

ESTUDOS HIDRÁULICOS E A SUA INFLUÊNCIA NO PLANEAMENTO URBANO REGIONAL: APLICAÇÃO PRÁTICA ÀS RIBEIRAS DO FUNCHAL - PORTUGAL

Sérgio Lousada ^(1, 2, 3, 4, 5)

¹ Faculdade de Ciências Exatas e Engenharia (FCEE), Departamento de Engenharia Civil e Geologia (DECG), Universidade da Madeira (UMa), Funchal, Portugal.

² VALORIZA – Centro de Investigação para a Valorização de Recursos Endógenos, Portalegre, Portugal.

³ Grupo de Investigación de Análisis de Recursos Ambientales (ARAM), Universidad de Extremadura; Badajoz, Espanha.

⁴ Instituto de Investigação para a Governança Territorial e Cooperação Interorganizacional, Dąbrowa Górnicza, Polónia.

⁵ CITUR - Madeira - Centro de Investigação, Desenvolvimento e Inovação em Turismo, Madeira, Portugal.

(slousada@staff.uma.pt)

RESUMO: Fenómenos de cheias em territórios urbanos são uma realidade um pouco por todo o globo. Contudo, quer os processos de planeamento urbanístico, quer os estudos hidráulicos, maioritariamente, não são elaborados, tendo em consideração, a multidisciplinaridade e complexidade da temática, resultando em aglomerações urbanas – com tendência à ocorrência desta tipologia de evento – que apresentam lacunas de um correto planeamento urbano articulado, não estando capacitadas para fazer face a este tipo de fenómeno natural. Nesse sentido, a articulação de estudos multivariados, como são o caso do planeamento urbano, e hidráulicos, são vistos como essências para o sucesso territorial sustentado das regiões afetadas por esta tipologia de fenómenos. Assim, através de ferramentas exploratórias e de análise, como disso são exemplo: o cálculo coeficientes de rugosidade em canais de escoamento artificiais, análise de escoamentos superficiais, modelos computadorizados, avaliação e análise do design e políticas de ordenamento territorial em áreas urbanas, e a sua aplicação a um caso prático – o caso das ribeiras da cidade do Funchal, Madeira, Portugal – são apenas alguns exemplos de análise que o estudo leva a cabo, desde uma perspectiva multidisciplinar, a fim de definir bases e medidas para poder prevenir e minimizar os impactos negativos de tais eventos, assim como aumentar a segurança das populações residentes.

Palavras chaves: Canais de escoamento artificiais; Cheias urbanas; Modelação; Multidisciplinaridade; Planeamento urbanístico.

HYDRAULIC STUDIES AND THEIR INFLUENCE FOR THE REGIONAL URBAN PLANNING: A PRACTICAL APPROACH TO FUNCHAL'S RIVERS - PORTUGAL.

ABSTRACT: Flood phenomena in urban territories are a reality all over the globe. However, both urban planning processes and hydraulic studies are

mostly not well-developed, taking into account the multidisciplinary and complexity of the theme, resulting in urban agglomerations - with a tendency to occur in this typology of events - that correct articulated urban planning, not being able to cope with this type of natural phenomenon. So, the articulation of multivariate studies, such as urban and hydraulic planning, are seen as essences for the sustained territorial success of the regions affected by this typology of phenomena. Thus, by exploratory tools and analysis methods, as examples are: calculation of roughness coefficients in artificial runoff channels, analysis of surface runoff, computer models, evaluation and analysis of design and spatial planning policies in urban areas, and its application to a practical case - the case of the rivers of the city of Funchal, Madeira, Portugal - are just a few examples of analysis that the study carries out, from a multidisciplinary perspective, in order to define bases and measures to be able to prevent and minimize the negative impacts of such events, as well as increasing the safety of resident populations.

Keywords: Artificial channels; Modeling; Multidisciplinary studies; Urban floods; Urban planning.

INTRODUÇÃO

As cheias urbanas são um evento à escala global, com casos mediáticos espalhados pelo globo como Dresden, Alemanha (Kreibich & Thieken, 2009), Génova, Itália (Faccini, *et al.*, 2014) e as Caraíbas (Acevedo-Espinoza, 2014) e a Região Autónoma da Madeira (RAM), alvo de vários eventos de cheia, com o mais recente a 20 fevereiro de 2010 (Baioni, 2011; Oliveira, *et al.*, 2011; Moura, *et al.*, 2019).

A importância de escolher corretamente o coeficiente de rugosidade para um determinado canal é essencial para a avaliação da sua capacidade de escoamento. Um valor excessivo é antieconómico e resulta no dimensionamento errado do canal, enquanto, um valor baixo pode resultar num canal hidraulicamente inadequado. Valores corretos do coeficiente de rugosidade são os objetivos de contínuas pesquisas, e como resultado, uma grande quantidade de dados está disponível a respeito dessa controversa questão (Harun-ur-Rashid, 1990; ACPA, 1997; IHB, 2005; Lencastre & Franco, 2006; Xing, *et al.*, 2016; Lousada & Marques, 2020).

A variação do coeficiente de rugosidade pode originar: o aumento/diminuição da descarga a jusante, evitando problemas de inundações; alteração da velocidade do escoamento, podendo evitar sedimentação de detritos ou o desgaste e erosão do canal; variação do nível de água e alteração geométrica da seção transversal.

Assim, o conhecimento da natureza e do estado em que se encontra o leito e paredes de um canal, ou seja, o seu grau de rugosidade, é muito importante face ao considerável efeito que tem sobre o escoamento (Harun-ur-Rashid, 1990; ACPA, 1997; IHB, 2005; Lencastre & Franco, 2006; Xing, *et al.*, 2016; Lousada, *et al.*, 2018; Lousada, *et al.*, 2018a).

Os valores de coeficiente de rugosidade obtidos em testes de laboratório para canais artificiais correspondem normalmente a valores significativamente inferiores àqueles que correspondem ao caso real, quando por exemplo não se consideram o transporte de sedimentos, a degradação do revestimento das paredes e fundo, variação de caudal, entre outros (Harun-ur-Rashid, 1990; ACPA, 1997; IHB, 2005; Lencastre & Franco, 2006; Xing, *et al.*, 2016).

Normalmente os métodos de medição direta do caudal em canais desta natureza não são viáveis, nomeadamente em caso de cheia, grandes declives (maiores que 1%) e transporte de sedimentos, pois os equipamentos não estão preparados para estas situações limite. Assim, torna-se necessário a utilização de métodos indiretos para o cálculo do caudal e consequente avaliação do coeficiente de rugosidade, aspeto que contribui para a dificuldade em determinar precisamente o valor deste coeficiente (Harun-ur-Rashid, 1990; ACPA, 1997; IHB, 2005; Lencastre & Franco, 2006; Xing, *et al.*, 2016; Lousada & Silva, 2019).

Este coeficiente encontra-se em tabelas coligidas por vários autores, com base em vários estudos, podendo servir como ponto de partida para um novo estudo, mas podendo sofrer variações consideráveis consoante as condições *in situ* (Harun-ur-Rashid, 1990; ACPA, 1997; IHB, 2005; Lencastre & Franco, 2006; Xing, *et al.*, 2016).

Com este estudo pretende-se avaliar a variação do coeficiente de rugosidade em função das características geométricas, volume de água transportado e degradação do revestimento do canal, aplicando a metodologia escolhida, ao caso prático de trechos regularizados das ribeiras do Funchal, RAM.

Para tal há que cumprir determinados objetivos: caracterização dos métodos de cálculo do coeficiente de rugosidade, especialmente os concebidos para avaliação deste parâmetro no caso de canais artificiais, desprezando o efeito do transporte sólido (não suportado pelo modelo experimental); modelação dos efeitos no valor do coeficiente de rugosidade em função da geometria do canal e do caudal; adoção de critérios práticos de avaliação do coeficiente de rugosidade.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apesar da dificuldade em determinar o coeficiente de rugosidade vários elementos como livros, artigos e estudos foram publicados ao longo dos anos (Harun-ur-Rashid, 1990; Yin, 1994; ACPA, 1997; Martins, 2000; Lyra, 2003; IHB, 2005; Abayati, *et al.*, 2006; Szydłowski & Magnuszewski, 2007; Levy, 2008; De Doncker, *et al.*, 2009; Hossain, *et al.*, 2009; Baioni, 2011; Acevedo-Espinoza, 2014; Aupoix, 2015; Li, *et al.*, 2015; Neal, *et al.*, 2015; Cienciala & Hassan, 2016; Dimitriadis, *et al.*, 2016; Verschoren, *et al.*, 2016; Wei, *et al.*, 2016; Lousada & Gonçalves, 2019), os quais contribuíram para uma melhoria significativa nos métodos, metodologias e materiais aplicados nesta problemática, debruçando-se não só nos aspetos técnicos como também na sua influência no planeamento urbano.

Secção transversal

No caso de escoamentos em canais, o conhecimento da secção transversal do escoamento (perpendicular à direção do escoamento) é de fundamental importância para a determinação do coeficiente de rugosidade e consequente caracterização do escoamento (Martins, 2000; IHB, 2005; Lencastre & Franco, 2006; Lousada, 2018; Lousada, 2018a). Os canais em estudo possuem secção transversal retangular (Figura 1), dando-se ênfase à sua discriminação.

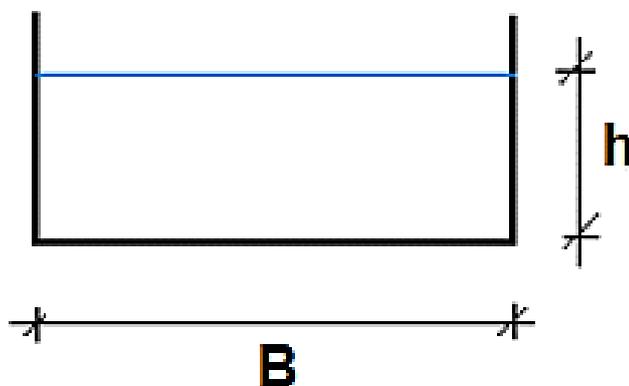


Figura 1 - Secção transversal retangular.

Características da secção transversal: (i) Profundidade, h : distância entre o ponto mais baixo da secção transversal do canal e a superfície livre do líquido; (ii) Largura na superfície, B : distância entre margem esquerda e direita, medida na superfície livre; (iii) Área molhada, A : área da secção transversal perpendicular à direção do escoamento ($A=B \times h$); (iv) Perímetro molhado P : comprimento da linha de contorno da área molhada ($P=B+2h$); (v) Raio hidráulico, R_H : relação entre área molhada e perímetro molhado ($R_H=A/P$).

Caudal de Ponta de Cheia

O valor do caudal trata-se de um dado importante para a determinação do valor do coeficiente de rugosidade, uma vez que, por si só e consoante a sua variação, conduz a diferentes alturas de água e velocidades, originando diferentes coeficientes de rugosidade. Assim, é do interesse deste estudo avaliar o caudal de ponta de cheia, para diferentes períodos de retorno, obtendo uma análise mais assertiva do coeficiente de rugosidade e seu efeito durante um fenómeno de cheia (Martins, 2000; IHB, 2005; Lencastre & Franco, 2006).

O caudal de ponta cheia pode ser determinado a partir de (Martins, 2000; IHB, 2005; Lencastre & Franco, 2006):

- fórmulas empíricas - tendo em conta a experiência acumulada e a área da bacia hidrográfica;
- fórmulas cinemáticas - tendo em conta as noções de tempo de concentração e precipitação crítica (precipitação que origina o maior caudal de ponta para um determinado tempo de concentração);
- fórmulas estatísticas - tendo em conta a análise de um conjunto de valores referentes a uma dada secção.

Coefficiente de rugosidade

As condições de escoamento e a natureza de uma linha de água, nomeadamente o seu grau de rugosidade, influenciam em grande medida o escoamento (Harun-ur-Rashid, 1990; ACPA, 1997; Secretaria de Vias Públicas, 1999; Martins, 2000; Lyra, 2003; IHB, 2005; Abayati, *et al.*, 2006; Lencastre & Franco, 2006; De Doncker, *et al.*, 2009).

Num canal com boa manutenção, com um leito e taludes lisos, um dado caudal (Q) escoar-se-á com uma velocidade média (U) que excederá consideravelmente o valor da velocidade que se obteria se o escoamento ocorresse num canal com as mesmas dimensões, mas em terra, com ervas no leito e taludes, devido a uma deficiente manutenção. Nestas últimas condições a resistência ao escoamento é muito maior do que nas inicialmente descritas, o que provoca um abrandamento do escoamento (Harun-ur-Rashid, 1990; ACPA, 1997; Secretaria de Vias Públicas, 1999; Martins, 2000; Lyra, 2003; IHB, 2005; Abayati, *et al.*, 2006; Lencastre & Franco, 2006; De Doncker, *et al.*, 2009).

O fenómeno provocará uma subida do nível da água relativamente ao leito do canal, a qual se pode tornar perigosa no caso de canais de pedra e rocha sem manutenção, ou que contêm ervas, plantas ou outros materiais. (Harun-ur-Rashid, 1990; ACPA, 1997; Secretaria de Vias Públicas, 1999; Martins, 2000; Lyra, 2003; IHB, 2005; Abayati, *et al.*, 2006; Lencastre & Franco, 2006; De Doncker, *et al.*, 2009).

Assim, o conhecimento da natureza e do estado em que se encontra o leito de um escoamento, em resumo, o seu grau de rugosidade (coeficiente de rugosidade ou de Manning), é muito importante face ao considerável efeito que tem sobre o escoamento (Harun-ur-Rashid, 1990; ACPA, 1997; Secretaria de Vias Públicas, 1999; Martins, 2000; Lyra, 2003; IHB, 2005; Abayati, *et al.*, 2006; Lencastre & Franco, 2006; De Doncker, *et al.*, 2009). Para o estudo do regime uniforme em escoamentos com superfície livre, utiliza-se a função de Manning, devido à simplicidade da sua forma e os resultados satisfatórios nas aplicações práticas, com a seguinte forma:

$$Q = \left(\frac{1}{n}\right) \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot \sqrt{i} \quad (\text{eq. 1})$$

Em que:

Q - caudal escoado (m³/s);

A - secção transversal do escoamento (m²);

R - o raio hidráulico (m), quociente entre a secção transversal do escoamento e o seu perímetro molhado.

O valor de R é calculado a partir das características geométricas da secção;

i - para alturas de água reduzidas, a inclinação da soleira do canal e para alturas de água significativas, a perda de carga contínua;

n - o coeficiente de rugosidade ou de Manning (m^{-1/3}s).

No dimensionamento hidráulico da estrutura, a seleção do coeficiente de rugosidade deve refletir o comportamento esperado da obra ao longo de sua vida útil, garantindo que, durante este período, se tenha capacidade de escoamento igual ou superior à do projeto. Normalmente recorre-se a valores padronizados do coeficiente de rugosidade a serem utilizados nos projetos de drenagem. Situações especiais deverão ser analisadas pelo projetista, o qual deverá justificar os valores obtidos (Harun-ur-Rashid, 1990; ACPA, 1997; Secretaria de Vias Públicas, 1999; Martins, 2000; Lyra, 2003; IHB, 2005; Abayati, *et al.*, 2006; Lencastre & Franco, 2006; De Doncker, *et al.*, 2009).

Caso as características de rugosidade das paredes/taludes e do fundo do canal forem diferentes (secção mista), o valor de “n” obtido experimentalmente representa uma média ponderada, ou seja, o coeficiente de rugosidade deverá ser composto a partir da rugosidade obtida para cada material (Harun-ur-Rashid, 1990;

ACPA, 1997; Secretaria de Vias Públicas, 1999; Martins, 2000; Lyra, 2003; IHB, 2005; Abayati, *et al.*, 2006; Lencastre & Franco, 2006; De Doncker, *et al.*, 2009).

Assim sendo, sob diferentes condições experimentais poderemos obter diferentes valores de n ; tal deve-se ao facto de a influência das paredes aumentar com a altura do escoamento e, portanto, com a variação da sua secção (Harun-ur-Rashid, 1990; ACPA, 1997; Secretaria de Vias Públicas, 1999; Martins, 2000; Lyra, 2003; IHB, 2005; Abayati, *et al.*, 2006; Lencastre & Franco, 2006; De Doncker, *et al.*, 2009).

Segundo a Secretaria de Vias Públicas (1999), entre as diversas fórmulas existentes para cálculo da rugosidade composta é recomendada a fórmula de Horton-Einstein:

$$n = \left[\frac{\sum_1^N P_i n_i^{3/2}}{P} \right]^{2/3} \quad (\text{eq. 2})$$

Onde:

P_i - Perímetro molhado da secção i (m);

n_i - Rugosidade do trecho com perímetro P_i ($m^{-1/3}s$).

A principal dificuldade ao utilizar esta formulação recai na definição do coeficiente de rugosidade (n), já que não existe metodologia exata para a sua seleção. Atualmente, determinar um valor de “ n ” passa por estimar a resistência do escoamento no canal, pois, na realidade, o coeficiente de rugosidade é muito variável e depende de um certo número de fatores (Tabela I) (Harun-ur-Rashid, 1990; ACPA, 1997; Secretaria de Vias Públicas, 1999; Martins, 2000; Lyra, 2003; IHB, 2005; Abayati, *et al.*, 2006; Lencastre & Franco, 2006; De Doncker, *et al.*, 2009).

Tabela I - Fatores nucleares (adaptado de Secretaria de Vias Públicas, 1999; Lyra, 2003).

Fatores	Influência
Rugosidade da superfície	Materiais finos provocam um efeito menor, reduzindo o valor do coeficiente, enquanto que materiais grosseiros aumentam a rugosidade.
Vegetação	Pode ser analisada como uma rugosidade superficial e o seu efeito depende principalmente, da sua altura, densidade, distribuição e espécie, com especial atenção ao seu crescimento.
Irregularidade do canal	Canais com irregularidades no seu perímetro molhado e variações na sua seção transversal sofrem acréscimo na rugosidade
Sedimentação e erosão	A sedimentação de material fino em canais irregulares pode melhorar a superfície do canal, reduzindo a rugosidade, enquanto que a erosão pode provocar irregularidades, aumentando a mesma.
Obstruções	A presença de troncos de árvores, pilares de pontes e outros materiais incrementam a rugosidade do canal, além do efeito de redução de seção.
Alinhamento do canal	Referindo-se às curvas; quanto mais suave é curva (grande raio de curvatura) menor será o valor de “ n ”.
Tamanho e forma do canal	Dependendo do caso, um aumento do raio hidráulico pode aumentar ou diminuir o coeficiente de rugosidade.
Caudal e altura da lâmina de água	Na maior parte dos escoamentos o valor de “ n ” diminui com o aumento do caudal e da altura de água, para as mesmas condições de geometria e inclinação.

METODOLOGIA

A metodologia (Figura 2) utilizada neste estudo contempla a adoção de uma abordagem quantitativa no processo de recolha de dados e no seu tratamento, através de técnicas estatísticas, frequentemente aplicadas às ciências em estudos descritivos que procuram descobrir e classificar a relação entre variáveis, com base em informação obtida da análise de um caso de estudo, ideal para o estudo hidráulico (Yin, 1994; Levy, 2008; Amador, 2010).



Figura 2 - Metodologia

CARACTERIZAÇÃO DA CASUÍSTICA

Casuística

O arquipélago da Madeira consiste em três ilhas, sendo a maior Madeira, com uma área de aproximadamente 22 km × 57 km (Figura 3). As montanhas vulcânicas estão posicionadas em uma cordilheira orientada na direção noroeste-sudeste através da porção central da ilha. Os principais picos atingem 1818 m (Pico Arieiro), 1852 m (Pico das Torres) e 1861 m (Pico Ruivo). As terras altas estendem-se lateralmente dos picos (> 1000 m), profundamente esculpidas pelas linhas de água que desaguam na costa. As terras altas são mais pronunciadas para o oeste. Ao leste, a terra está seca, varrida pelo vento e deserta. O clima muda de floresta subtropical para alpino ao longo das encostas das montanhas (França & Almeida, 2003; Ribeiro & Ramalho, 2009; Brum da Silveira, *et al.*, 2010; Ramalho, *et al.*, 2015; Pullen, *et al.*, 2017).

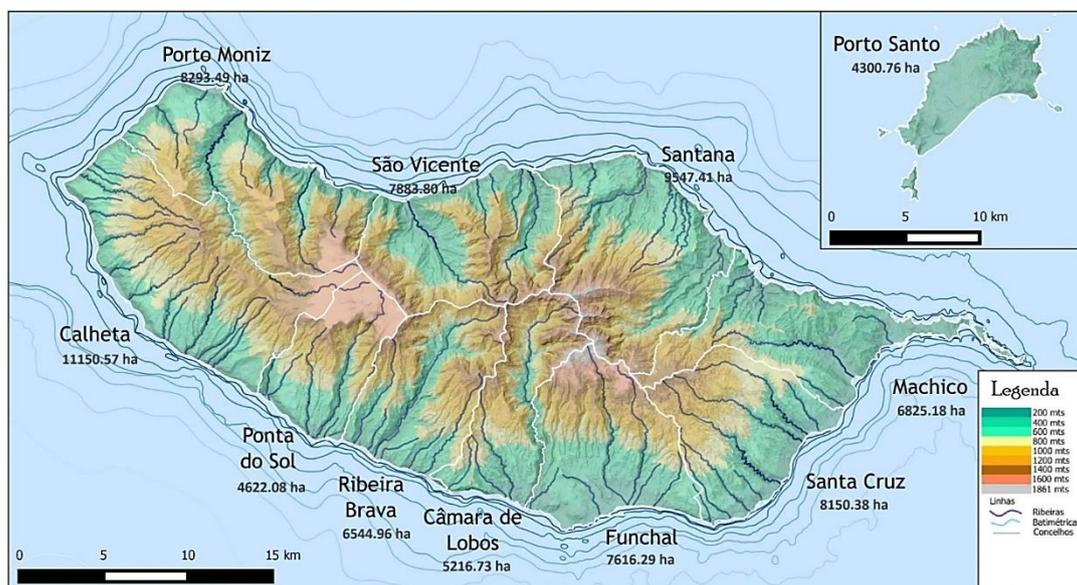


Figura 3 - Mapa de relevo da RAM (fonte: Wikimedia Commons).

O caso de estudo refere-se às 3 ribeiras do concelho do Funchal: São João, Santa Luzia e João Gomes, mais precisamente junto à foz das mesmas; para cada uma das ribeiras, seleciona-se um trecho de 25 metros e efetua-se a análise do mesmo para diferentes valores de caudal, de acordo com o período de retorno considerado (10, 50 e 100 anos), por forma a observar a variação do coeficiente de rugosidade e seu efeito no escoamento. Os três trechos (cada um deles definido entre 2 secções) encontram-se completamente regularizados com os muros laterais executados em betão e o leito revestido com betão ciclópico (Tabela II).

Tabela II - Caracterização dos trechos selecionados.

Trecho	Secções	Cotas da secção transversal (m)				Quilometragem (km)	Largura (m)	Inclinação (%)
		Posição	Esquerda	Centro	Direita			
SJ	SJ1	Topo	14.14	-	14.45	0+275	11.0	2.70
		Leito	4.65	3.99	3.33			
	SJ0	Topo	14.19	-	14.19	0+300		
		Leito	3.97	3.31	2.65			
SL	SL1	Topo	11.42	-	10.28	0+125	14.0	3.05
		Leito	5.08	5.08	5.08			
	SL0	Topo	10.77	-	9.93	0+150		
		Leito	4.32	4.32	4.32			
JG	JG1	Topo	9.47	-	9.17	0+200	10.0	2.00
		Leito	0.84	0.84	0.84			
	JG0	Topo	8.87	-	8.51	0+225		
		Leito	0.34	0.34	0.34			

Para efetuar a análise dos trechos selecionados dos canais artificiais referidos anteriormente é importante caracterizar a bacia hidrográfica onde os mesmos se encontram inseridos, obtendo parâmetros importantes para o cálculo de caudais de ponta de cheia, de forma agilizada e relativamente simples, recorrendo ao *software* ArcMap 10.3, principal componente do sistema ArcGIS (sistema de informação geográfica) da empresa ESRI (*Environmental Systems Research Institute*), usado principalmente para ver, editar, criar e analisar dados geoespaciais, mas também complementado com o apoio do Excel e AutoCAD, foi possível obter os parâmetros requeridos para caracterizar as bacias hidrográficas: São João, Santa Luzia e João Gomes (Figura 4).

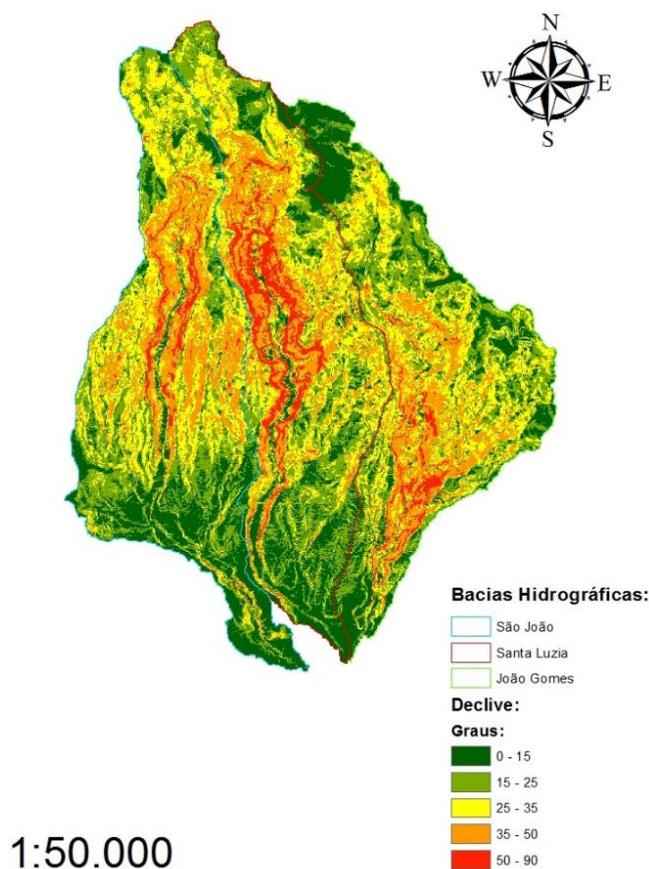


Figura 4 - Mapa de declives.

A nível da caracterização geológica, constata-se que o Funchal é constituído essencialmente por camadas do complexo superior, intermédio (em maior percentagem) e cobertura sedimentar (foz das ribeiras): complexos superiores - derrames lávicos locais, com intercalações piroclásticas; idade entre um milhão e

seis mil anos; rochas ígneas extrusivas; complexo intermédio - sequências lávicas com intercalações piroclásticas, separadas por níveis de erosão; idade entre 2,5 e 1 milhão de anos; rochas ígneas extrusivas; cobertura sedimentar - cascalheiras fluviais e marinhas, aluviões e areias de praia; rochas sedimentares. (França & Almeida, 2003; Ribeiro & Ramalho, 2009; Brum da Silveira, *et al.*, 2010; Ramalho, *et al.*, 2015; Pullen, *et al.*, 2017).

Com base na Planta de Ordenamento para o Concelho do Funchal, a qual representa o modelo de estrutura espacial, de acordo com a classificação e qualificação dos solos, a zona em estudo é essencialmente urbana (área junto a foz), sendo que o coberto vegetal encontra-se presente essencialmente em parques, jardins e nas margens e leito das ribeiras (presença de vegetação flexível, excetuando as zonas em que o fundo está betonado).

Estudo do Coeficiente de rugosidade

Generalidades

O processo prático da análise do coeficiente de rugosidade que se inicia com uma análise da precipitação seguida do cálculo do caudal, aplicação dos modelos numéricos e do modelo experimental para o estudo propriamente dito, finalizando com a análise técnica do comportamento hidráulico do troço modelado e discussão dos resultados obtidos.

Análise da precipitação

Esta análise consiste num processo de ajuste de leis estatísticas a amostras de variáveis hidrológicas e estimação dessas variáveis em função da probabilidade de excedência (Figura 5).



Figura 5 - Análise probabilística.

A amostra consiste em dados de precipitação diária, por estação, para o concelho do Funchal, para uma série de 15 anos com final a 31/12/2014, obtidos através da consulta do *Web site* do SNIRH - Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos.

Assim, para efeitos de estudo, selecionou-se os períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos por se considerar os que se adaptam à situação de um canal artificial a curto, médio e longo prazo, respetivamente (Tabela III).

Tabela III - Precipitação máxima anual consoante a duração, lei estatística e período de retorno.

Duração (horas)	Lei com melhor ajuste	Precipitação máxima anual (mm)		
		10 Anos	50 Anos	100 Anos
24	Galton	171.364	235.395	263.312
48	Gumbel	222.537	290.868	319.756
72	Gumbel	261.523	340.140	373.376
96	Gumbel	294.367	379.808	415.929
120	Galton	326.291	415.689	452.785

Com base nos pares de valores (duração, precipitação) e para a lei com melhor ajuste, define-se uma relação para o período de retorno considerado, mais conhecida como linha de possibilidade udométrica ou LPU (Figura 6).

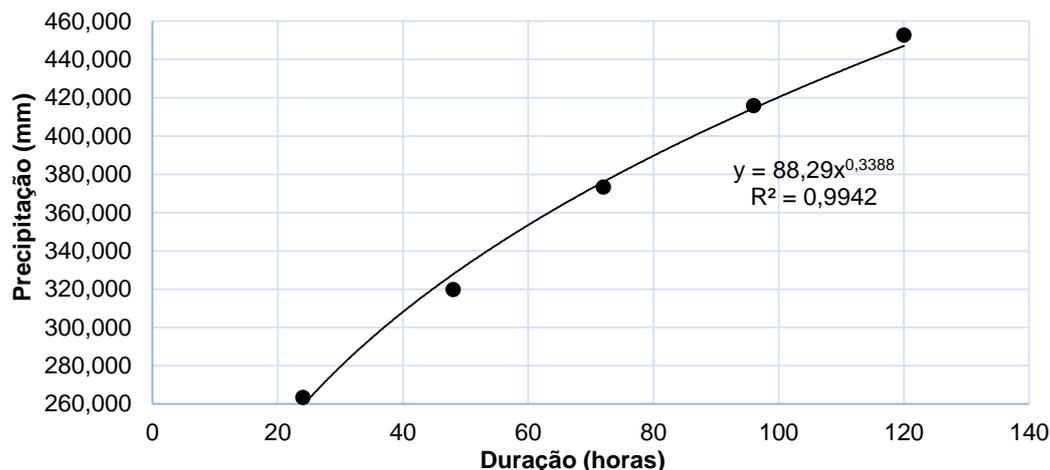


Figura 6 - LPU para um período de retorno de 100 anos.

A partir deste gráfico e sua respetiva fórmula, pode-se calcular o valor da precipitação para a duração necessária à análise e, conseqüentemente, a intensidade. Os valores anteriores são necessários para o cálculo do caudal através de algumas das fórmulas referidas neste documento.

Caudais de ponta de cheia

Para os valores obtidos, para cada uma das diferentes fórmulas utilizadas, é determinado o valor médio do caudal (Tabela IV **Erro! Fonte de referência não encontrada.**) que, por sua vez, é utilizado para efeitos de cálculo, simulação e modelação.

Tabela IV - Caudal de ponta de cheia.

Caudal de ponta de cheia para as bacias hidrográficas em estudo				
Período de retorno (anos)	Bacia Hidrográfica	São João	Santa Luzia	João Gomes
	Fórmula	Caudal (m³/s)		
10	Forti	131.459	127.895	114.501
	Iskowski	195.885	190.247	169.225
	Pagliari	408.555	397.973	357.961
	Racional	479.874	480.863	444.855
	Giandotti	167.270	167.615	155.064
	Mockus	345.468	347.811	323.729
	Témez	227.401	227.870	210.807
	Caudal médio	244.489	242.534	222.018
50	Forti	131.459	127.895	114.501
	Iskowski	195.885	190.247	169.225
	Pagliari	408.555	397.973	357.961
	Racional	900.465	904.454	839.402
	Giandotti	261.564	262.722	243.826
	Mockus	345.468	347.811	323.729
	Témez	355.592	357.167	331.478
	Caudal médio	324.873	323.534	297.515
100	Forti	131.459	127.895	114.501
	Iskowski	195.885	190.247	169.225
	Pagliari	408.555	397.973	357.961
	Racional	1097.566	1103.333	1025.115
	Giandotti	306.064	307.672	285.861
	Mockus	345.468	347.811	323.729
	Témez	416.089	418.276	388.623
	Caudal médio	362.636	361.651	333.127

Para as fórmulas utilizadas, foram adotados certos valores de coeficientes (Tabela V).

Tabela V - Valores adotados para determinados coeficientes existentes nas fórmulas.

Valores adotados				
Fórmula	Parâmetro	São João	Santa Luzia	João Gomes
Iskowski	k_{is}	0.600	0.600	0.600
	m_i	8.878	8.889	8.931
Racional	C	0.70	0.70	0.70
	$C_f, T=10$	1.00	1.00	1.00
	$C_f, T=50$	1.20	1.20	1.20
	$C_f, T=100$	1.25	1.25	1.25
Giandotti	λ	0.24	0.24	0.24
Témez	C	0.995	0.995	0.995
	P_0	1.162	1.162	1.162
	CN	95.000	95.000	95.000
	CNIII	97.763	97.763	97.763

Modelação

A área de modelação e simulação trata-se de um recurso importante e ferramenta indispensável ao método científico, para teste e validação de conceitos e teorias, útil em praticamente todos os projetos de mestrado em Engenharia Civil.

A construção de um modelo serve para compreender melhor o sistema em análise, ajudando a visualizar o sistema como ele é ou como desejamos que seja, permite especificar a estrutura ou o comportamento de um sistema, proporciona um guia para a construção do sistema e ainda documenta as decisões tomadas.

Para tal recorre-se a modelos numéricos ou físicos (referido geralmente como modelo experimental). Neste trabalho faz-se uso dos seguintes modelos:

- Modelo experimental (canal multifunções);
- Modelos numéricos:
 - Folha de cálculo programada;
 - Software HEC-RAS.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após tratamento dos dados, apresenta-se seguidamente os resultados obtidos através da folha de cálculo programada e do modelo experimental. Os resultados obtidos através do programa HEC-RAS serão desconsiderados, uma vez que os mesmos se referem a uma situação que, neste caso, não faz sentido que é a de o valor do coeficiente de rugosidade se manter constante ao longo do comprimento do trecho experimentado.

Utiliza-se como caso de estudo o trecho de 25.0 m da ribeira de João Gomes, sendo que a análise desta é semelhante à dos outros dois trechos.

A variação do coeficiente de rugosidade foi estudada tendo em conta 3 caudais de ponta de cheia para diferentes períodos de retorno (10, 50 e 100 anos) que, no caso da ribeira de João Gomes, tomam os valores de 222.018, 297.515 e 333.127 m³/s respetivamente, os quais no modelo experimental correspondem caudais respetivos de 6.000, 8.000 e 9.000 m³/h, obtidos através de uma regra de três simples fixando o máximo caudal real como o máximo caudal debitado pelo equipamento, enquanto que na folha de cálculo programada são utilizados os caudais reais.

Os resultados obtidos através do modelo experimental têm de ser analisados tendo em conta que as reduções geométricas não são uniformes (pois trata-se de um equipamento produzido em massa) e ainda as imperfeições do canal, justificando desde já as variações exageradas do coeficiente ao longo do canal (Figura 7).

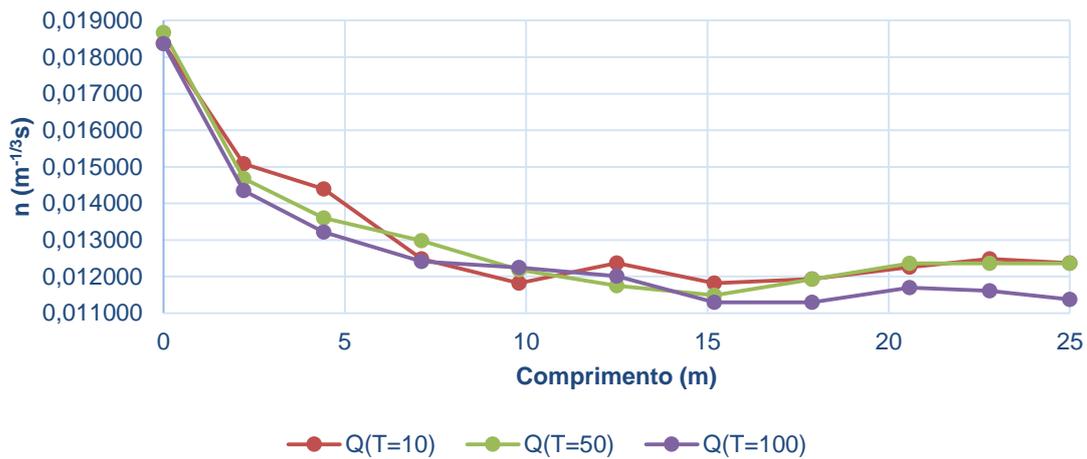


Figura 7 - Variação do coeficiente de rugosidade para os diferentes caudais na ribeira de João Gomes.

De qualquer forma o gráfico anterior não escapa à regra de o coeficiente “n” diminuir ao longo do canal, pois a altura de água diminui, produzindo cada vez menos atrito entre as paredes do canal, favorecendo um escoamento cada vez mais rápido. Flutuações da bomba que fazem com que a linha de água não se mantenha estável, reduções geométricas não uniformes, imperfeição no fundo do canal e caudais reduzidos são uma acumulação de pequenos erros que influenciam significativamente os resultados.

Através da folha de cálculo programada é possível efetuar uma análise detalhada da variação do coeficiente de rugosidade, precisando apenas de um valor inicial para começar a iteração. Nestes gráficos é possível fazer duas observações importantes:

1. Para o mesmo caudal, quanto maior é o valor inicial de “n”, menor é o valor final do mesmo (maior diferença entre os valores inicial e final). Tal deve-se ao fato da perda de carga unitária diminuir mais rapidamente para valores iniciais de “n” maiores (Figura 8 e Tabela VI).

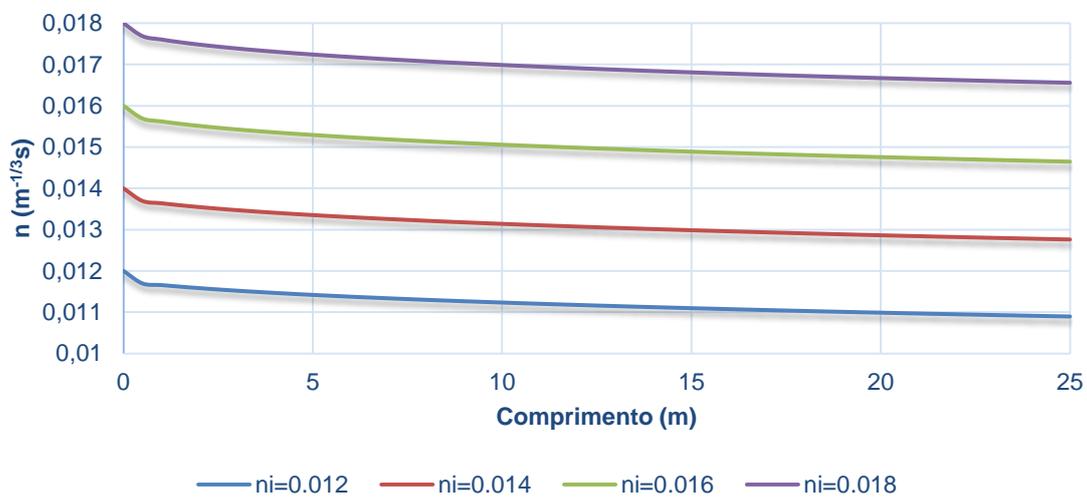


Figura 8 - Variação do coeficiente de rugosidade com n_i distintos, para Q(T=100) na ribeira de João Gomes.

Tabela VI - Diferença entre os valores inicial e final de “n” para um caudal constante Q(T=100).

n _i	n _r	Diferença
0.012	0.010895301	0.001104699
0.014	0.012760373	0.001239627
0.016	0.014646424	0.001353576
0.018	0.016557249	0.001442751

2. Para o mesmo valor inicial de “n”, quanto maior é o caudal, maior é o valor final do coeficiente de rugosidade (menor a diferença entre os valores inicial e final). Tal deve-se ao fato da altura de água aumentar com o aumento do caudal (Figura 9 e Tabela VII).

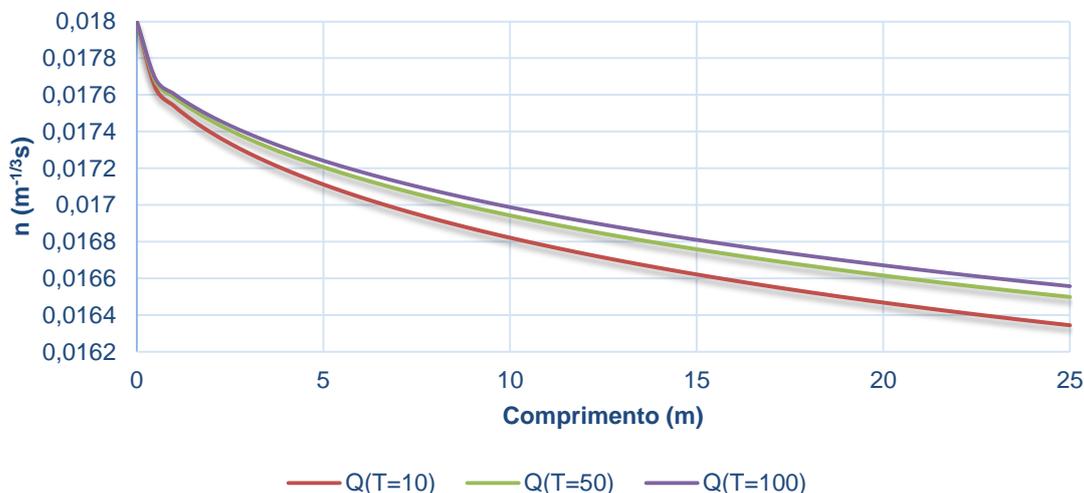


Figura 9 - Variação do coeficiente de rugosidade com $n_i=0.018$ para os diferentes caudais na ribeira de João Gomes.

Tabela VII - Diferença entre os valores inicial e final de “n” para um valor “ n_i ” constante.

Caudal	n_i	n_f	Diferença
Q(T=10)	0.018	0.016344482	0.001655518
Q(T=50)	0.018	0.016498506	0.001501494
Q(T=100)	0.018	0.016557249	0.001442751

As observações anteriores continuam verdadeiras para todos os outros casos e ribeiras, isto é, para um determinado caudal constante (variando o valor inicial do coeficiente de rugosidade) a observação efetuada no ponto 1 é sempre válida, enquanto que para um valor inicial do coeficiente de rugosidade constante (variando o caudal) a observação efetuada no ponto 2 é sempre válida.

Tanto na Figura 8 como na Figura 9 é possível observar uma ligeira variação (entenda-se uma súbita diminuição do valor de “n”) entre os 0 m e os 0.5 m de comprimento. Tal variação deve-se ao arranque do programa que gera de início um valor de “n” ligeiramente alto, pois a indicação dada pelo utilizador, necessária ao arranque, é de que o escoamento tem início a partir da altura crítica, quando na verdade o escoamento se inicia no topo da bacia hidrográfica chegando a este ponto já com uma dada altura que, sem medições de campo, é necessário arbitrar. Como o escoamento é rápido então o mesmo está condicionado pela sua altura a montante, tendo o utilizador que dar essa informação ao programa através do cálculo da altura crítica a montante. Pode-se ainda dizer que a variação súbita no arranque do programa equivale à situação da física em que para mover um dado objeto que inicialmente se encontra no estado de repouso é necessária uma força extra necessária para o movimentar.

CONCLUSÃO

No decorrer deste estudo foram adotados três métodos diferentes por forma a caracterizar o coeficiente de rugosidade e avaliar o seu efeito no escoamento em canais artificiais, salientando-se desde já a importância da folha de cálculo programada, como o método a partir do qual se obteve os melhores resultados (ACPA, 1997; Hossain, *et al.*, 2009; Aupoix, 2015; Dimitriadis, *et al.*, 2016).

A inexistência de medições de alturas de água para utilização no programa HEC-RAS e os resultados obtidos através do modelo experimental fazem com que dois dos melhores métodos pareçam ineficientes, quando na verdade apenas ficaram sujeitos às circunstâncias do momento e, portanto, ficando aqui registado a potencialidade dos mesmos (ACPA, 1997; Hossain, *et al.*, 2009; Aupoix, 2015; Dimitriadis, *et al.*, 2016).

Os resultados obtidos no modelo experimental não foram de acordo com o esperado ou pelo menos, não totalmente, no sentido de que eram esperados erros, mas não ao ponto de não se poder fazer uma correlação com os outros dois métodos. Demonstra-se assim que, neste caso e baseado nos aspetos já referidos neste documento acerca dos vários “pequenos” erros quando se usa um canal produzido em fábrica com medidas *standard*, a necessidade de um modelo experimental criado de raiz, apesar de oneroso, resultaria em resultados mais satisfatórios e viáveis (ACPA, 1997; Hossain, *et al.*, 2009; Aupoix, 2015; Dimitriadis, *et al.*, 2016).

Por outro lado, a modelação no programa HEC-RAS estava dependente da existência prévia de valores de altura de água medidos nas ribeiras naquelas secções por forma a simular o escoamento os quais não existiam e não faria sentido fazer uso, por exemplo, de valores gerados pela folha de cálculo programada uma vez que a mesma está sujeita ao pressuposto de existir um valor inicial do coeficiente de rugosidade a partir do qual todos os outros são calculados ((ACPA, 1997; Hossain, *et al.*, 2009; Aupoix, 2015; Dimitriadis, *et al.*, 2016).

A folha de cálculo foi o método que produziu os melhores resultados permitindo verificar que o coeficiente “n” diminui ao longo do canal, pois a altura de água diminui, produzindo cada vez menos atrito entre as paredes do canal, favorecendo um escoamento cada vez mais rápido. Ainda para o mesmo caudal, quanto maior é o valor inicial de “n”, menor é o valor final do mesmo (maior diferença entre os valores inicial e final). Tal deve-se ao fato da perda de carga unitária diminuir mais rapidamente para valores iniciais de “n” maiores; e para o mesmo valor inicial de “n”, quanto maior é o caudal, maior é o valor final do coeficiente de rugosidade (menor a diferença entre os valores inicial e final). Tal deve-se ao fato da altura de água aumentar com o aumento do caudal (ACPA, 1997; Hossain, *et al.*, 2009; Aupoix, 2015; Dimitriadis, *et al.*, 2016).

Com base nos resultados podemos afirmar que, neste caso, a folha de cálculo programada é o método mais adequado para o estudo do coeficiente de rugosidade face aos resultados satisfatórios. O programa HEC-RAS só supera a folha de cálculo, no que diz respeito à avaliação do coeficiente de rugosidade, quando na presença de medições de altura de água, permitindo que, após calibração, se realize uma simulação mais realista que a da folha. O modelo experimental resulta quando as dimensões, materiais e caudais podem ser reproduzidos de forma semelhante ou com um comportamento semelhante ao real, senão torna-se muito difícil a interpretação dos resultados obtidos no modelo e a sua repercussão na avaliação do problema real (ACPA, 1997; Hossain, *et al.*, 2009; Aupoix, 2015; Dimitriadis, *et al.*, 2016).

Das afirmações anteriores, chega-se à conclusão de que o coeficiente de rugosidade e o volume de água que circula num canal artificial afetam-se mutuamente fazendo com que a geometria da secção tenha um importante papel no seu equilíbrio (ACPA, 1997; Hossain, *et al.*, 2009; Aupoix, 2015; Dimitriadis, *et al.*, 2016). Com isto é de esperar que junto a povoações, campos de cultivo ou outra forma de infraestruturas importantes é necessário um alargamento da secção e/ou aumento da cota de fundo suficientes e executados num material que produza forças de atrito diminutas para que o escoamento e, focando-se no escoamento em caso de cheia, fique acomodado no canal e se processe rapidamente nessas situações, com o mínimo de turbulência, assegurando assim a segurança dos habitantes e infraestruturas existentes. Tais medidas dependerão da sensibilidade dos governos locais a esta problemática, incidindo principalmente num correto planeamento urbano e ordenamento territorial, ferramenta essencial na prevenção de fenómenos extremos (Baioni, 2011; Acevedo-Espinoza, 2014; Faccini, *et al.*, 2014; Neal, *et al.*, 2015; Castanho *et al.*, 2016; Lousada, *et al.*, 2019).

REFERÊNCIAS

- Abayati, M. A., Yusuf, B., Mohammed, T., & Ghazali, A. (2006). Manning roughness coefficient for grass-lined channel. *Suranaree Journal of Science and Technology*, 317-330.
- Acevedo-Espinoza, S. (2014). Debt, Growth and Natural Disasters A Caribbean Trilogy. *IMF Working Papers*. doi:10.5089/9781498337601.001
- ACPA. (1997). História da pesquisa dos valores do coeficiente de Manning. (ABTC, Trad.) ACPA.
- Amador, M. d. (2010). Tipos de métodos científicos. Lisboa: FCSH, Universidade Nova de Lisboa. Obtido de http://www.fcsh.unl.pt/docentes/cceiaold/images/stories/disciplinas/PhD%20Didactica%20LE/tipos_met_cientificos.pdf
- Aupoix, B. (2015). Revisiting the Discrete Element Method for Predictions of Flows Over Rough Surfaces. *Journal of Fluids Engineering*. doi:10.1115/1.4031558
- Baioni, D. (2011). Human activity and damaging landslides and floods on Madeira Island. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3035-3046. doi:10.5194/nhess-11-3035-2011

- Brum da Silveira, A., Madeira, J., Ramalho, R., Fonseca, P., Rodrigues, C., & Prada, S. (2010). Carta Geológica da ilha da Madeira na escala 1:50.000. Folha A e B. Região Autónoma da Madeira: Secretaria Regional do Ambiente e Recursos Naturais.
- Castanho, R., Loures, L., Fernández, J., and Fernández-Pozo, L., (2016). Identifying critical factors for success in Cross Border Cooperation (CBC) development projects. Habitat International.
- Cienciala, P., & Hassan, M. A. (2016). Sampling variability in estimates of flow characteristics in coarse-bed channels: Effects of sample size. *Water Resources Research*, 1899–1922. doi:10.1002/2015WR017259
- De Doncker, L., Troch, P., Verhoeven, R., Bal, K., Meire, P., & Quintelier, J. (2009). Determination of the Manning Roughness Coefficient Influenced by Vegetation in the River Aa and Biebrza River. *Environmental Fluid Mechanics*, 549-567. doi:10.1007/s10652-009-9149-0
- Dimitriadis, P., Tegos, A., Oikonomou, A., Pagana, V., Koukouvinos, A., Mamassis, N., . . . Efstratiadis, A. (2016). Comparative evaluation of 1D and quasi-2D hydraulic models based on benchmark and real-world applications for uncertainty assessment in flood mapping. *Journal of Hydrology*, 478-492. doi:10.1016/j.jhydrol.2016.01.020
- Faccini, F., Luino, F., Sacchini, A., & Laura, T. (2014). Flash Flood Events and Urban Development in Genoa (Italy): Lost in Translation. XII Congress "Engineering Geology for Society and Territory". Turin: Springer International Publishing Switzerland. doi:10.1007/978-3-319-09048-1_155
- França, J. A., & Almeida, A. B. (2003). Plano regional de água da Madeira. Síntese do diagnóstico e dos objectivos.
- Harun-ur-Rashid, M. (1990). Estimation of Manning's roughness coefficient for basin and border irrigation. Em B. Clothier, W. Dierickx, J. Oster, & D. Wichelns (Edits.), *Agricultural Water Management* (1 ed., Vol. 18, pp. 29-33).
- Hossain, A., Jia, Y., & Chao, X. (2009). Estimation of Manning's roughness coefficient distribution for hydrodynamic model using remotely sensed land cover features. 17th International Conference on Geoinformatics, Geoinformatics 2009 (pp. 1-4). Fairfax, Virginia, USA: George Mason University. doi:10.1109/GEOINFORMATICS.2009.5293484
- IHB. (2005). *Manual on Hydrography*. Monaco: International Hydrographic Bureau.
- Kreibich, H., & Thieken, A. (2009). Coping with floods in the city of Dresden, Germany. *Natural Hazards*. doi:10.1007/s11069-007-9200-8
- Lencastre, A., & Franco, F. M. (2006). *Lições de Hidrologia 3ª edição revista*. Lisboa: Fundação da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Levy, J. S. (2008). Case Studies - Types, Designs and Logics of Inference. *Conflict Management and Peace Science*, 1-18. doi:10.1080/07388940701860318
- Li, S., Shi, H., Xiong, Z., Huai, W., & Cheng, N. (2015). New formulation for the effective relative roughness height of open channel flows with submerged vegetation. *Advances in Water Resources*, 46-57. doi:10.1016/j.advwatres.2015.09.018
- Lousada, S.A.N., Camacho, R. F., Castanho, R. A. (2018). *Escoamento em Canais Artificiais. Áreas Urbanas em Situação de Cheia. Aplicação à Zona Baixa do Funchal.*, ISBN 978-613-9-61139-3, Novas Edições Acadêmicas, Portugal, 125 pp..
- Lousada, S.A.N., Miranda, D. M., Camacho, R. F. (2018a). *Escoamento em Canais Artificiais – Ribeiras do Funchal. Caracterização do Coeficiente de Rugosidade, Aplicação às Ribeiras do Funchal.*, ISBN 978-613-9-61086-0, Novas Edições Acadêmicas, Portugal, 169 pp..
- Lousada, S.A.N. (2018). *Hidráulica - Aulas Teóricas - Vol. I*, ISBN 978-989-8805-20-1, Universidade da Madeira, 353 pp..
- Lousada, S.A.N. (2018a). *Hidráulica - Aulas Práticas - Vol. I*, ISBN 978-989-8805-34-8, Universidade da Madeira, 85 pp..
- Lousada, S.A.N., Moura, A., Castanho, R. A. (2019). *Canais Artificiais – Funchal. Sua Influência em Processos de Planeamento Urbano e Ordenamento Territorial.*, ISBN 978-613-9-80039-1, Novas Edições Acadêmicas, Portugal, 145 pp..
- Lousada, S.A.N., Silva, A. (2019). *Modelação do escoamento com o apoio do Laboratório de Hidráulica – UMa. Aplicação à ribeira da Ribeira Brava – Canais.*, ISBN 978-613-9-80118-3, Novas Edições Acadêmicas, Portugal, 117 pp..
- Lousada, S.A.N., Gonçalves, J. (2019). *Caracterização do Coeficiente de Rugosidade seu Efeito no Escoamento. Simulação e Modelação no Laboratório de Hidráulica da UMa - Canais Naturais - Aplicação às Ribeiras do Funchal.*, ISBN 978-613-9-80149-7, Novas Edições Acadêmicas, Portugal, 165 pp..
- Lousada, S.A.N., Marques, J. (2020). *Caracterização Hidráulica, Hidrológica e do Transporte Sólido. Principais Linhas de Água (Ribeiras) do Concelho de Câmara de Lobos - Ilha da Madeira.*, ISBN 978-613-9-80310-1, Novas Edições Acadêmicas, Portugal, 125 pp..
- Lyra, G. B. (2003). *Avaliação experimental da ocorrência de vazão e velocidades máximas em canais de secção circular*. Minas Gerais, Brasil: Universidade Federal de Viçosa. Obtido em 17 de março de 2017, de <http://alexandria.cpd.ufv.br:8000/teses/engenharia%20agricola/2003/177992f.pdf>
- Martins, F. J. (2000). *Dimensionamento hidrológico e hidráulico de passagens inferiores rodoviárias para águas pluviais*. Coimbra: Universidade de Coimbra. Obtido em 10 de março de 2017, de <http://repositorio.ipv.pt/bitstream/10400.19/482/1/Tese%20-%20Mestrado.pdf>
- Moura, A., Lousada, S., Castanho R. A. (2019). *Canais Artificiais e a sua Influência em Processos de Planeamento Urbano e Ordenamento Territorial*. *Revista Científica Monfragüe Desarrollo Resiliente – Scientific Journal*. Vol. XII (9) pp.183-199. ISSN 2340-5457.
- Neal, J. C., Odoni, N. A., Trigg, M. A., Freer, J. E., Garcia-Pintado, J., Mason, D. C., . . . Bates, P. D. (2015). Efficient incorporation of channel cross-section geometry uncertainty into regional and global scale flood inundation models. *Journal of Hydrology*, 169-183. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.07.026
- Oliveira, R. P., Almeida, A. B., Sousa, J., Pereira, M. J., Portela, M. M., Coutinho, M. A., . . . Lopes, S. (2011). *A avaliação do risco de aluviões na ilha da Madeira*. 10º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa (10º SILUSBA) (pp. 1-20). IST, UMa & LREC. Obtido de <https://www.researchgate.net/publication/244994405>

- Pullen, J., Caldeira, R., D. Doyle, J., May, P., & Tomé, R. (2017). Modeling the air-sea feedback system of Madeira Island. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 1-24. doi:10.1002/2016MS000861
- Ramalho, R., Brum da Silveira, A., Fonseca, P., Madeira, J., Cosca, M., Cachão, M., . . . Prada, S. (2015). The emergence of volcanic oceanic islands on a slow-moving plate: The example of Madeira Island, NE Atlantic. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 522–537. doi:10.1002/2014GC005657
- Ribeiro, M. L., & Ramalho, M. (2009). *Uma Visita Geológica ao Arquipélago da Madeira*. Lisboa: Direção Regional do Comércio, Indústria e Energia e Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I. P.
- Secretaria de Vias Públicas. (1999). *Diretrizes de Projeto para Coeficiente de Rugosidade*. São Paulo: Prefeitura do Município de São Paulo. Obtido em 17 de março de 2017, de <http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/infraestrutura/NORMAS%20T%C3%89CNICAS%20INSTRUC%C3%87%C3%95ES%20NOVAS/Hidr%C3%A1ulica%20e%20drenagem%20urbana/DH-H13.pdf>
- Szydłowski, M., & Magnuszewski, A. (2007). Free surface flow modeling in numerical estimation of flood risk zones: a case study. *Task Quarterly*, 301-313.
- Verschoren, V., Meire, D., Schoelynck, J., Buis, K., Bal, K. D., Troch, P., . . . Temmerman, S. (2016). Resistance and reconfiguration of natural flexible submerged vegetation in hydrodynamic river modelling. *Environmental Fluid Mechanics*, 245–265. doi:10.1007/s10652-015-9432-1
- Wei, M., Blanckaert, K., Heyman, J., Li, D., & Schleiss, A. J. (2016). A parametrical study on secondary flow in sharp open-channel bends: experiments and theoretical modelling. *Journal of Hydro-environment Research*, 1-13. doi:10.1016/J.JHER.2016.04.001
- Xing, Y., Yang, S., Zhou, H., & Liang, Q. (2016). Effect of Floodplain Roughness on Velocity Distribution in Mountain Rivers. *Procedia Engineering*, 467-475. doi:10.1016/j.proeng.2016.07.539
- Yin, R. K. (1994). *Case Study Research: Design and Methods*. London: SAGE Publications.

Submetido em: 01/2020

Aprovado em: 02/2020