados composta por 588 ensaios realizados por 16 autores diferentes. Destes ensaios, um total de 157 apresentam separadamente o valor do caudal escoado no canal principal e nas planícies de cheia, sendo um entrave para o estudo da tensão aparente τ_a , pois nesta dissertação compara-se este parâmetro calculado através de duas equações diferentes (18 e 19) em função do caudal em cada subsecção.

No capítulo seguinte serão apresentadas as equações usadas para o cálculo da tensão aparente (τ_a) e outra alternativa para obter mais valores desta tensão, sendo o principal objetivo coletar uma maior amostra de dados para o presente estudo.

No quadro resumo seguinte são apresentados os intervalos de valores dos ensaios de cada autor.

Quadro 1 - Resumo dos dados experimentais obtidos da literatura

Referência	Q_t (l/s)	s_0 (10^{-3})	B/b_{mc}	$(H_{mc}-h_b)/H_{mc}$	h_b/b_{mc}	$n_r=n_{mc}/n_{fp}$	B_{fp} (m)	b_{mc} (m)	h_b (m)	S_{mc} (V:H=1:s)	S_{fp} (V:H=1:s)	N	Fr	Re (10^{+3})
Prinos e Townsend (1984)	4,8- 26	0,3	3,83-5,26	0,089-0,329	0,334-0,502	0,5-1,0	0,381	0,305-0,407	0,102	0,5	0	40	0,214-0,369	15,8-74,3
Myers (1978)	6,3-18,2	0,26-0,97	2,40	0,086-0,394	0,402	1	0,356	0,356	0,102	0	0	10	0,925-0,330	30,2-76,7
Knight and Demetriou (1983) KD-s3	4,9-29,4	0,966	2,00-4,01	0,108-0,503	0,5	1	0,076-0,229	0,152	0,076	0	0	18	0,565-0,682	25,0-128,0
Noutsopoulos and Hadjipanos (1983)	9,0-45	1,5	4,00-6,67	0,187-0,479	0,5	1	0,225-0,425	0,15	0,075	0	0	16	0,650-0,791	30,3-140,5
Wormleaton (1982)	9,0-48	0,43-1,8	4,19	0,111-0,429	0,417	0,444-0,864	0,460	0,288	0,12	0	0	40	0,238-0,848	24,1-117,6
Knight & Hamed (1984)	3,8-29,8	0,966	2,00-4,01	0,104-0,518	0,5	0,189-0,917	0,076-0,229	0,152	0,076	0	0	48	0,339-0,701	21,6-128,9
Myers (1984)	5,8-45,8	0,93	3,25-4,75	0,067-0,534	0,5	1	0,18-0,3	0,16	0,08-0,12	0	0	33	0,570-0,727	26,3-168,6
Hu, Gi and Guo (2010)	17,0-39,0	1	3,33	0,341-0,528	0,2	0,846	0,350	0,3	0,06	0	0	5	0,540-0,581	57,4-124,0
Atabay (2001 symmetric)	11,4-60,1	2,024	3,05	0,071-0,490	0,126	1	0,407	0,398	0,05	0	0	13	0,948-1,094	34,6-170,2
Atabay (2001 asymmetric)	15,0-43,8	2,04	2,02	0,165-0,499	0,126	1	0,407	0,398	0,05	0	0	8	0,905-0,993	64,9-173,7
Proust (2005)	17,3-36,3	1,8	3,00	0,219-0,412	0,125	1	0,80	0,4	0,05	0	0	3	0,849-0,902	51,9-105,7
Bousmar (2002)	7,8-15,9	0,99	2,00	0,081-0,366	0,125	1	0,40	0,4	0,05	0	0	4	0,555-0,658	34,2-66,2
Wormleaton and Merret (1990)	208,2-1114,1	1,027	2,20-6,67	0,041-0,500	0,1	1	0,75-4,1	1,8	0,15	1	0	22	0,337-1,148	133,8-321,8
Wormleaton and Merret (1990) s7	216,0-543,0	1,027	4,20	0,038-0,505	0,1	0,273-0,862	2,250	1,8	0,15	1	0	8	0,719-1,047	117,3-666,8
Fernandes (2012)	38,2-118,3	1,1	5,00	0,106-0,375	0,25	0,535-1	0,7	0,6	0,1	1	0	9	0,529-0,883	72,3-214,2
James and Brown (1977)	3,54-34,00	1,0-3,0	2,64-8,25	0,002-0,444	0,286	0,563-1,0	0,191-0,572	0,279-0,381	0,051-0,069	1	1	275	0,471-1,536	9,6-105,4
Knight and Shiono (1996)	185,8-1103,4	1,027-1,03	1,6-4,4	0,050-0,503	0,1	1	2,250	1,5-2,1	0,15	0,0-2,0	0	23	0,719-1,065	117,4-856,1
Rajaratnam & Ahmadi (1979)	5,1-56,74	0,03-1,14	6	0,12-0,387	0,528-0,546	0,909	0,5	0,2	0,109	0	0	7	0,088-0,798	13,4-145,4
Rajaratnam & Ahmadi (1981)	27-56	0,364-0,724	1,71	0,136-0,463	0,137	0,909	0,508	0,711	0,098	0	0	6	0,300-0,426	79,9-156,6

Neste quadro, N representa o número de ensaios realizados, S_{mc} (V:H=1:s) e S_{fp} (V:H=1:s) representam respectivamente a inclinação do canal principal e das planícies de inundação (Vertical : Horizontal).

Os dados dos autores aqui referidos foram obtidos através de Fernandes et al. (2015).

TENSÃO APARENTE

4.1 Obtenção da tensão aparente (experimental)

Tendo sido recolhidos os dados experimentais apresentados no capítulo anterior, a obtenção da tensão de corte aparente foi realizada de diversas formas conforme a disponibilidade dos dados de base, sendo de seguida apresentado um resumo esquemático da metodologia utilizada de acordo com os dados disponíveis e recolhidos da literatura (cf. Figura 7).

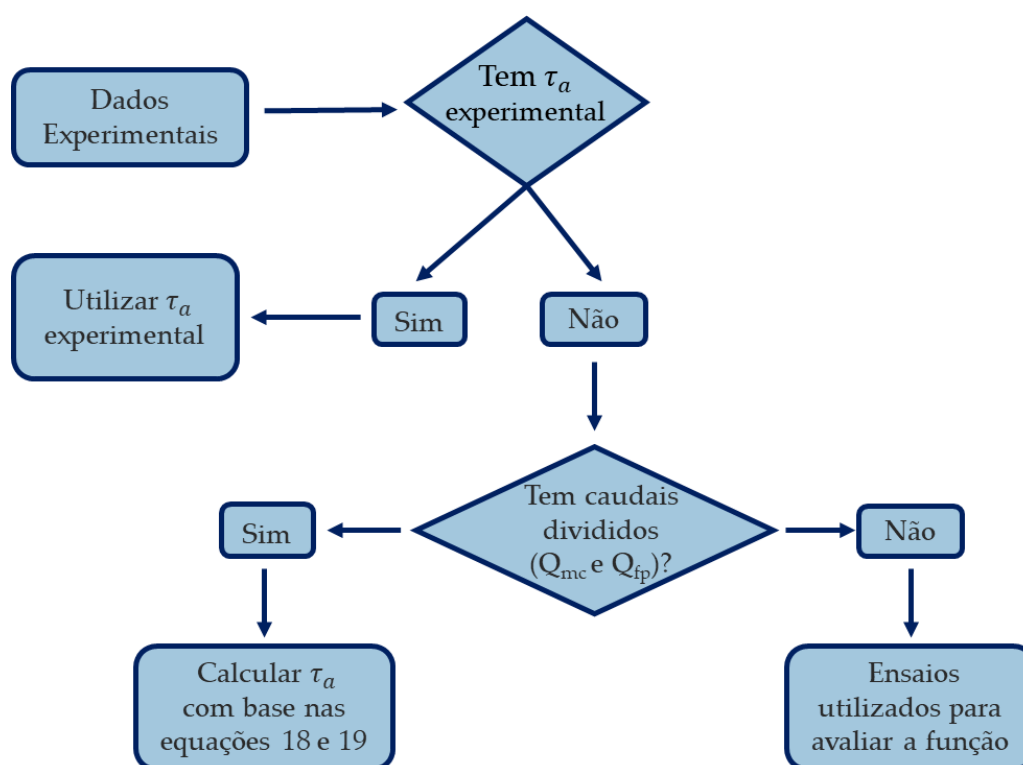


Figura 7 - Procedimento para a obtenção da tensão aparente

Dos ensaios disponíveis na literatura, 189 incluem o valor experimental da tensão de corte aparente (τ_a), tendo-se considerado, nesses casos, esse valor como para a calibração da rede neuronal.

Caso os ensaios não apresentem este valor experimental de τ_a , foi necessário verificar se existe o valor do caudal total escoado e dividido em cada subsecção (leitos principal e de cheias). Esta condição foi verificada em 157 ensaios, e nestes casos a tensão aparente foi calculada a partir das seguintes equações:

$$\tau_a = \frac{\left[1 - \left(\frac{Q_{mc} n_{mc}}{A_{mc} R_{mc}^{2/3} S_0^{1/2}} \right)^2 \right] \rho g A_{mc} S_0}{N_f h_{fp}} \quad (18)$$

$$\tau_a = \frac{\left[\left(\frac{Q_{fp} n_{fp}}{A_{fp} R_{fp}^{2/3} S_0^{1/2}} \right)^2 - 1 \right] \rho g A_{fp} S_0}{h_{fp}} \quad (19)$$

Os 300 ensaios que não incluem dados da divisão do caudal escoado em cada subsecção, nem continham valores de τ_a experimentais, não foram utilizados para treinar a rede neuronal. No entanto, foram utilizados para avaliar a função obtida e inseridos posteriormente na rede neuronal com o objetivo de aumentar o número de ensaios para comparação na estimativa de caudal. Para compreender melhor a base de dados coletada é apresentado, na figura 8, o diagrama de Venn.

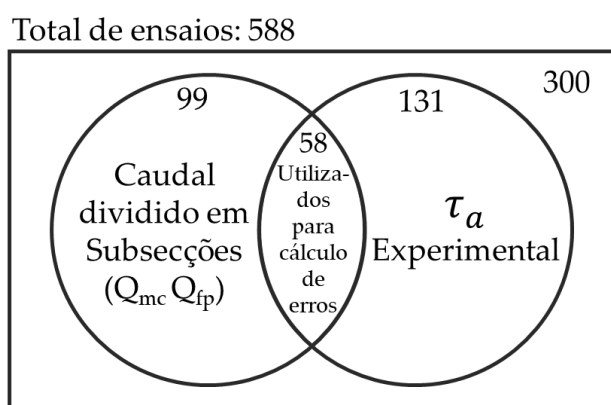


Figura 8 - Diagrama de Venn dos ensaios realizados

Os 58 ensaios que continham simultaneamente os valores do caudal dividido em caudal principal (Q_{mc}) e planícies de inundação (Q_{fp}) e os valores de τ_a experimentais, foram utilizados para concluir qual seria o menor erro de tensão aparente (τ_a) calculado com o valor do Q_{mc} ou com o valor do Q_{fp} , equações 18 e 19, respetivamente. Para isso utilizou-se a seguinte equação:

$$Erro(\%) = \frac{\tau_a(experimental) - \tau_a(calculado)}{\tau_a(experimental)} \times 100 \quad (20)$$

O erro foi menor para valores de τ_a calculados com o caudal do canal principal (Q_{mc}). Ou seja, foram adotados, preferencialmente, os valores de τ_a experimentais e caso não existissem optou-se pelos valores de τ_a calculados através do caudal do canal principal (equação 18). Obteve-se, desta forma, um conjunto de 288 ensaios com valores de τ_a .

4.2 Métodos disponíveis para avaliação da tensão aparente

O conceito de tensão aparente foi introduzido por Myers (1978) e, desde então, diversos autores tentaram, quase sempre com base num número limitado de ensaios, obter expressões para a estimativa da tensão aparente. Com a introdução da tensão adicional na estimativa dos caudais (cf. equações (10) e (11)), é possível obter uma melhoria dessa estimativa em relação ao Método da Divisão do Canal. **No Erro! A origem da referência não foi encontrada.** são apresentadas as expressões 21 à 25, para o cálculo da tensão aparente.

Quadro 2 - Equações para cálculo da tensão aparente na interface vertical entre o canal principal e as planícies de inundação.

Referência	Calibração	Equação	
Wormleaton (1982)	Canal simétrico com leitos de cheia lisos e rugosos	$\tau_a = 13.84 \left(\frac{H_{mc}}{h_b}\right)^{-3.123} \left(\frac{B - b_{mc}}{b_{mc}}\right)^{-0.727} (\Delta U)^{0.882}$	(21)
Prinos e Townsend (1984)	Canal simétrico com leitos de cheia lisos e rugosos	$\tau_a = 0.874 \left(\frac{H_{mc} - h_b}{h_b}\right)^{-1.129} \left(\frac{B}{b_{mc}}\right)^{-0.514} (\Delta U)^{0.92}$	(22)
Wormleaton e Merret (1990)	Canal simétrico com leitos de cheia lisos e rugosos	$\tau_a = 3.325(H_{mc} - h_b)^{-0.354}(B - b_{mc})^{0.519}(\Delta U)^{1.451}$	(23)

Christodoulou (1992)	Canal simétrico e assimétrico com leitos de cheia lisos e rugosos	$\tau_a = \rho 0.005 \rho \left(\frac{B}{b_{mc}} \right) (\Delta U)^2$	(24)
----------------------	---	---	------

Chen (2016)	Canal simétrico com leitos de cheia lisos e rugosos	$\tau_a = 0.00025 \rho \left(\frac{B}{b_{mc}} \right) \left(\frac{H_{mc} - h_b}{h_b} \right)^{-1} \left(\frac{h_b}{b_{mc}} \right)^{-0.5} \left(\frac{n_{fp}}{n_{mc}} \right)^{\frac{1}{3}} (U_{mc}^2 - U_{fp}^2)$	(25)
-------------	---	--	------

Nestas expressões, além de características geométricas dos canais que são, à partida, conhecidas, é necessária uma primeira estimativa das velocidades médias nos leitos principal, U_{mc} , e de cheias, U_{fp} , ou o seu gradiente, ΔU . A generalidade dos autores recomenda que essa estimativa seja obtida através do Método da Divisão do Canal (cf. secção 2.3).

4.3 Rede neuronal

Com o intuito de otimizar o cálculo de τ_a e obter valores mais próximos da realidade, tal como outros autores, desenvolveu-se uma função que calculasse τ_a através de características geométricas e de rugosidade do canal, sendo que nesta dissertação utilizaram-se redes neurais para auxiliar o estudo.

Analisaram-se os 288 ensaios que continham valores de τ_a e introduziram-se como dados de entrada (*input*) de cinco colunas de parâmetros adimensionais: $\frac{B}{b_{mc}}$; $\frac{(H_{mc} - h_b)}{H_{mc}}$; $\frac{h_b}{b_{mc}}$; n_r ; N° fp e uma coluna objetivo (*target*), também esta adimensional, com valores de C_{fa} calculados através da equação (12) com os respetivos valores de τ_a . Este *target* tem o objetivo de treinar a rede neuronal e criar uma função ótima de cálculo de τ_a , ou seja, para o input apresentado o valor ótimo que desejamos é o valor correspondente de C_{fa} .

Com recurso ao programa *Mathworks Matlab R2016a*, foi utilizada a função de programação *Neural Fitting App* apresentada na Figura 9.

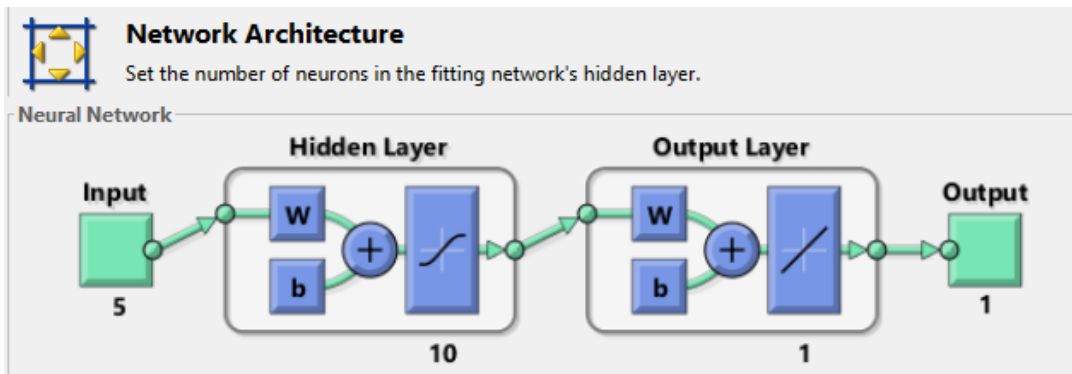


Figura 9 - Neural Fitting App

Adotou-se o mesmo raciocínio de Singh et al. (2019) que recorreram a 10 neurónios para treinar a rede, que posteriormente podiam ser alterados se os erros obtidos fossem muito elevados.

Os neurónios são usados para representar as unidades de processamento da rede. Estes recebem inputs de outros neurónios, processam essa entrada usando conexões ponderadas ou funções de ativação, e transmitem o output para os neurónios de saída.

Na figura 10 apresenta a seleção dos dados utilizados para treinar a rede neuronal, cinco colunas de input e uma coluna de *target*, ambas com 288 linhas correspondentes aos ensaios que continham valores de τ_a .

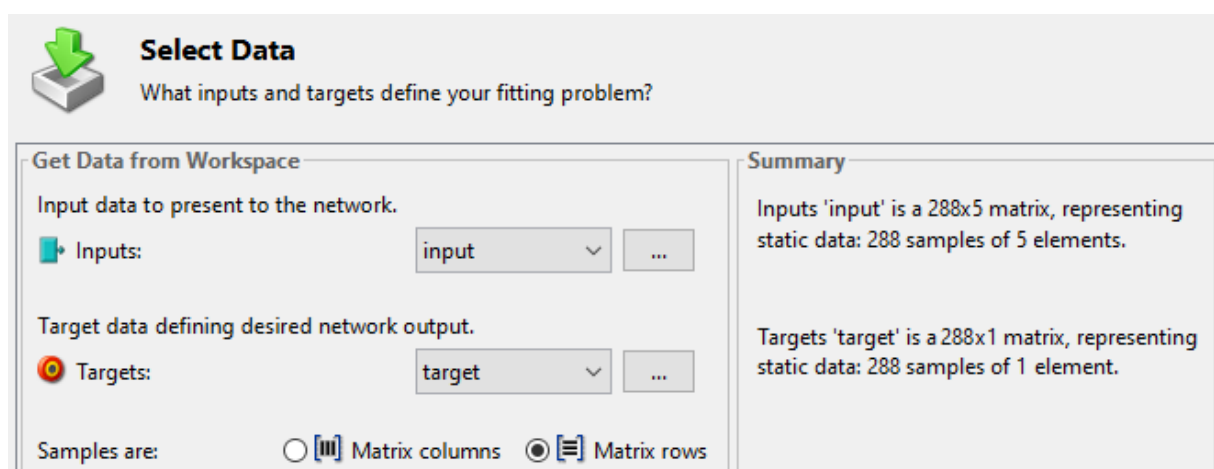


Figura 10 - Seleção dos dados para o estudo

Os 288 dados são divididos em categorias, de acordo com a função que desempenham na rede neuronal. Existem três tipos de dados:

1. **Dados de Treino:** são apresentados à rede durante a formação, e a rede é ajustada de acordo com o seu erro (202 dados).
2. **Dados de Validação:** são utilizados para medir a generalização da rede, e para parar o treino quando a generalização deixa de melhorar (43 dados).
3. **Dados de Teste:** estes não têm qualquer efeito sobre a formação e, portanto, proporcionam uma medida independente do desempenho da rede durante e após a formação (43 dados).

Na Figura 11 está apresentado o layout do programa e a percentagem de dados utilizados com base na sua função. O resultado pretendido de cada o neurónio de saída é controlado pelos pesos e enviesamentos compatíveis ao longo de todo o algoritmo de treino, de acordo

com os rácios comuns neste tipo de análises (e.g. Singh et al. 2019), foram utilizados 70% dos dados para treinar a rede, 15% para a sua validação e 15% para testar o desempenho da rede.

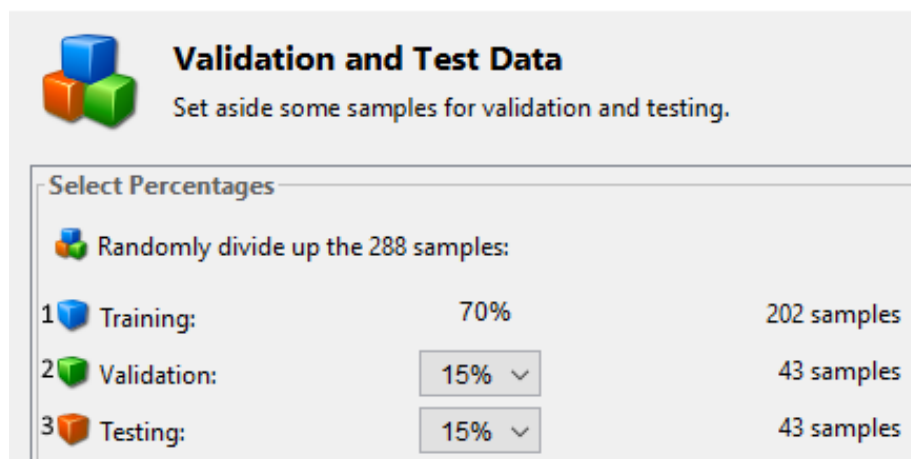


Figura 11 - Dados de Treino, Validação e Teste

Depois de seleccionar os dados e as respetivas percentagens de validação, treinou-se a rede neuronal com algoritmo Levenberg-Marquardt, Figura 12, desenvolvido no início da década de 1960 e publicado por Kenneth Levenberg, tendo este sido posteriormente aperfeiçoado por Donald Marquardt (Gavin, 2022). Este algoritmo é utilizado em muitas aplicações de software para a resolução de problemas genéricos de ajustamento de curvas, procurando o mínimo local numa função e convergindo com grande rapidez.

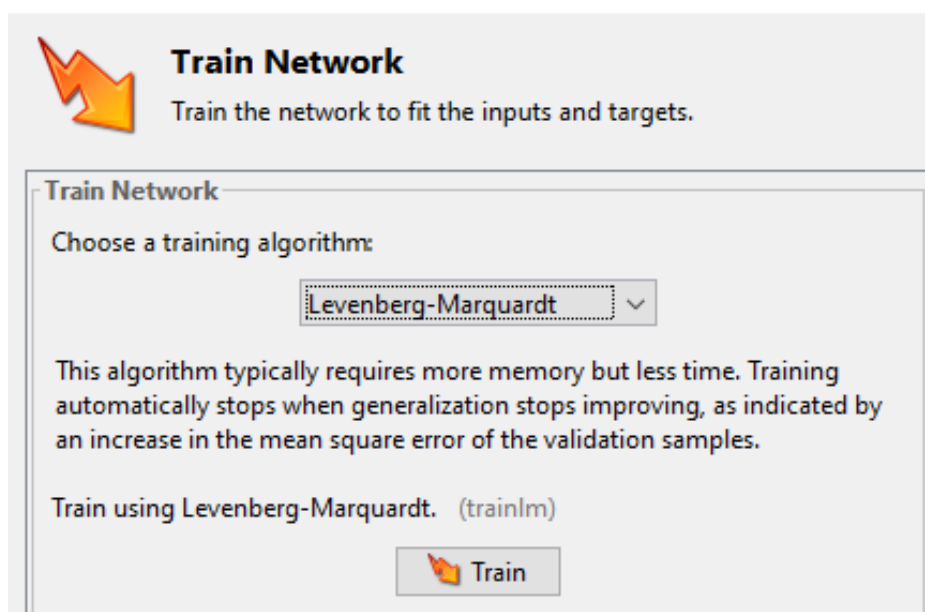


Figura 12 - Algoritmo de treino da rede neuronal

Após o treino é gerada uma função, Figura 13, que podemos extrair do programa e, tal como referido anteriormente, calcular valores de C_{fa} para qualquer geometria ou ensaio.

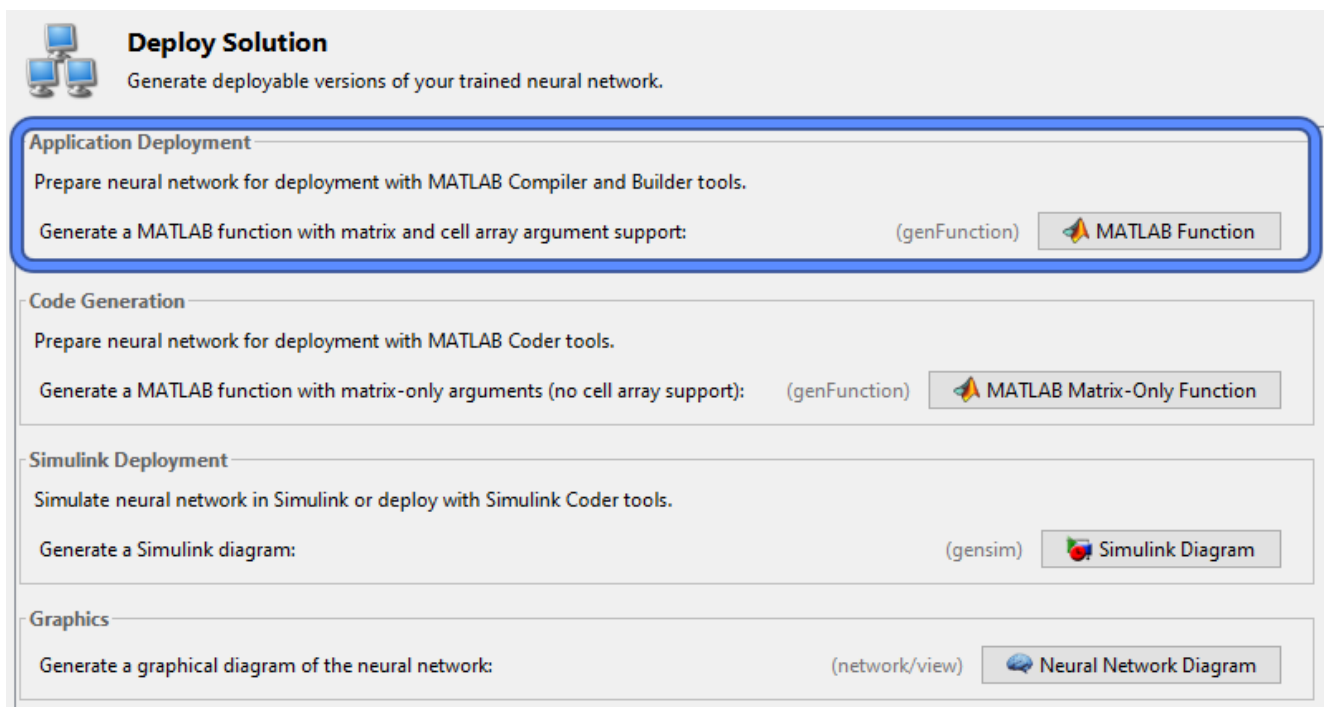


Figura 13 - Função Matlab

Após correr o programa foi obtido um Output de dados de C_{fa} . No Quadro 3 são apresentados os intervalos de valores utilizados para treinar a rede neuronal e do output extraído pelo programa. Observa-se que os valores de C_{fa} máximos e mínimos no intervalo de target e output são um pouco diferentes, no entanto ao analisar os dados observa-se que são em apenas dois ou três casos, concluindo que 98% dos ensaios têm a mesma gama e amplitude de valores.

Quadro 3 - Intervalos de target, input e output

Target	Input					Output
C_{fa}	B/b_{mc}	$(H_{mc}-h_b)/H_{mc}$	Nº FP	h_b/b_{mc}	n_r	C_{fa}
0,0014 - 0,305	1,714 - 6,66	0,038-0,535	1,0-2,0	0,1-0,75	0,189-1	0,0004-0,12

De seguida foi possível introduzir, na função obtida, todos os parâmetros adimensionais referentes aos 588 ensaios e extrair os respetivos valores de C_{fa} .

Na Figura 14 é exemplificado o procedimento adotado para o cálculo do valor da tensão aparente, com os respetivos valores de C_{fa} (extraídos da rede) e de seguida o caudal no canal principal e nas planícies de inundação, com recurso às equações anteriormente apresentadas 18 e 19.

$$\begin{array}{c}
 C_{fa}(\text{rede neuronal}) \\
 \downarrow \\
 \tau_a = \left(\frac{1}{2} * \rho * C_{fa} * (\Delta U)^2 \right) \rightarrow
 \end{array}
 \left\{ \begin{array}{l}
 Q_{mc} = A_{mc} \frac{R_{mc}^{2/3}}{n_{mc}} S_0^{1/2} \sqrt{1 - \left(\frac{N_f \tau_a h_{fp}}{\rho g A_{mc} S_0} \right)} \\
 Q_{fp} = A_{fp} \frac{R_{fp}^{2/3}}{n_{fp}} S_0^{1/2} \sqrt{1 + \left(\frac{\tau_a h_{fp}}{\rho g A_{fp} S_0} \right)}
 \end{array} \right. \rightarrow Q_{Total} = Q_{mc} + Q_{fp}$$

Figura 14 - Procedimento de cálculo de τ_a e Caudais após o output extraído das redes neuronais.

Desta forma teremos todos os valores necessários para verificar se as redes neuronais são um bom recurso a utilizar para otimizar os cálculos e reduzir erros. Na secção seguinte será abordada a comparação dos valores calculados pelas equações 21 a 25 anteriormente apresentados, com os resultados extraídos da rede neuronal.

4.4 Desempenho dos métodos de cálculo de τ_a

4.4.1 Resultados de τ_a e C_{fa} .

Com o objetivo de comparar os valores da tensão aparente experimental recolhidos da literatura (τ_{a_exp}), com os valores calculados através das 5 equações dos autores acima apresentados ($\tau_{a_Autores}$) e com os valores obtidos através das redes neuronais (τ_{a_Redes}) foi utilizado a seguinte expressão para calcular o erro existente.

$$E = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left((\tau_a)_{exp} - (\tau_a)_{Autores_ou_Redes} \right)^2} \quad (26)$$

Em que M representa os 288 ensaios utilizados nesta comparação.

Foi utilizado o mesmo raciocínio para comparar os valores de C_{fa} e calcular o erro existente.

No Quadro 4 são apresentados os erros de τ_a e Cfa obtidos através da rede neuronal e das 5 equações dos autores bibliográficos (cf. Quadro 2).

Quadro 4 - Erros na estimativa de τ_a e Cfa

Autor	Erro τ_a (N/m ²)	Erro Cfa
Wormleaton (1982)	4,463	0,0358
Prinos and Townsend (1984)	4,400	0,0398
Wormleaton and Merret (1990)	1,774	0,0289
Christodoulou (1992)	2,460	0,0332
Chen (2016)	5,090	0,0359
Presente estudo	1,469	0,0216

Verificou-se que a rede neuronal treinada neste estudo, obteve valores de Cfa e τ_a com menores erros e conseqüentemente mais próximos da realidade.

Na Figura 15 é apresentado o ajustamento e a comparação dos valores de tensão aparente (τ_a) experimentais (eixo vertical) com os valores de τ_a , calculados pelas 5 equações dos autores bibliográficos anteriormente apresentados, ou obtidos através das redes neuronais (eixo horizontal). O ajustamento perfeito, apresentado pela linha verde, corresponde a iguais resultados de τ_a experimental e de τ_a calculado.

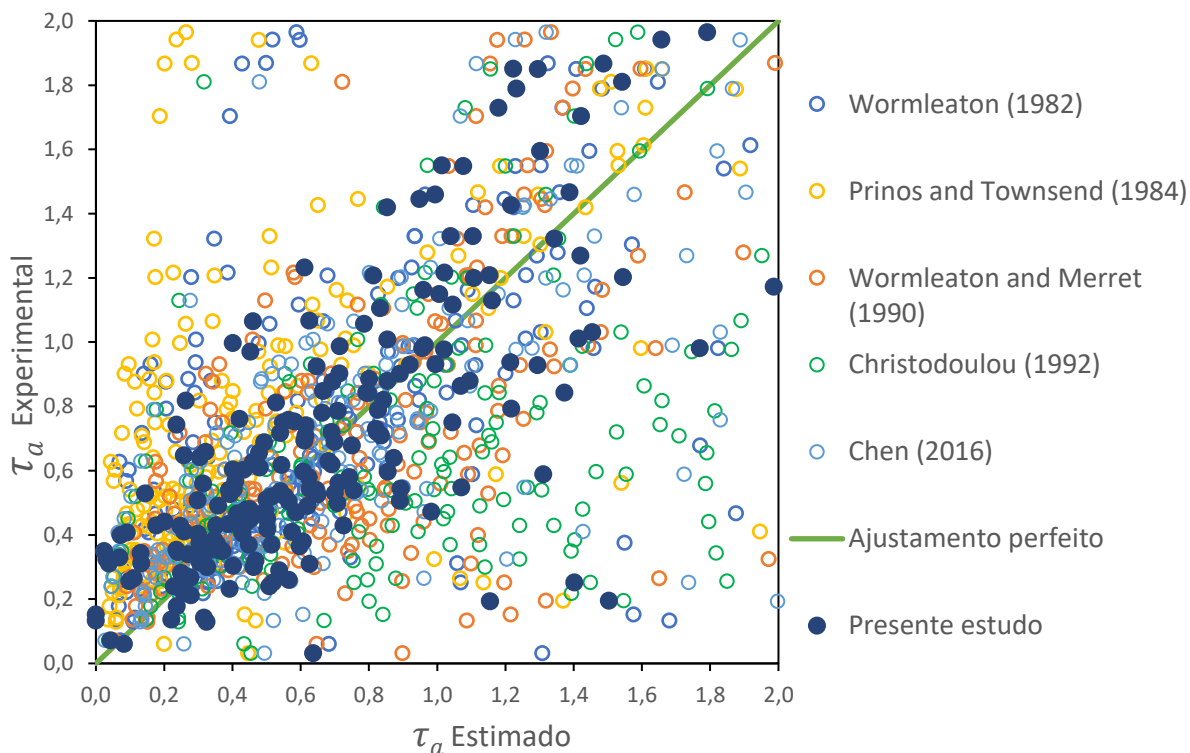


Figura 15 - Ajustamento e comparação de valores de Tensão aparente τ_a

Embora todos os ensaios apresentem valores muito distintos de um ajustamento perfeito, pode observar-se que os valores de τ_a obtidos através das redes neuronais são os que têm uma maior proximidade a esse ajustamento, tal como se concluiu anteriormente com a tabela de erros. No entanto neste gráfico estão representados os 288 ensaios com valores experimentais de τ_a , que foram os mesmos utilizados para treinar a rede neuronal. Impossibilitando a comparação de outros valores de τ_a experimentais com os estimados pela rede neuronal. Contudo no caso dos caudais já se pode fazer essa comparação e análise visto que se tem 588 ensaios sendo possível retirar os 288 ensaios utilizados para treinar a rede neuronal e consequentemente comparar os restantes 300 ensaios ($588-288 = 300$ ensaios).

4.4.2 Resultados de caudal

Através do mesmo raciocínio utilizado anteriormente para comparar os erros da tensão de corte aparente experimental ($\tau_{a_experimental}$), com os valores calculados, foram agora comparados os valores dos caudais. Para isso foram utilizados todos os ensaios, visto que estamos a comparar o valor do caudal total; M neste caso será igual a 588, dados de teste.

$$E = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left((Q_{Total})_{exp} - (Q_{Total})_{Autores/redes} \right)^2} \quad (27)$$

Neste sentido, e tendo como referência o Quadro 5 apresentado em baixo, podemos verificar que as redes neuronais (presente estudo), apresentam o menor erro de caudal (Q) de modo muito significativo em comparação com os restantes, sendo de referir o valor contrastante de Prinos e Townsend (1984), cujo erro corresponde a 18,61, cerca de 14 vezes superior ao presente estudo. Na comparação dos erros referentes às redes neuronais, foram utilizados apenas os dados que não foram utilizados no treino da mesma, ou seja, os 300 ensaios sem valores de τ_a .

Quadro 5 - Erros na estimativa dos caudais

Referência	Erro Q (l/s)
Wormleaton (1982)	18,0
Prinos and Townsend (1984)	18,6
Wormleaton and Merret (1990)	5,0
Christodoulou (1992)	7,6
Chen (2016)	7,6
Redes Neuronais	1,3

De seguida, com o auxílio a gráficos, comparam-se graficamente os resultados das 5 equações dos autores bibliográficos e das redes neuronais (presente estudo) e comparou-se com o ajustamento perfeito apresentado pela reta a laranja, Figura 16. No gráfico (f) estão novamente representados somente os dados que não foram utilizados no treino da rede neuronal.

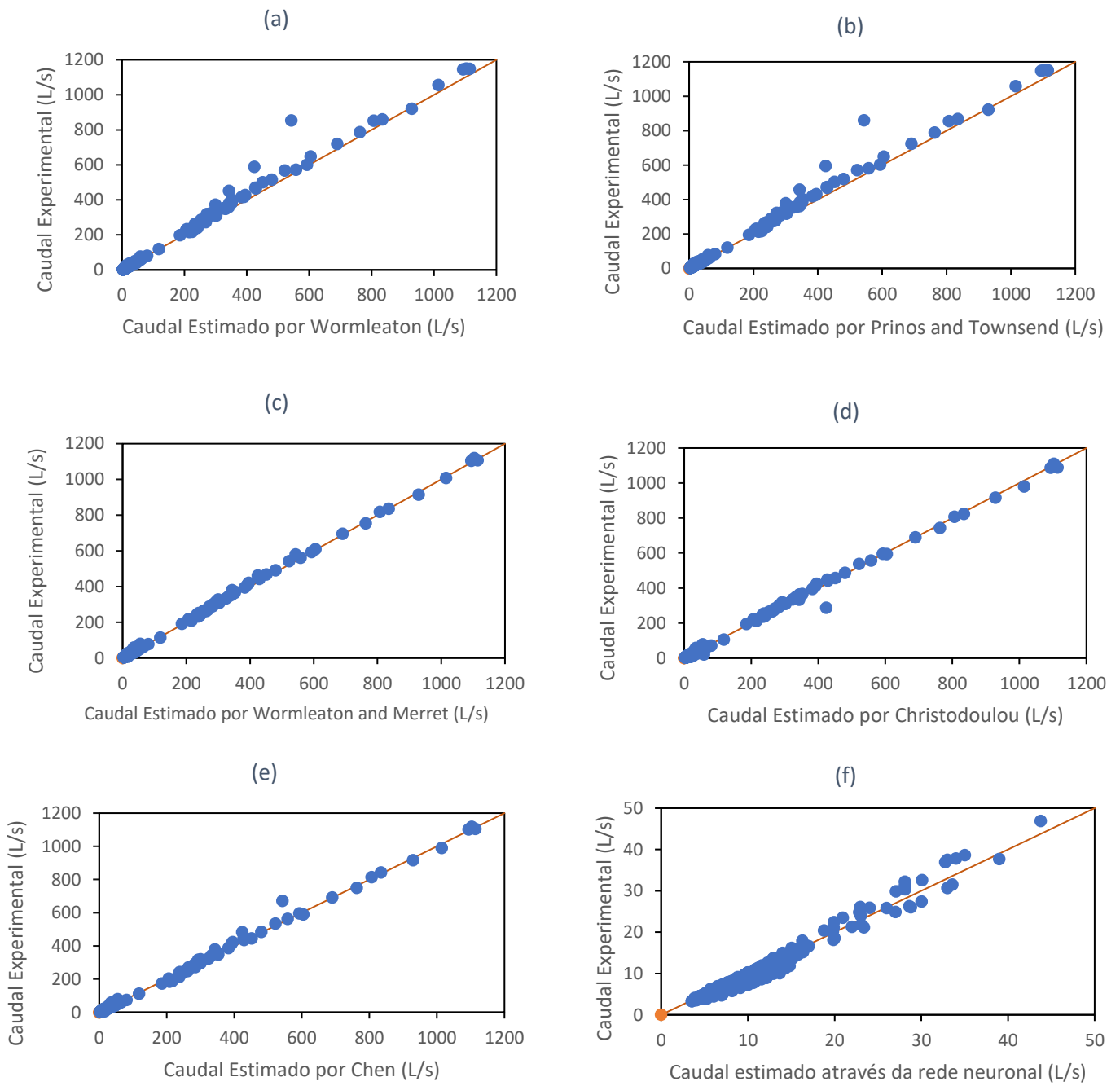


Figura 16 - comparação do caudal experimental com o estimado pelos diferentes autores (a,b,c,d,e) e pela rede neuronal (f)

COEFICIENTE DE CORIOLIS E DE BOUSSINESQ EM CANAIS DE SECÇÃO COMPOSTA

5.1 Cálculo dos coeficientes de Coriolis e de Boussinesq

Tal como referido na revisão bibliográfica os coeficientes de Coriolis e de Boussinesq são utilizados para facilitar o cálculo do caudal total escoado, utilizando as velocidades médias em cada subsecção ao invés de utilizar as componentes pontuais da velocidade ao longo da secção do canal.

Na Figura 17 é apresentada a secção transversal de um canal de secção composta simétrico (a) e assimétrico (b), dividido respetivamente em três ou duas subsecções, leitos de cheia e canal principal. Como a velocidade do caudal nos leitos de cheia é normalmente muito baixa em comparação com a do canal principal e a variação da velocidade em cada subsecção é relativamente reduzida, procurou-se, numa primeira fase, analisar os valores obtidos caso se assumisse uniforme a velocidade ao longo de cada subsecção. Neste caso, a integração em várias parcelas nas equações 16 e 17 (anteriormente apresentadas) poderiam ser substituídas pelo somatório apresentado nas equações 28 e 29.

$$\alpha = \frac{V_1^3 A_1 + V_2^3 A_2 + V_3^3 A_3}{V_m^3 (A_1 + A_2 + A_3)} \quad (28)$$

$$\beta = \frac{V_1^2 A_1 + V_2^2 A_2 + V_3^2 A_3}{V_m^2 (A_1 + A_2 + A_3)} \quad (29)$$

onde V_m é a velocidade média em todo o canal; $V_m = Q_t/A_t$

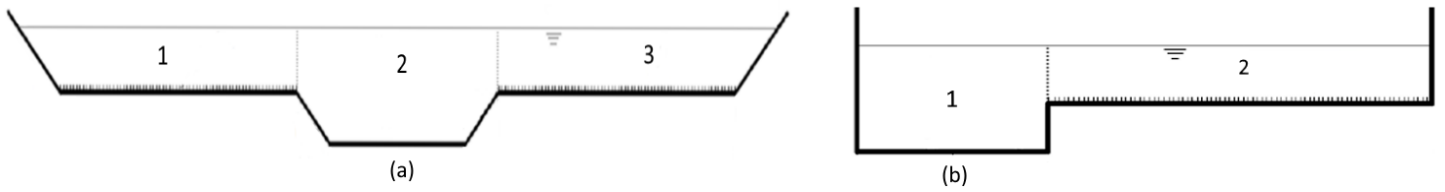


Figura 17 - Geometria do canal de secção composta simétrico (a) e assimétrico (b)

Para tal, utilizaram-se 9 ensaios realizados por Fernandes et al. (2015), pois estão disponíveis tanto as medições de velocidades pontuais em vários pontos da secção transversal como os valores dos caudais divididos em cada subsecção. Calculou-se de seguida para estes 9 ensaios (envolvendo diferentes alturas de escoamento e rugosidades) os valores de α e β , comparando-se com os resultados obtidos através das equações simplificadas (28 e 29). Na secção seguinte são apresentados os resultados e a discussão desta alternativa.

A campanha experimental foi realizada na instalação de secção composta do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Essa instalação consiste num canal simétrico com 10 m de comprimento, 2 m de largura e que compreende um leito principal trapezoidal central e dois leitos de cheias laterais, conforme Figura 18.

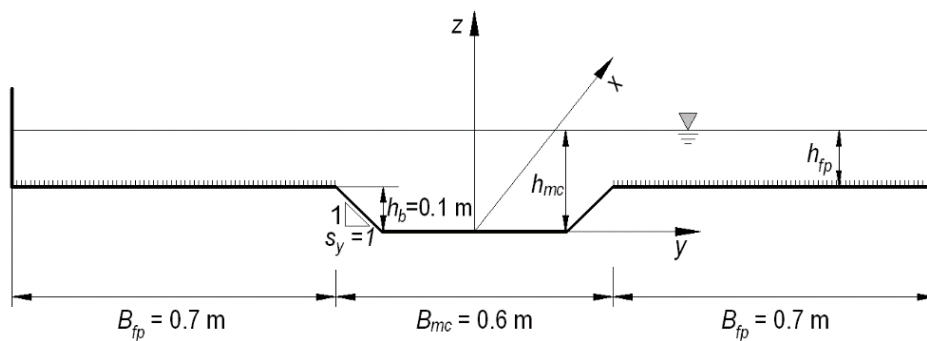


Figura 18 - Secção transversal do canal de secção composta.

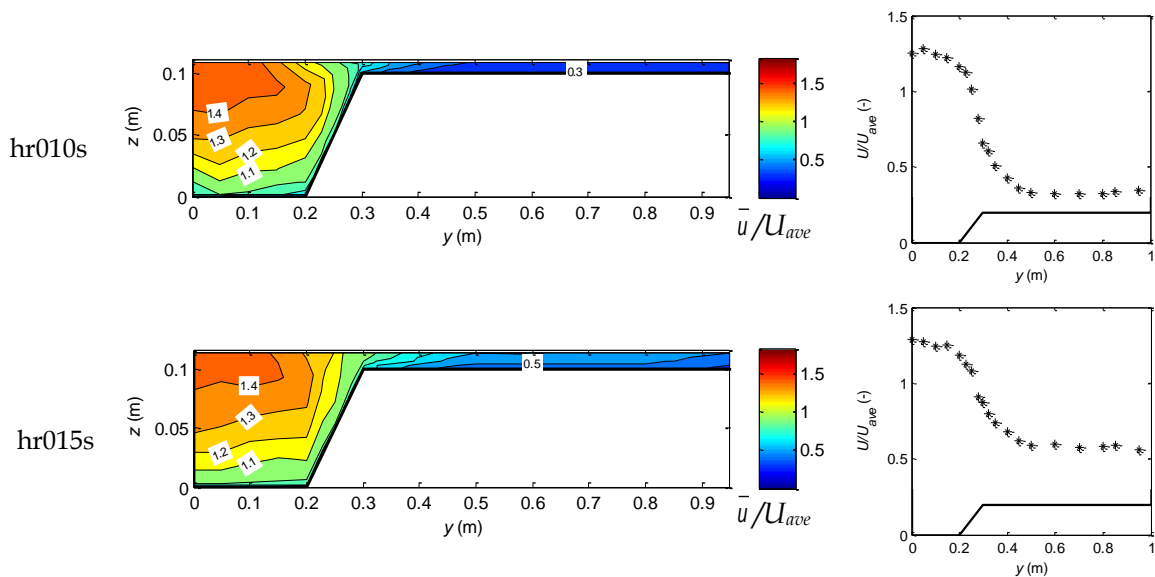
Neste canal foram realizados os ensaios apresentados no Quadro 6.

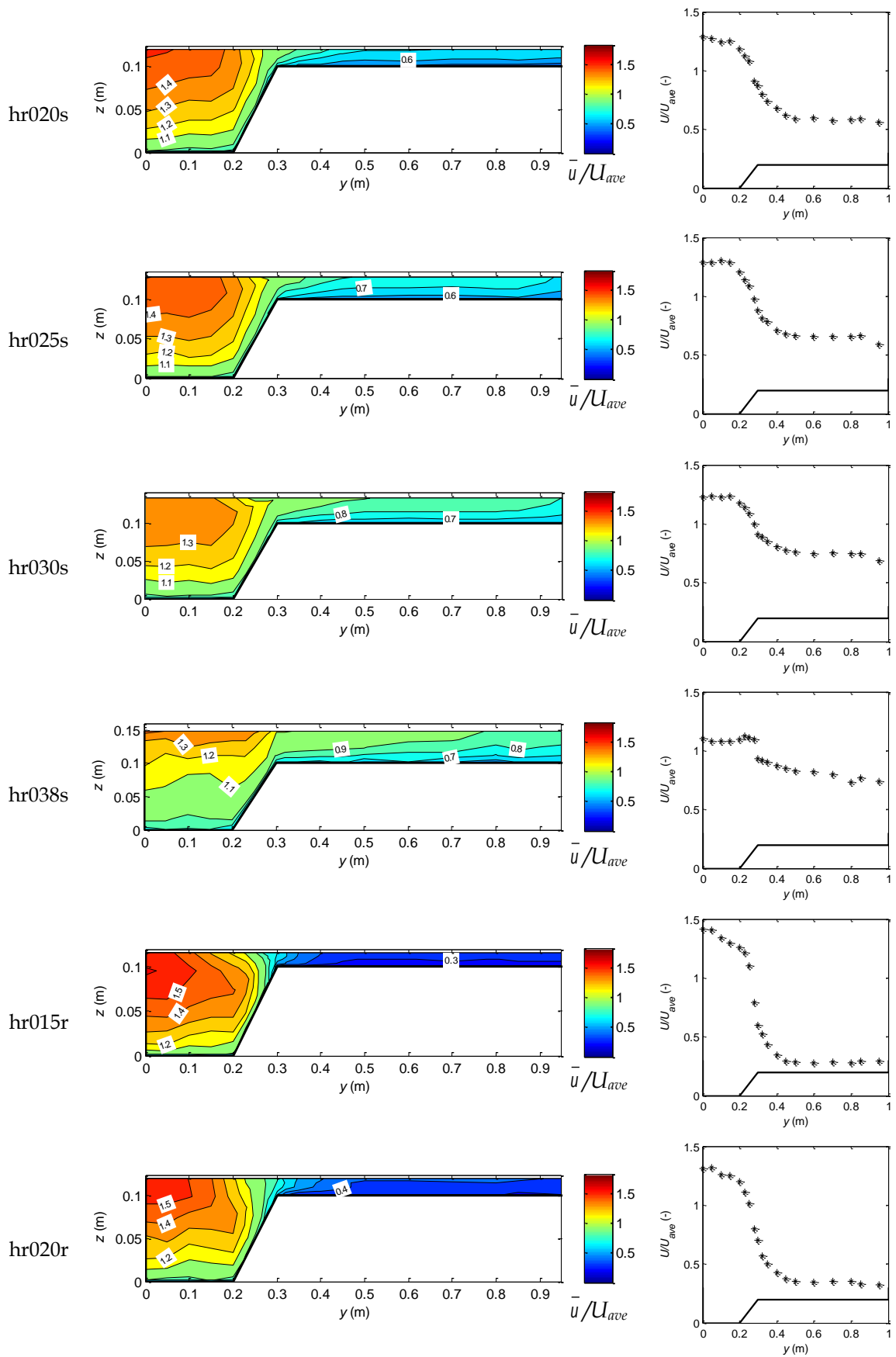
Quadro 6 - Condições experimentais.

Referência do escoamento	Rugosidade dos leitos de cheia	h_{mc} (m)	H_r (-)	Q_{mc} (l.s ⁻¹)	Q_{fp} (l.s ⁻¹)	Fr_{mc}	Fr_{fp}	Re_{mc} (x10 ⁵)	Re_{fp} (x10 ⁵)
hr10s	Liso	0.1119	0.11	34.9	3.3	0.67	0.58	2.02	0.09
hr15s	Liso	0.1172	0.15	38.8	6	0.69	0.61	2.25	0.17
hr20s	Liso	0.1220	0.19	42.2	11.2	0.70	0.78	2.45	0.31
hr25s	Liso	0.1309	0.24	46.7	18.6	0.69	0.80	2.71	0.50
hr30s	Liso	0.1402	0.30	54.2	26.4	0.70	0.76	3.17	0.66
hr38s	Liso	0.1600	0.38	67.8	50.5	0.71	0.82	3.93	1.32
hr15r	Rugoso	0.1192	0.15	35.1	3.7	0.61	0.32	2.04	0.10
hr20r	Rugoso	0.1244	0.21	39.3	7.3	0.63	0.44	2.28	0.20
hr30r	Rugoso	0.1450	0.31	42.3	16.6	0.52	0.41	2.45	0.44

Nos ensaios apresentados destacam-se 6 ensaios com diferentes alturas relativas com o fundo do canal original (em cimento alisado) e outros 3 ensaios com os leitos de cheia cobertos por relva sintética.

Em Fernandes et al. (2015) são apresentadas as medições de velocidades em meia secção (foi considerado um escoamento com simetria em relação ao eixo longitudinal). Os resultados das velocidades medidas são apresentados na Figura 19.





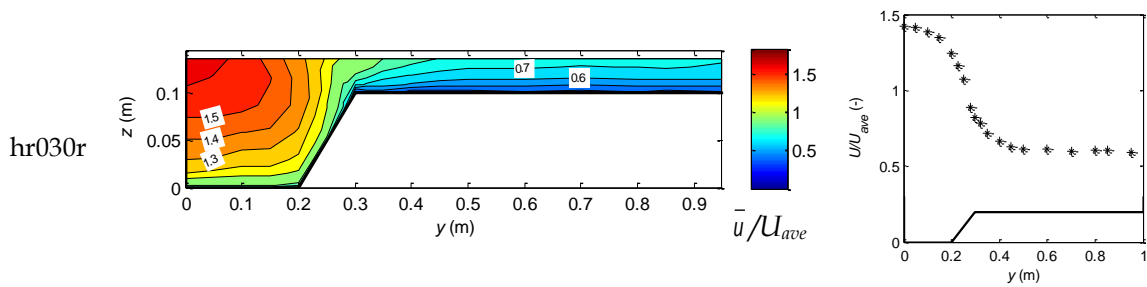


Figura 19 - Distribuição de velocidades longitudinais na secção transversal (coluna da esquerda) e velocidades longitudinais médias na altura (coluna da direita) (adaptada de Fernandes et al. 2022).

Tendo em conta as medições apresentadas foram calculados os coeficientes de energia e de quantidade de movimento através de:

- Equações 16 e 17, tendo em conta os cerca de cerca de 120 pontos de medição de velocidade medidos em cada ensaio;
- Equações 28 e 29, tendo em conta apenas os caudais em cada subsecção.

A comparação dos resultados obtidos é apresentada na Figura 20.

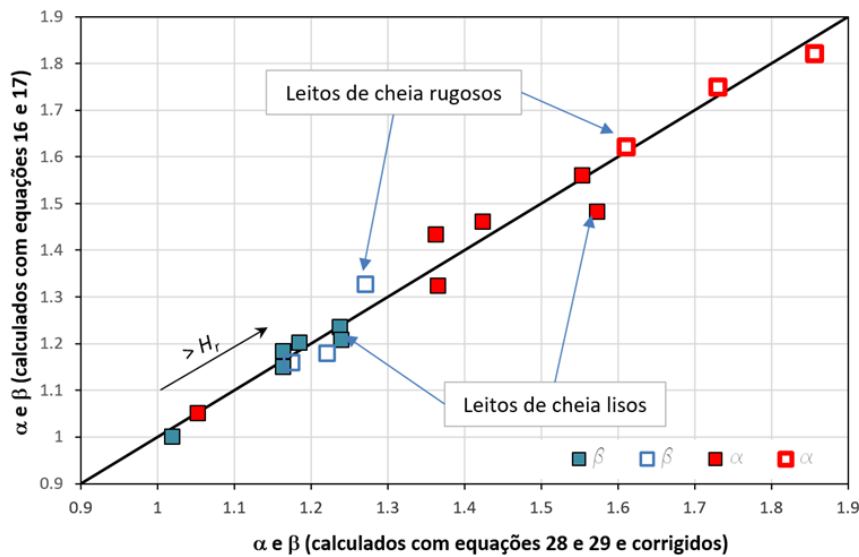


Figura 20 - Comparação para os resultados do coeficiente de energia e de quantidade de movimento calculados pelas Equações 16/17 e 28/29.

Foi ainda decidido efetuar a correcção dos coeficientes calculados com os caudais da seguinte forma:

- Para alturas relativas inferiores ou iguais a 0.3 - Correcção do coeficiente α igual a 1.21 para leitos lisos e rugosos e correcção do coeficiente β igual a 1.11 para leitos lisos e 1.05 para leitos rugosos
- Para alturas relativas superiores a 0.3 - Não efetuar qualquer correcção dos coeficientes

Posteriormente foi adotado um raciocínio similar ao do estudo da τ_a e C_{fa} , introduzindo-se, nas redes neuronais (*neural fitting app*), um input de cinco colunas de parâmetros adimensionais: $\frac{B}{b_{mc}}$; $\frac{(H_{mc}-h_b)}{H_{mc}}$; $\frac{h_b}{b_{mc}}$; n_r ; N_f e uma coluna de target com os valores dos coeficientes de energia (α) e de quantidade de movimento (β) calculados através das equações 28 e 29 respectivamente. De seguida, com o objetivo de compreender se existe uma grande discrepância de resultados entre vários treinos foram realizados 3 treinos da rede neuronal para α e β , num total de 6 treinos, e foram calculados os erros correspondentes.

5.2 Resultados obtidos

5.2.1 Cálculo de α e β através de Redes Neuronais

Para estudar os resultados dos 6 treinos, foram utilizadas as equações 30 e 31 para calcular o erro existente entre os resultados obtidos através das redes neuronais e pelas equações 28 e 29 (corrigidas de acordo com o referido no final da secção anterior) que admitimos obterem valores próximos da realidade.

$$E = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M ((\alpha)_{Calculado} - (\alpha)_{Redes})^2} \quad (30)$$

$$E (\%) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{(\alpha)_{Calculado} - (\alpha)_{Redes}}{(\alpha)_{Calculado}} * 100 \quad (31)$$

No Quadro 7 são apresentados os respetivos valores dos erros para α e β , e nas figuras 21 e 22 a comparação gráfica dos valores obtidos através das redes neuronais e dos valores calculados pelas equações 28 e 29.

Quadro 7 - Erros de α e β

	α		β	
	Erro	Erro (%)	Erro	Erro (%)
Treino 1	0,062	3,26	0,027	1,74
Treino 2	0,057	3,81	0,021	1,22
Treino 3	0,075	4,03	0,023	1,45

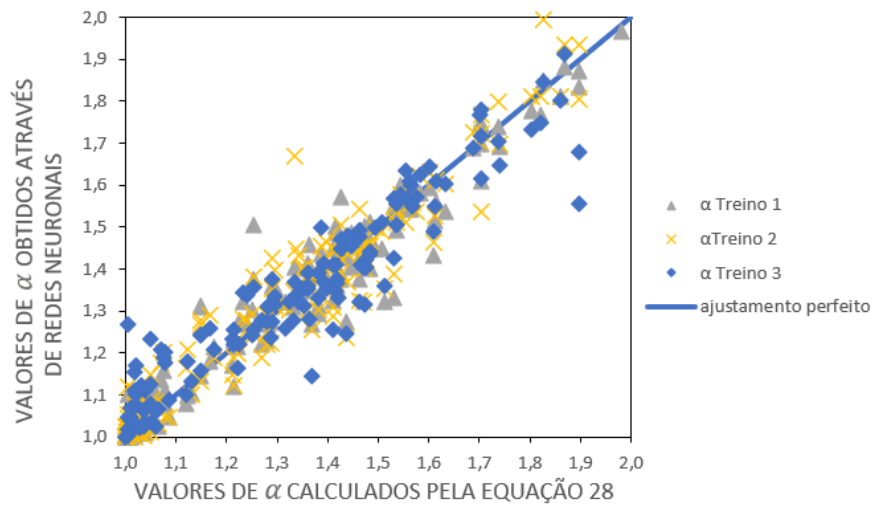


Figura 21 - Comparação dos resultados de α , realizados em 3 treinos

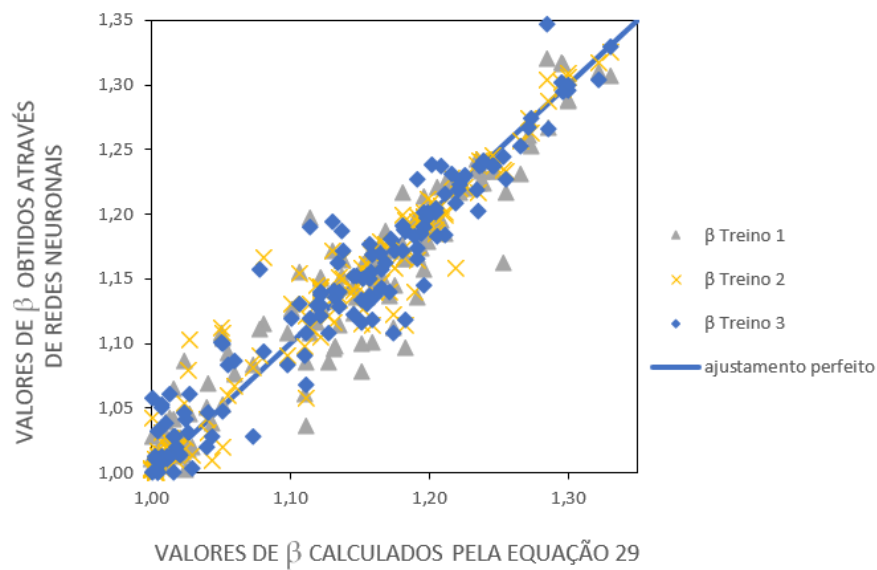


Figura 22 - Comparação dos resultados de β , realizados em 3 treinos

Diversos autores estudaram os valores dos coeficientes de correção de energia e de quantidade para condições similares às abordadas no presente trabalho. No Quadro 8 apresenta-se um resumo dos coeficientes de correção α e β relativamente aos ensaios realizados em canais com diferentes geometrias e condições de vegetação. Algumas das informações não foram encontradas na literatura e estas são assinaladas com um N/D que representa "não disponível".

Quadro 8 - Principais resultados de α e β obtidos por diferentes autores, através de ensaios realizados em canais com diferentes geometrias e condições de vegetação

Autor	Forma do canal	Vegetação	Principais resultados
Kolupaila (1956)	Rios inundados	N/D	• Os valores médios de α e β foram recomendados como 1,75 e 1,25 respectivamente.
Li e Hager (1991)	N/D	N/D	• Os valores de α e β dependem significativamente do coeficiente de rugosidade Manning.
Al-Khatib e Gögüs (1999)	Canal composto simétrico	Sem vegetação	• Os valores de α e β não variam significativamente com o aumento da altura do canal principal.
Fenton (2005)	Tubos e canais abertos	N/D	• Os coeficientes α e β foram considerados defeituosos, pois negligenciam os efeitos da turbulência e correntes secundárias.
Seckin et al. (2004, 2009)	Canal composto simétrico	Sem vegetação	• Os valores médios de α e β foram recomendados como 1,094 e 1,034 respectivamente.
Keshavarzi et al. (2010)	Canal composto simétrico	Sem vegetação	• Os valores de α e β diminuíram significativamente com a instalação da palheta submersa no interior do canal principal.
Mohanty et al. (2012)	Canal composto	Sem vegetação	• A largura da planície de inundação afeta fortemente os valores de α e β .
Luo (2012)	Canal composto simétrico	Sem vegetação	• Foi apresentada uma série de equações para a determinação de α e β .
Al-Khatib (2013)	Canal composto assimétrico	Sem vegetação	• Os valores médios de α e β foram considerados 1,15 e 1,12 respectivamente.
Kubrak et al. (2015)	Canal Retangular Simples	Alguma vegetação	• Os valores de α e β podem atingir valores de 2,8 e 1,5 respectivamente.
Parsaei e Haghghiabi (2016)	Canal composto simétrico	Sem vegetação	• Os valores de α e β podem atingir valores de 2,2 e 1,4 respectivamente.
Blalock e Sturm (1983)	Canal simples	N/D	• Os valores médios de α e β foram recomendados como 1,06 e 1,02
Basak e Alauddin (2010)	canal convergente simples	Sem vegetação	• Valores médios de α na entrada e na saída considerados de 1,015 e 1,39 respectivamente.
Hamidifar et al. (2016)	Canal composto assimétrico	Sem vegetação	• Os valores médios de α e β foram considerados 1,28 e 1,10 respectivamente

5.2.1 Variação de α e β com altura relativa

Keshavarzi e Hamidifar (2018) propuseram a relação dos coeficientes com a altura relativa apresentando as equações 32 e 33:

$$\alpha = \frac{1}{-40,14 + 41,21 * H_r^{0,00342}} \quad (32)$$

$$\beta = \frac{1}{-116,31 + 117,34 * H_r^{0,00049}} \quad (33)$$

Na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** relaciona-se a altura relativa com os coeficientes α e β obtidos através de redes neurais para vários ensaios de oito diferentes autores.

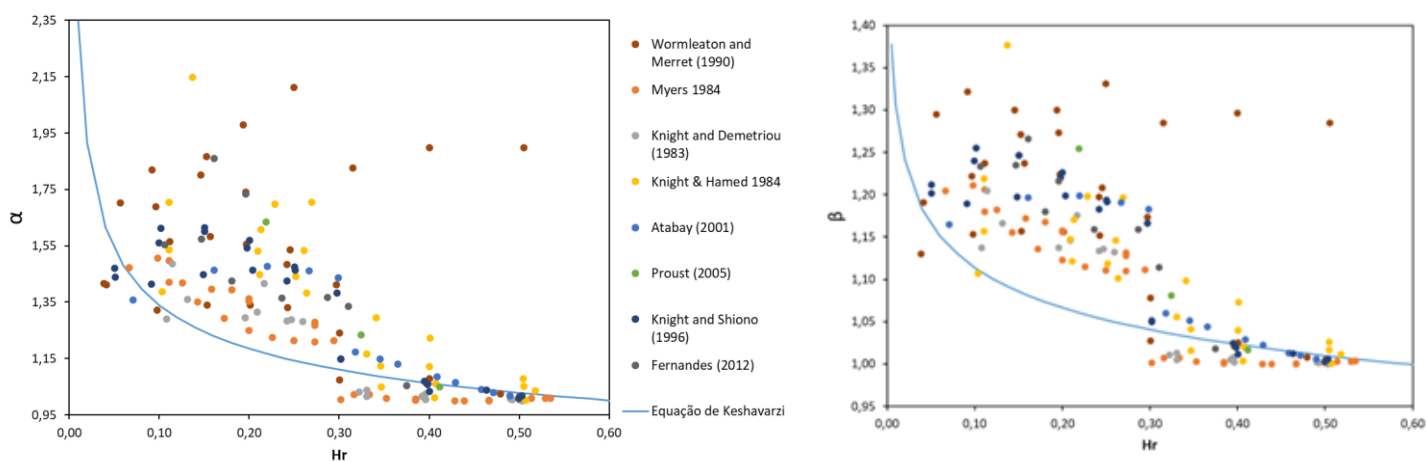


Figura 23 - Variações dos coeficientes α e β em relação à altura relativa

De uma forma geral verifica-se que se a altura relativa (H_r) do canal aumentar, os coeficientes α e β diminuem. Isto está relacionado com o facto de que à medida que a H_r aumenta a interação entre os escoamentos no canal principal e nas planícies de inundação diminui. Logo o comportamento hidráulico do canal composto aproxima-se de um canal simples.

As relações definidas por Keshavarzi e Hamidifar (2018) seguem este padrão, mas tendo sido obtidas para condições particulares (parâmetros geométricos e de rugosidade constantes), não conseguem apanhar todos os fatores que influenciam a variação dos coeficientes,

como é o caso de Wormleaton e Merret (1990) que não apresenta esta relação. Na secção seguinte é analisada a variação de α e β tendo em conta determinadas características e proporções geométricas dos canais.

5.2.2 Variação de α e β com a rugosidade dos leitos principal e de cheias

Para analisar a variação dos coeficientes α e β com a rugosidade dos leitos principal e de cheias, foram selecionados ensaios em que a proporção da largura (*width ratio* - B/b_{mc}) e a proporção de aspeto do canal principal (*Aspect ratio of the main channel* - hb/b_{mc}) eram constantes. Nas figuras 24, 25, 26 e 27 observou-se a variação dos valores de α e β , apresentados no eixo das ordenadas, em relação à altura relativa (eixo das abcissas) e divididos em intervalos de valores de rugosidade, nr .

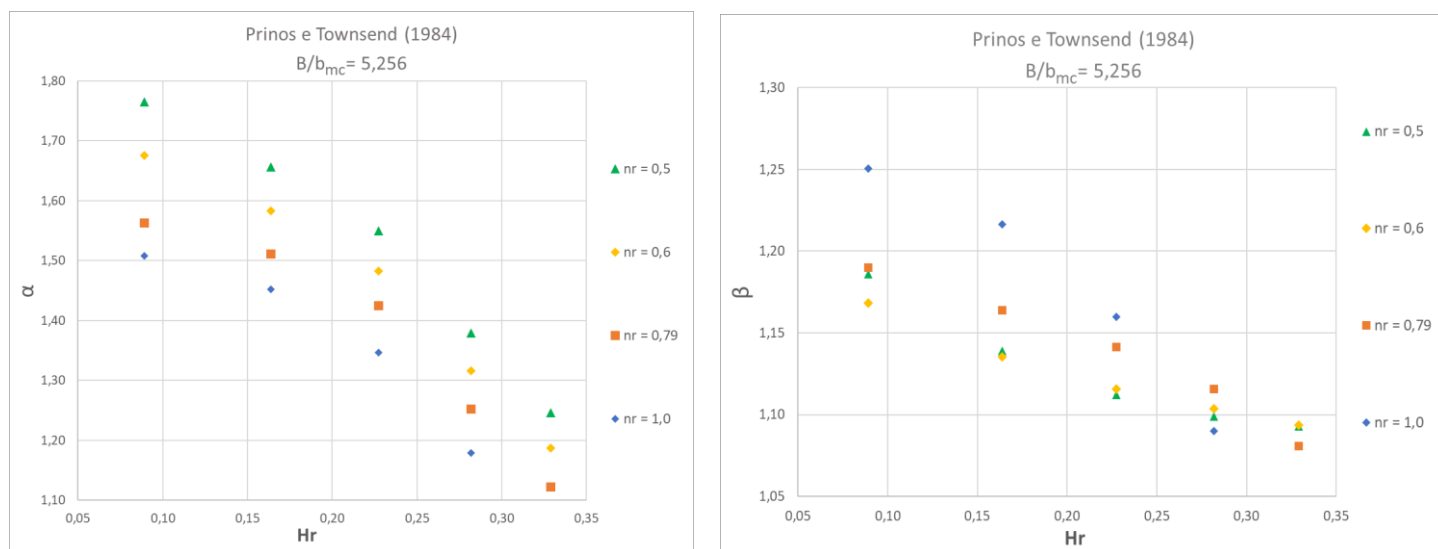


Figura 24 - Variação de α e β com a altura relativa e a rugosidade do canal para 20 ensaios experimentais realizados por Prinos e Townsend (1984). $B/b_{mc} = 5,256$

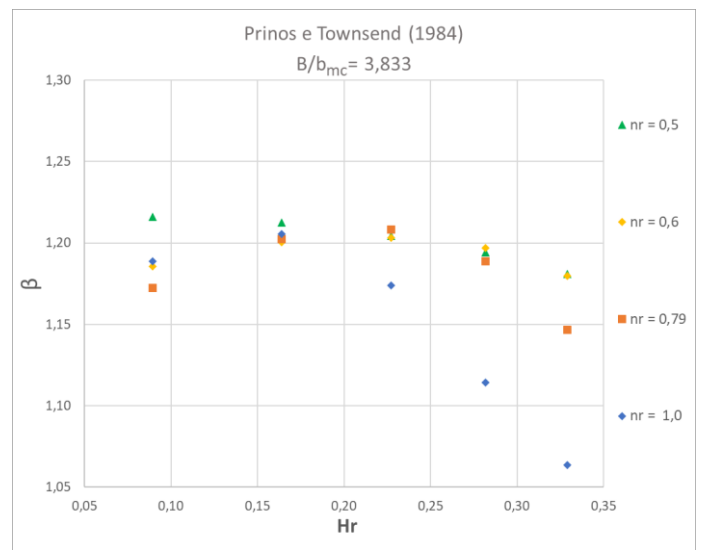
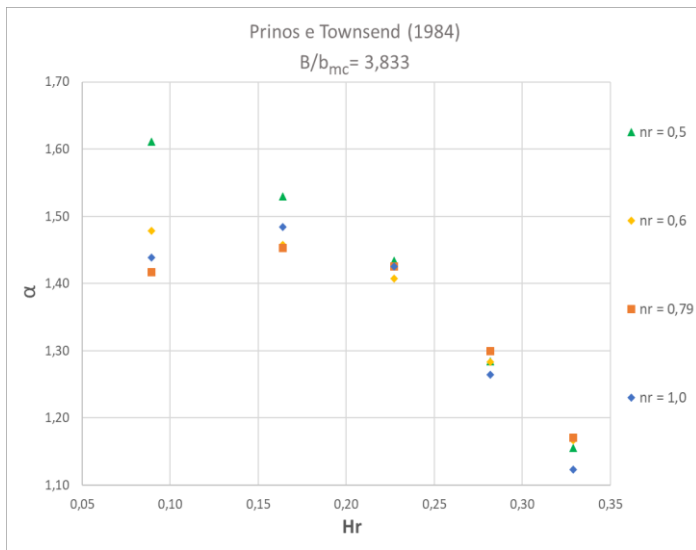


Figura 25- Variação de α e β com a altura relativa e a rugosidade do canal para 20 ensaios experimentais realizados por Prinos e Townsend (1984). $B/b_{mc} = 3,833$

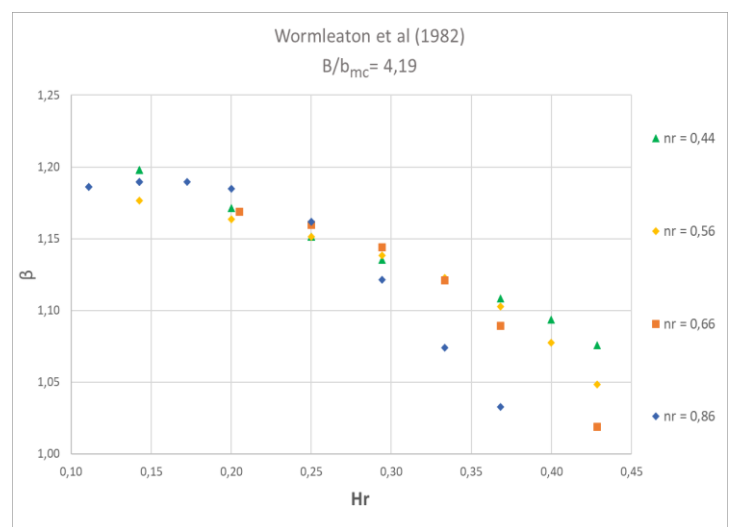
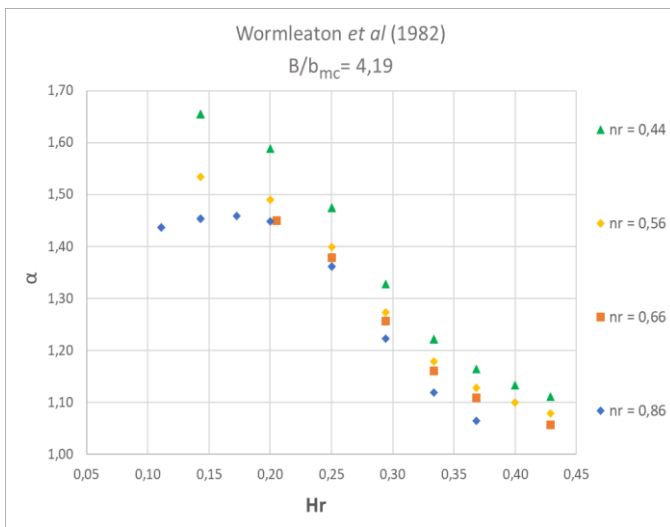


Figura 26 - Variação de α e β com a altura relativa e a rugosidade do canal para 40 ensaios experimentais realizados por Wormleaton et al (1982). $B/b_{mc} = 4,19$

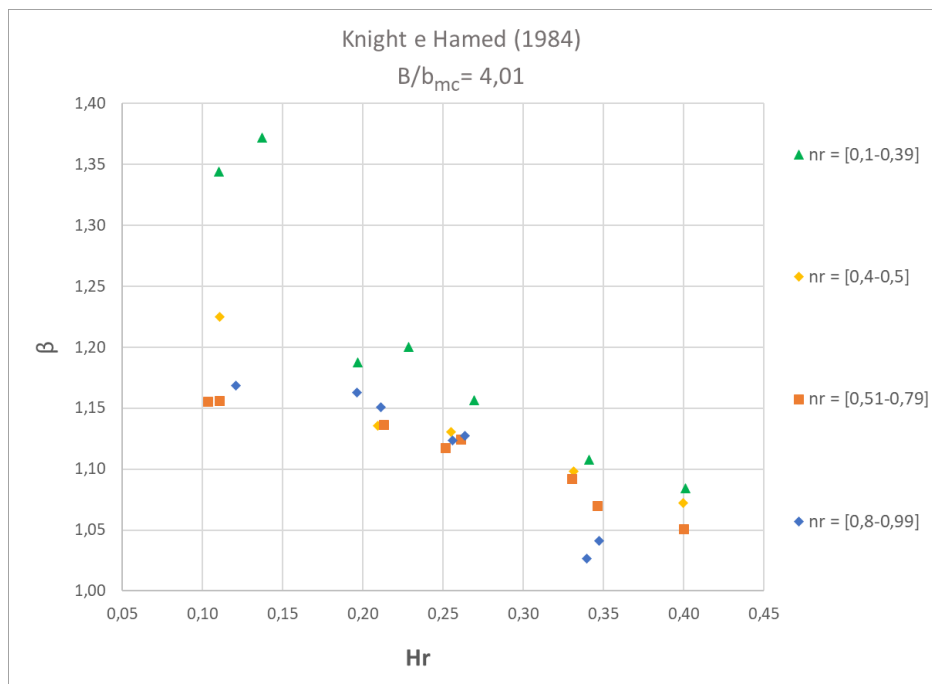
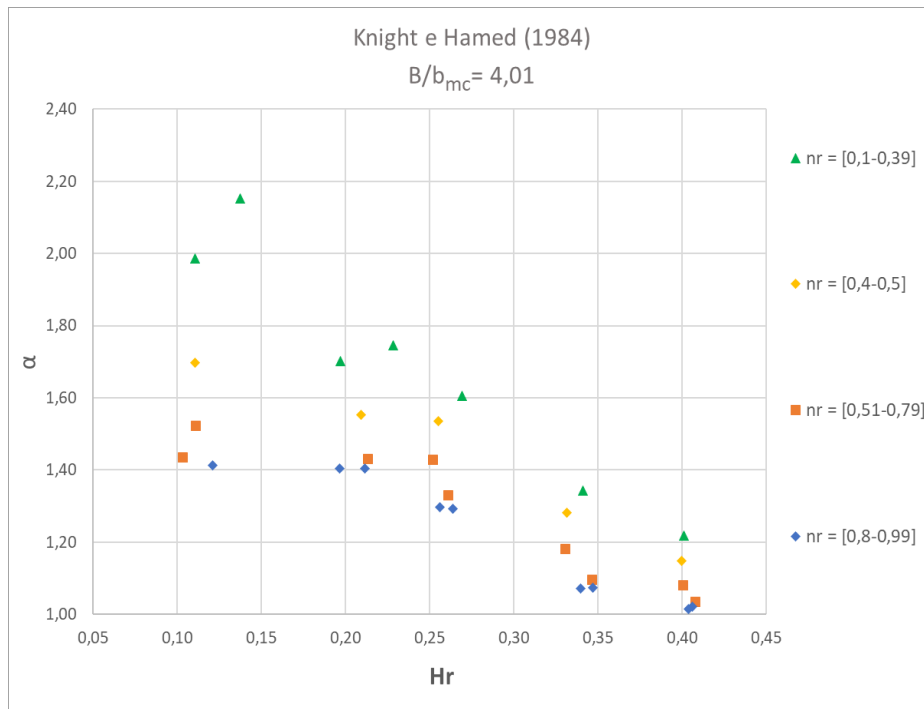


Figura 27 - Variação de α e β com a altura relativa e a rugosidade do canal para 36 ensaios experimentais realizados por Knight e Hamed (1984). B/b_{mc} = 4,01

Da análise das figuras conclui-se que quanto maior densidade de vegetação (ou menor *Roughness ratio*), maiores serão os valores dos coeficientes α e β . Este facto deve-se principalmente à menor uniformidade de velocidades entre os escoamentos nos dois leitos. Com um aumento da altura de escoamento (e conseqüentemente da altura relativa), verifica-se que a influência da diferença de rugosidade é menos significativa, tornando-se, em alguns casos, praticamente irrelevante.

Em alguns casos de estudo estas conclusões não são tão evidentes para o coeficiente β . Isto pode dever-se ao facto de se dispor de poucos ensaios experimentais (amostra reduzida).

Para os ensaios de Prinos e Townsend (1984), ao diminuir a proporção da largura (B/b_{mc}) de 5,256 para 3,833, observou-se que a razão de rugosidade não é tao relevante, concluindo que quanto menor for a proporção B/b_{mc} , menor importância tem a razão de rugosidade, obtendo-se valores de α e β muito semelhantes para valores de rugosidade (nr) muito diferentes.

5.2.3 Variação de α e β com a proporção da largura B/b_{mc} (*width ratio*)

Para analisar a variação de α e β com a proporção da largura, B/b_{mc} (*width ratio*), foram selecionados ensaios em que se manteve constante a razão de rugosidade (n_r) e a proporção de aspecto do canal principal, hb/b_{mc} (*Aspect ratio of the main channel*). Nas figuras 28, 29, 30 e 31 observa-se a variação dos valores de α e β , apresentados no eixo das ordenadas, em relação à altura relativa, eixo das abscissas; e divididos em intervalos de valores de proporção da largura, B/b_{mc} .

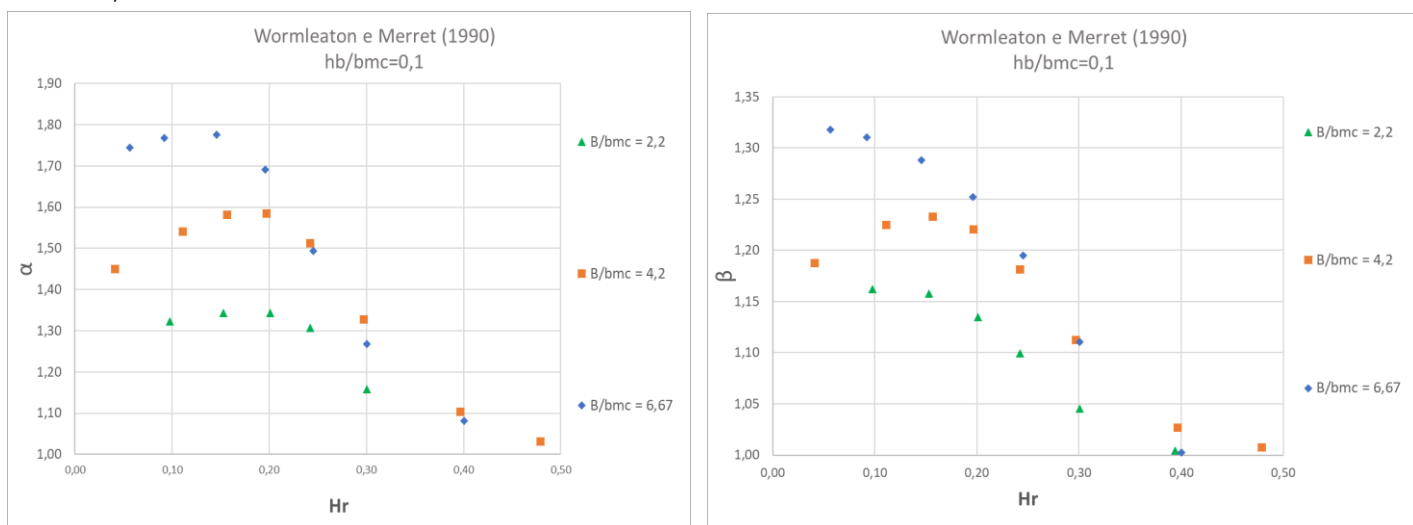


Figura 28 - Variação de α e β com a altura relativa e a proporção da largura B/b_{mc} para 22 ensaios experimentais realizados por Wormleaton e Merret (1990). $hb/b_{mc}=0,1$

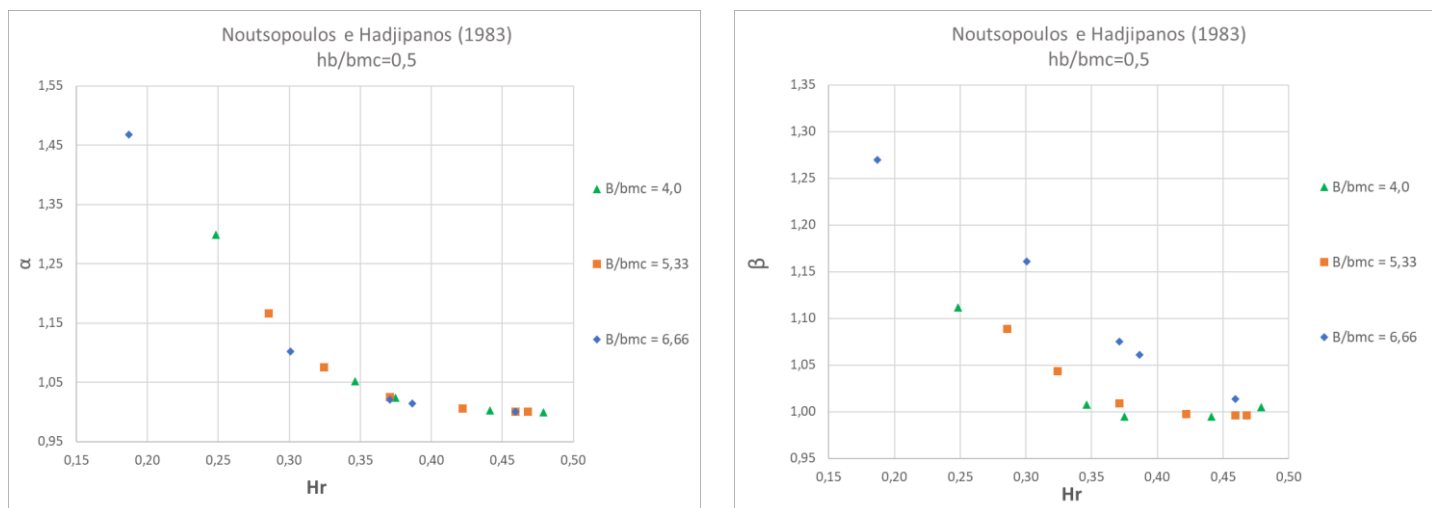


Figura 29 - Variação de α e β com a altura relativa e a proporção da largura B/b_{mc} para 16 ensaios experimentais realizados por Noutsopoulos e Hadjipanos (1983). $hb/b_{mc}=0,5$

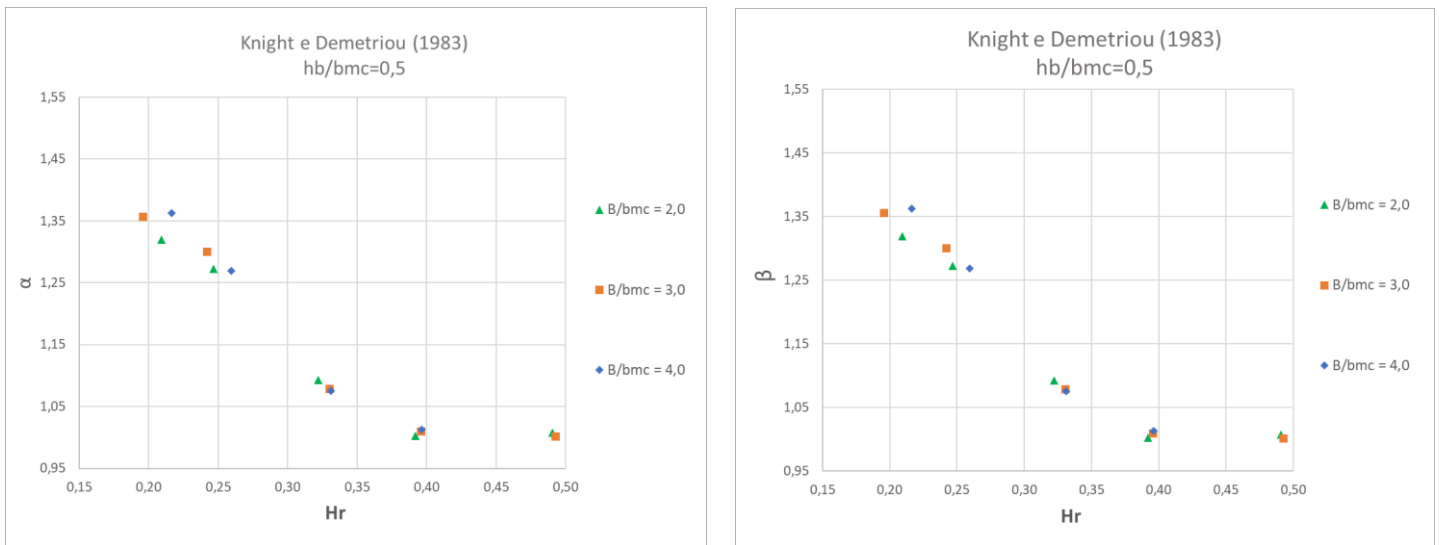


Figura 30 - Variação de α e β com a altura relativa e a proporção da largura B/b_{mc} para 18 ensaios experimentais realizados por Knight e Demetriou (1983). $hb/b_{mc}=0,5$

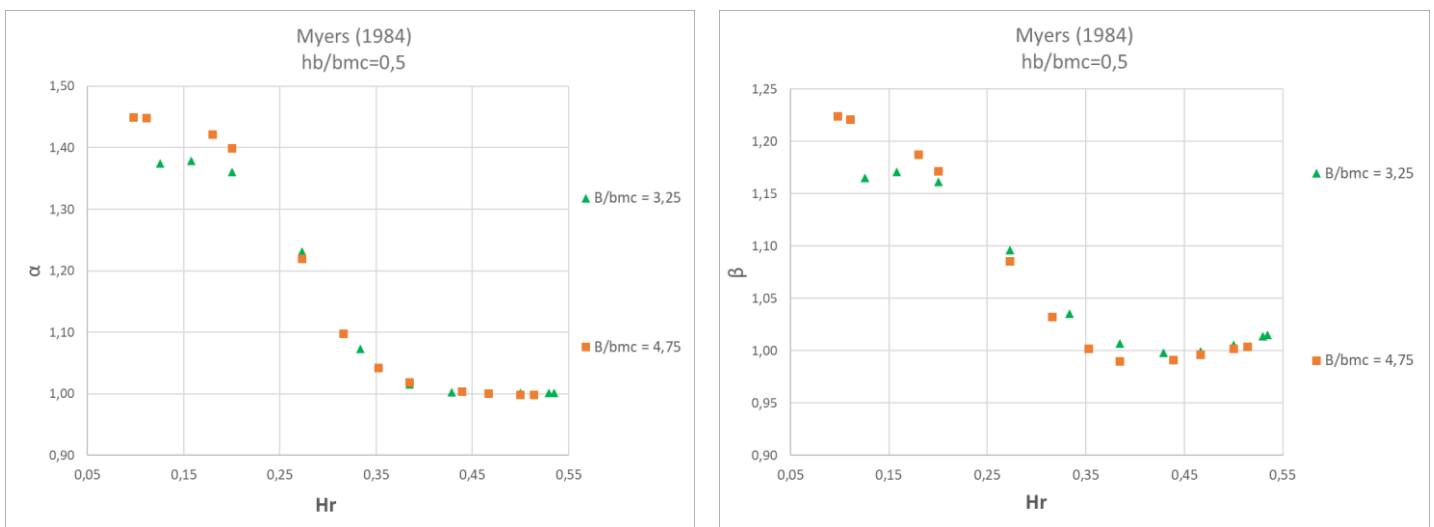


Figura 31 - Variação de α e β com a altura relativa e a proporção da largura B/b_{mc} para 23 ensaios experimentais realizados por Myers (1984). $hb/b_{mc}=0,5$

Através da análise da Figura 28 conclui-se que quanto maior a proporção da largura B/b_{mc} , maiores serão os valores dos coeficientes α e β . No entanto a partir de valores de altura relativa (H_r) igual a 0,25 esta relação tende a diminuir, ou seja, a proporção da largura não é tao relevante na análise da variação de α e β .

Mais uma vez é importante evidenciar a diminuição de valores de α e β com o aumento da altura relativa, tendo em conta qualquer relação de rugosidade ou de largura do canal.

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

Conforme evidenciado pela presente dissertação, os escoamentos em seção composta podem ser caracterizados por uma série de mecanismos complexos, incluindo a influência da rugosidade da planície de inundação e do regime de escoamento. Neste trabalho foram realizadas duas análises complementares: a avaliação e cálculo da tensão de corte aparente com o auxílio de redes neurais (comparando medições experimentais com valores teóricos) e a estimativa dos coeficientes de Coriolis e Boussinesq em canais de seção composta.

As conclusões existentes sobre a avaliação e cálculo da tensão de corte aparente com auxílio de redes neurais indicam que esta abordagem pode resultar em melhorias na estimativa da capacidade de vazão em canais de seção composta. As redes neurais revelaram-se como uma ferramenta poderosa para modelar e prever o comportamento dos escoamentos em seção composta, permitindo uma melhor compreensão dos mecanismos envolvidos. Verificou-se que a rede neuronal treinada neste estudo, obteve valores de C_{fi} e τ_a , com menores erros e, conseqüentemente, mais próximos da realidade.

No que diz respeito à estimativa dos coeficientes de Coriolis e Boussinesq em canais de seção composta existentes, os resultados obtidos sugerem que esses coeficientes são influenciados pelos parâmetros geométricos e hidrodinâmicos do canal, tais como a rugosidade do leito, a proporção de aspeito do canal principal (*Aspect ratio of the main channel*) e a velocidade do escoamento. A estimativa precisa desses coeficientes é importante para a estimativa da dinâmica dos escoamentos em seção composta. Além disso, a estimativa destes coeficientes pode ser realizada através de modelos numéricos e experimentais, com boa concordância entre os valores estimados e os medidos experimentalmente.

Pode concluir-se que, quanto maior a rugosidade do leito de cheias (por exemplo por um aumento da densidade de vegetação), maiores serão os valores dos coeficientes α e β . Contudo, à medida que a altura relativa aumenta esta relação tende a diminuir, e a razão de rugosidade não é tao relevante. Além disso, pode concluir-se que, quanto maior a proporção da largura B/bmc , maiores serão os valores dos coeficientes α e β . Contudo, a partir de valores de altura relativa (Hr) igual a 0,25, esta relação tende a diminuir, ou seja, a proporção da largura não é tao relevante na análise da variação de α e β . Posto isto, este trabalho contribuirá para o desenvolvimento de melhores métodos de mapeamento da inundação e preparação para situações de cheia fluvial.

6.2 Trabalhos Futuros

Relativamente à investigação futura nesta área, recomenda-se que seja realizada uma análise semelhante, com recurso ao mesmo método, mas com uma base de dados maior, de modo a assegurar resultados o mais representativos possível.

Seria igualmente relevante uma análise de carácter mais qualitativo de cada variável em estudo, sendo a sua caracterização detalhada essencial à escolha adequada do método de análise, e à obtenção de modelos de previsão o mais próximos da realidade possível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ackers, P. (1993). Flow formulae for straight two-stage channels. *Journal of Hydraulic Research*, 31(4), 509-531.

Aggett, G. R., & Wilson, J. P. (2009). Creating and coupling a high-resolution DTM with a 1-D hydraulic model in a GIS for scenario-based assessment of avulsion hazard in a gravel-bed river. *Geomorphology*, 113(1-2), 21-34.

AL-Khatib IA, Göğüş M (1999) Momentum and kinetic energy coefficients in symmetrical rectangular compound cross section fumes. *Turk J Eng Environ Sci* 23(3):187-198

Barendrecht, M. H., Viglione, A., & Blöschl, G. (2017). A dynamic framework for flood risk. *Water Security*, 1, 3-11.

Bates, P. D., Marks, K. J., & Horritt, M. S. (2003). Optimal use of high-resolution topographic data in flood inundation models. *Hydrological processes*, 17(3), 537-557.

Bousmar, D., & Zech, Y. (1999). "Momentum transfer for practical flow computation in compound channels." *J. Hydraul. Eng.*, 7(696), 696-706.

Cardoso, A. H., Covas, D. I. C., Ferreira, R. M. L. e Almeida, A. B. (2021). *Hidráulica: Fundamentos e Aplicações*. IST Press

Chen, Z., Chen, Q., & Jiang, L. (2016). Determination of apparent shear stress and its application in compound channels. *Procedia Engineering*, 154, 459-466.

Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics* McGraw-Hill Book Company. New York, 507-510.

Christodoulou, G. C. (1992). Apparent shear stress in smooth compound channels. *Water resources management*, 6, 235-247.

Di Baldassarre, G., Viglione, A., Carr, G., Kuil, L., Yan, K., Brandimarte, L., & Blöschl, G. (2015). Debates – Perspectives on socio-hydrology: Capturing feedbacks between physical and social processes. *Water Resources Research*, 51(6), 4770-4781.

Dottori, F., Szewczyk, W., Ciscar, J. C., Zhao, F., Alfieri, L., Hirabayashi, Y. & Feyen, L. (2018). Increased human and economic losses from river flooding with anthropogenic warming. *Nature Climate Change*, 8(9), 781-786.

Ervine, D. A., Baird, J. I., Noutsopoulos, G. C., Hadjipanos, P. A., Bulman, R. B., & Holland, P. G. (1982). Rating curves for rivers with overbank flow. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 73(4), 849-855.

Fernandes, J. N., Leal, J. B., & Cardoso, A. H. (2015). Assessment of stage–discharge predictors for compound open-channels. *Flow Measurement and Instrumentation*, 45, 62-67.

Fernandes, J. N., Pinto, D., Leal, J. B., Cardoso, A. H. (2010). Análise do escoamento em canais de secção composta - Caracterização experimental e modelação 1D.

Gavin, H. P. (2019). The Levenberg-Marquardt algorithm for nonlinear least squares curve-fitting problems. Department of Civil and Environmental Engineering, Duke University, 19.

Govindaraju, R. S. (2000). Artificial neural networks in hydrology. I: Preliminary concepts. *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(2), 115-123.

Hamidifar, H., Omid, M. H., & Keshavarzi, A. (2016). Kinetic energy and momentum correction coefficients in straight compound channels with vegetated floodplain. *Journal of Hydrology*, 537, 10-17.

Hardy, R. J., Bates, P. D., & Anderson, M. G. (1999). The importance of spatial resolution in hydraulic models for floodplain environments. *Journal of Hydrology*, 216(1-2), 124-136.

Huthoff, F., Roos, P. C., Augustijn, D. C., & Hulscher, S. J. (2008). Interacting divided channel method for compound channel flow. *Journal of hydraulic engineering*, 134(8), 1158-1165.

Ignjacevic, P., Botzen, W. W., Estrada, F., Kuik, O., Ward, P., & Tiggeloven, T. (2020). CLIMRISK-RIVER: Accounting for local river flood risk in estimating the economic cost of climate change. *Environmental Modelling & Software*, 132, 104784.

Jongman, B., Ward, P. J., & Aerts, J. C. (2012). Global exposure to river and coastal flooding: Long term trends and changes. *Global Environmental Change*, 22(4), 823-835.

Keshavarzi, A., & Hamidifar, H. (2018). Kinetic energy and momentum correction coefficients in compound open channels. *Natural Hazards*, 92, 1859-1869.

Khozani, Z. S., Khosravi, K., Pham, B. T., Kløve, B., Wan Mohtar, W. H. M., & Yaseen, Z. M. (2019). Determination of compound channel apparent shear stress: application of novel data mining models. *Journal of Hydroinformatics*, 21(5), 798-811.

Kubrak, E., Kubrak, J., & Kiczko, A. (2015). Experimental investigation of kinetic energy and momentum coefficients in regular channels with stiff and flexible elements simulating submerged vegetation. *Acta Geophysica*, 63, 1405-1422.

Marks, K., & Bates, P. (2000). Integration of high-resolution topographic data with floodplain flow models. *Hydrological processes*, 14(11-12), 2109-2122.

Mazumder, S. K. (1971). Variation of energy and momentum correction factors with velocity distribution in open-channel subcritical flow. *J. Inst. Eng.*

McCulloch, W. S., & Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The bulletin of mathematical biophysics*, 5, 115-133.

Merz, B., Aerts, J. C. J. H., Arnbjerg-Nielsen, K., Baldi, M., Becker, A., Bichet, A. & Nied, M. (2014). Floods and climate: emerging perspectives for flood risk assessment and management. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(7), 1921-1942.

Merz, B., Blöschl, G., Vorogushyn, S., Dottori, F., Aerts, J. C., Bates, P. & Macdonald, E. (2021). Causes, impacts and patterns of disastrous river floods. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(9), 592-609.

Minns, A. W., & Hall, M. J. (1996). Artificial neural networks as rainfall-runoff models. *Hydrological sciences journal*, 41(3), 399-417.

- Moreta, P. J., & Martin-Vide, J. P. (2010). Apparent friction coefficient in straight compound channels. *Journal of Hydraulic Research*, 48(2), 169-177.
- Myers, W. R. C. (1978). Momentum transfer in a compound channel. *Journal of Hydraulic Research*, 16(2), 139-150.
- Myers, W. R. C., Lyness, J. F., Cassells, J. B., & O'Sullivan, J. J. (2000, September). Geometrical and roughness effects on compound channel resistance. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water and Maritime Engineering* (Vol. 142, No. 3, pp. 157-166). Thomas Telford Ltd.
- Omran, M. (2008). New developments in predicting stage-discharge curves, velocity and boundary shear stress distributions in open channel flow. *Water and Environment Journal*, 22(2), 131-136.
- Prinos, P., Townsend, R., & Tavoularis, S. (1985). Structure of turbulence in compound channel flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(9), 1246-1261.
- Ranjithan, S., Eheart, J. W., & Garrett Jr, J. H. (1993). Neural network-based screening for groundwater reclamation under uncertainty. *Water Resources Research*, 29(3), 563-574.
- Rehbock, T., (1922). The determination of the position of the energy line in flowing water using the velocity correction coefficient. *Der Bauingenieur* 3 (15), 453-455.
- Rogers, L. L., & Dowla, F. U. (1994). Optimization of groundwater remediation using artificial neural networks with parallel solute transport modeling. *Water Resources Research*, 30(2), 457-481.
- Seckin, G., Çağatay, H., Çobaner, M., & Yurtal, R. (2009). Experimental investigation of kinetic energy and momentum correction coefficients in open channels.
- Shiono, K., & Knight, D. W. (1991). Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel. *Journal of fluid mechanics*, 222, 617-646.

Singh, P. K., & Khatua, K. K. (2021). Lateral dissemination of depth-averaged velocity, boundary shear stress and stage-discharge curves for compound channels. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 27(3), 253-266.

Singh, P., Tang, X., & Rahimi, H. R. (2019). Apparent shear stress and its coefficient in asymmetric compound channels using gene expression and neural network. *Journal of hydrologic engineering*, 24(12), 04019051.

Smith, J., & Eli, R. N. (1995). Neural-network models of rainfall-runoff process. *Journal of water resources planning and management*, 121(6), 499-508.

Tang, X., & Knight, D. W. (2008). A general model of lateral depth-averaged velocity distributions for open channel flows. *Advances in Water Resources*, 31(5), 846-857.

Tanty, R., & Desmukh, T. S. (2015). Application of artificial neural network in hydrology A review. *Int. J. Eng. Technol. Res*, 4, 184-188.

The MathWorks Inc. (2016). MATLAB version: 9.0.0 (R2016b), Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.

UNDRR. (2019). Global assessment report on disaster risk reduction. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR).

Van Prooijen, B. C., Battjes, J. A., & Uijttewaal, W. S. (2005). Momentum exchange in straight uniform compound channel flow. *Journal of hydraulic engineering*, 131(3), 175-183.

Vorogushyn, S., Bates, P. D., de Bruijn, K., Castellarin, A., Kreibich, H., Priest, S. & Merz, B. (2018). Evolutionary leap in large-scale flood risk assessment needed. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 5(2), e1266.

Vorogushyn, S., Bates, P. D., de Bruijn, K., Castellarin, A., Kreibich, H., Priest, S., ... & Merz, B. (2018). Evolutionary leap in large-scale flood risk assessment needed. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 5(2), e1266.

Wormleaton, P. R., & Merrett, D. J. (1990). An improved method of calculation for steady uniform flow in prismatic main channel/flood plain sections. *Journal of Hydraulic Research*, 28(2), 157-174.

Wormleaton, P. R., Allen, J., & Hadjipanous, P. (1982). Discharge assessment in compound channel flow. *Journal of the Hydraulics Division*, 108(9), 975-994.



2023

JOÃO DAVID FERREIRA

Estimativa da tensão aparente e dos coeficientes de Coriolis e Boussinesq em canais de secção composta usando redes neuronais.